

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 76

Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad – Baden

Arbeitsgruppe Geothermik
Editoren: H. L. Gorhan und J. C. Griesser

1988

Die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den beiden geothermischen Forschungsprojekten des NEFF (Nationaler Energie-Forschungs-Fonds) «Geothermische Prospektion im Raume Koblenz –Wildegg–Dielsdorf» (NEFF 1980) sowie «Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung» (NEFF 1984) dar.

Als Ausgangspunkt dienten bereits vorhandene Daten aus Bohrungen, Oberflächengeologie und Hydrogeologie. Parallel zu deren Auswertung wurde der Untergrund des Gebiets mittels verschiedener geophysikalischer Methoden näher erforscht. Die ersten Hypothesen über regionale Zusammenhänge der für die Nutzung interessanten Tiefengrundwässer wurden mit total 5 Bohrungen überprüft, wobei sich wesentliche und aufschlussreiche Abweichungen von den bisherigen Vorstellungen ergaben. Pumpversuche, Untersuchung von Chemismus und Temperatur der Wässer sowie geophysikalische Bohrlochmessungen lieferten konkrete Auskünfte über die lokalen geothermischen Gradienten und über allfällige Möglichkeiten zu Ausbeutung. Mit geochemischen Methoden versuchte man auf die Wege des Wassers zurückzuschliessen, während Isotopenbestimmungen Beweise für ein hohes Alter der Thermalwässer lieferten (>20 000 Jahre!).

Die erarbeiteten Daten erlaubten Modellrechnungen zur Abschätzung des geothermischen Potentials im untersuchten Gebiet, gleichzeitig wurden verschiedene Nutzungsmöglichkeiten überprüft, so z. B. die Heizung des

Bäderquartiers von Baden durch Nutzung von Thermalwasser. Es wird auch ein Konzept für eine Produktionsbohrung vorgestellt.

Im vorliegenden Werk wurden nicht nur zahlreiche neue geophysikalische, geochemische und geothermische Daten diskutiert, sondern es wird konkret auf eine der Möglichkeiten der Alternativenergien eingegangen. Dabei werden neben wissenschaftlichen Aspekten auch wirtschaftliche behandelt, nicht vergessen wurden aber auch mögliche Auswirkungen auf die Thermalbäder oder generell auf die Umwelt sowie juristische Aspekte des Problems.

Die Schweizerische Geotechnische Kommission freut sich, diese interessante Arbeit in ihre Reihe «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie» aufnehmen zu können, und dankt allen Autoren und ihren Mitarbeitern für ihre wertvolle Arbeit.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Autoren alleine verantwortlich.

Zürich, Januar 1988

Der Präsident der Schweizerischen
Geotechnischen Kommission
C. Schindler

I. Zusammenfassung

II. Résumé

III. Abstract

1. Einführung

- 1.1 Verdankungen
- 1.2 Liste der technischen Spezialberichte

2. Regionale Geologie und Hydrogeologie

- 2.1 Tektonik
- 2.2 Stratigraphie
- 2.3 Hydrogeologische Verhältnisse

3. Lokale Geologie und Hydrogeologie

- 3.1 Region Schinznach
- 3.2 Region Hausen
- 3.3 Region Birnenstorf
- 3.4 Region Baden

4. Geo- und isotochenchemische Charakterisierung der tiefen Thermalwässer

- 4.1 Einleitung
- 4.2 Chemisch-physikalische Eigenschaften der Thermalwässer
- 4.3 Abschätzung des Alters der Thermalwasserkomponenten
- 4.4 Infiltrationszonen
- 4.5 Temperaturen in den tiefen Thermalwasserleitern
- 4.6 Edelgase

5. Oberflächengeophysik

- 5.1 Reflexionsseismik
 - 5.1.1 Region Schinznach
 - 5.1.2 Region Hausen
- 5.2 Refraktionsseismik
 - 5.2.1 Region Schinznach
 - 5.2.2 Region Hausen
 - 5.2.3 Region Birnenstorf
- 5.3 Gravimetrische Untersuchungen
 - 5.3.1 Region Birnenstorf
 - 5.3.2 Region Baden
- 5.4 Geoelektrische und elektromagnetische Methoden
 - 5.4.1 Geoelektrische Methoden
 - 5.4.2 Die elektromagnetische VLF-Methode
 - 5.4.2.1 Region Hausen

6. Bohrungen, Pumpversuche und Bohrlochgeophysik

- 6.1 Einleitung
- 6.2 Die Bohrung S2 (Schinznach Bad)
 - 6.2.1 Geologische Aufnahme
 - 6.2.2 Pumpversuche
 - 6.2.3 Bohrlochgeophysik
- 6.3 Die Bohrung HH1 (Hausen)
 - 6.3.1 Geologische Aufnahme
 - 6.3.2 Pumpversuche
 - 6.3.3 Bohrlochgeophysik
- 6.4 Die Bohrung BT2 (Mülligen)
 - 6.4.1 Geologische Aufnahme
 - 6.4.2 Pumpversuche
 - 6.4.3 Bohrlochgeophysik
- 6.5 Die Bohrung BT3 (Birnenstorf)
 - 6.5.1 Geologische Aufnahme
 - 6.5.2 Pumpversuche
 - 6.5.3 Bohrlochgeophysik
- 6.6 Die Bohrung BT4 (Birnenstorf)
 - 6.6.1 Geologische Aufnahme
 - 6.6.2 Pumpversuche
 - 6.6.3 Bohrlochgeophysik

7. Temperaturgradient und Wärmefluss

- 7.1 Datengrundlage
- 7.2 Die Verteilung des geothermischen Gradienten
- 7.3 Der Wärmefluss an der Erdoberfläche
- 7.4 Das lokale, oberflächennahe Temperaturfeld
 - 7.4.1 Die Region Schinznach – Hausen – Birnenstorf
 - 7.4.2 Die Region Baden – Ennetbaden

8. Thermohydraulische Modellrechnungen

- 8.1 Zweidimensionale numerische Modellrechnungen
- 8.2 Dreidimensionale numerische Modellrechnungen
- 8.3 Weitere Modellrechnungen

9. Nutzungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeitsanalyse

- 9.1 Nutzung der neuen Produktionsbohrung in Schinznach Bad
- 9.2 Wärmenutzung der beiden vorhandenen mitteltiefen Explorationsbohrungen HH1 in Hausen und BT4 in Birnenstorf

9.3 Wärmenutzung einer eventuellen Produktionsbohrung im Bäderquartier von Baden

10. Analyse der Umweltaspekte

10.1 Chemische Klassifizierung

10.2 Kriterien für die Beurteilung von Thermalwassereinleitungen in Oberflächengewässer

10.3 Grundwasserschutz bei der Reinjektion genutzter Thermalwässer

10.4 Abwärmeproblem, Luftschadstoffe und Geruchsimmissionen

10.5 Betonaggressivität und chemische Ausfällungen

11. Das juristische Vorgehen bei der Prospektierung und Nutzung von Heilquellen und Thermalwässer

11.1 Die Rechtsmittel für die Durchsetzung der notwendigen Bewilligungen

11.2 Beurteilung der Durchsetzbarkeit der notwendigen Bewilligungen

12. Optimierung des Standortes für die Erstellung einer Pilotanlage

12.1 Einleitung

12.2 Abschätzung des geothermischen Potentials

12.3 Optimierungskriterien

12.3.1 Region Hausen

12.3.2 Region Birmenstorf

12.3.3 Region Baden

12.4 Standortempfehlung für die Erstellung einer Pilotbohrung in Baden

13. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Literaturverzeichnis

VERZEICHNIS DER FIGUREN

- Fig. 2.1 Überblick über die wichtigsten tektonischen Einheiten im weiteren Untersuchungsbereich
- Fig. 2.2 Oberflächenaufschlüsse von Oberem Muschelkalk (inkl. Lettenkohle) im Tafel- und Faltenjura
- Fig. 2.3 Stratigraphisches Sammelprofil mit Angaben über die zu erwartenden Durchlässigkeiten
- Fig. 2.4 Schematische Darstellung von lokalen, intermediären und regionalen Systemen von Grundwasserströmungen
- Fig. 3.1 Geologisches Profil Habsburg – Schinznach Bad – Möriken
- Fig. 3.2 Geologisches Profil senkrecht zur Jura-Hauptüberschiebung zwischen Hausen und Birmenstorf
- Fig. 3.3 Geologisches Profil durch die Lägern-Antiklinale in Baden und Ennetbaden
- Fig. 4.1 Beziehung zwischen der Konzentration an radiogenem Helium und C-14 in den »alten« Thermalwasserkomponenten
- Fig. 5.1 Strukturkarte des Daches des Oberen Muschelkalks, ermittelt durch reflexionsseismische Messungen
- Fig. 5.2 Geologische Interpretation der geoelektrischen und reflexionsseismischen Untersuchungen entlang eines N-S-Profiles in Bad Schinznach
- Fig. 5.3 Lage der Quartärmulde im Gebiet Habsburg – Hausen, ermittelt durch geophysikalische Messungen
- Fig. 5.4 Stratigraphische und strukturelle Verhältnisse im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung in Hausen, ermittelt durch reflexionsseismische Untersuchungen
- Fig. 5.5 Lage von Störungen an der Felsoberfläche im Gebiet Hausen, ermittelt aufgrund von Aufschlüssen und reflexionsseismischen Untersuchungen
- Fig. 5.6 Refraktionsseismische Interpretation der Profile HA1 und HA2 im Gebiet Hausen
- Fig. 5.7 Lage des gravimetrischen Messprofils nördlich von Birmenstorf
- Fig. 5.8 Interpretation der gravimetrischen Untersuchungen im Gebiet Birmenstorf
- Fig. 5.9 Geophysikalische Untersuchungen in der Region Baden: Lage der Untersuchungsprofile
- Fig. 5.10 Interpretation der gravimetrischen Untersuchungen im Gebiet Baden
- Fig. 5.11 Richtung und Frequenz der in der Schweiz empfangbaren VLF-Stationen
- Fig. 5.12 Betrag und Richtung der scheinbaren geoelektrischen Gesteinswiderstände, ermittelt durch VLF-Messungen im Gebiet Hausen
- Fig. 5.13 Vergleich der aus den VLF-Messungen ermittelten Störungsrichtungen im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung mit den tektonischen Elementen aus der Reflexionsseismik im Gebiet Hausen
- Fig. 6.1 Bohrung S2 (Schinznach): Geologisches Profil und Bohrlochgeophysik
- Fig. 6.2 Temperaturverlauf in der Bohrung Schinznach S2
- Fig. 6.3 Bohrung HH1 (Hausen): Geologisches Profil und Bohrlochgeophysik
- Fig. 6.4 Beziehungen zwischen Fördermenge bzw. Förderzeit und Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, Gehalt an Tritium sowie thermischer Leistung in der Bohrung Hausen HH1
- Fig. 6.5 Beziehungen zwischen Förderzeit und Ionenkonzentrationen in der Bohrung Hausen HH1
- Fig. 6.6 Temperaturverlauf in der Bohrung Hausen HH1
- Fig. 6.7 Bohrung BT2 (Mülligen): Geologisches Profil und Bohrlochgeophysik
- Fig. 6.8 Temperaturverlauf in der Bohrung Mülligen BT2
- Fig. 6.9 Bohrung BT3 (Birmenstorf): Geologisches Profil und Bohrlochgeophysik
- Fig. 6.10 Temperaturverlauf in der Bohrung Birmenstorf BT3
- Fig. 6.11 Bohrung BT4 (Birmenstorf): Geologisches Profil und Bohrlochgeophysik
- Fig. 6.12 Beziehungen zwischen Fördermenge bzw. Förderzeit und Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, Gehalt an Tritium sowie thermischer Leistung in der Bohrung Birmenstorf BT4
- Fig. 6.13 Korrelation zwischen Gehalt an Tritium und Temperatur bzw. elektrischer Leitfähigkeit in der Bohrung Birmenstorf BT4
- Fig. 6.14 Fernsichtaufnahme einer Kluft im Trochitenkalk aus 195,10 m Tiefe in der Bohrung Birmenstorf BT4
- Fig. 6.15 Temperaturverlauf in der Bohrung Birmenstorf BT4
- Fig. 7.1 Karte des geothermischen Gradienten im Gebiet der zentralen Nordschweiz (in °C/km)
- Fig. 7.2 Karte des Oberflächenwärmeflusses im Gebiet der zentralen Nordschweiz (in mW/m²)
- Fig. 7.3 Oberflächennaher Temperaturverlauf in den Bohrungen zwischen Schinznach und Birmenstorf
- Fig. 7.4 Temperaturverlauf in ausgewählten Bohrungen in Ennetbaden
- Fig. 7.5 Temperaturprofile durch Ennetbaden
- Fig. 10.1 Konzentration der hauptsächlichen Kationen

und Anionen sowie von SiO_2 in Thermalwässer im weiteren Untersuchungsgebiet

Fig. 10.2 Konzentrationen kritischer Inhaltsstoffe der untersuchten Thermalwässer für die Einleitung in einen Vorfluter

Fig. 10.3 Zunahme des Salzgehaltes in der Limmat in Abhängigkeit der Thermalwasser-Einleitmenge

Fig. 12.1 Vorschlag für einen Standort für eine Pilotbohrung in der Nähe des Bäderquartiers in Baden

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- Tab. 2.1 Zusammenstellung der hydraulischen Leitfähigkeiten der geothermisch wichtigsten Aquifere im Untersuchungsgebiet
- Tab. 4.1 Darstellung der wichtigsten physikalisch-chemischen Eigenschaften der untersuchten Thermalwässer
- Tab. 4.2 Liste der analysierten Isotope sowie Altersbestimmungen der thermalen Tiefenkomponente
- Tab. 4.3 Gemessene Thermalwassertemperatur am Quellaustritt sowie die mit Hilfe der »Geothermometer« errechnete und extrapolierte Temperatur der tiefen Thermalwasserkomponente (in °C)
- Tab. 4.4 Liste der Edelgaskonzentrationen
- Tab. 4.5 Isotopenverhältnisse der Edelgase
- Tab. 6.1 Bohrlochdaten der fünf NEFF-Bohrungen
- Tab. 6.2 Zusammenstellung der durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen in den mitteltiefen Bohrungen zwischen Schinznach und Birmenstorf
- Tab. 6.3 Ergebnisse der Pumpversuche in der Bohrung Schinznach S2 und die daraus berechneten hydraulischen Werte
- Tab. 6.4 Lithologische Interpretation des natürlichen Gamma-Logs der Bohrung Hausen HH1
- Tab. 6.5 Bestimmung der totalen Porosität mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Bohrung Hausen HH1
- Tab. 6.6 Ergebnisse des Pumpversuchs in der Bohrung Mülligen BT2 und die daraus berechneten hydraulischen Werte
- Tab. 6.7 Ergebnisse der Pumpversuche in der Bohrung Birmenstorf BT3 und die daraus berechneten hydraulischen Werte
- Tab. 6.8 Bestimmung der totalen Porosität mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Bohrung Birmenstorf BT4
- Tab. 7.1 Gradient und Wärmefluss in einigen ausgewählten Bohrungen
- Tab. 8.1 Darstellung der für die Modellrechnungen verwendeten Durchlässigkeiten im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung
- Tab. 10.1 Charakterisierung der untersuchten Thermalwässer aufgrund der Ionendominanz
- Tab. 10.2 Mittlere TDS-, Sulfat- und Chloridgehalte der Thermalwässer des Projektgebietes
- Tab. 10.3 Natürliche TDS-, Sulfat- und Chloridkonzentrationen in der Limmat, Reuss, Aare und des Rheins
- Tab. 12.1 Geothermische Potentiale der einzelnen Untersuchungsgebiete

I. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Studie stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den beiden geothermischen Forschungsprojekten des NEFF (= Nationaler Energie-Forschungs-Fonds) «Geothermische Prospektion im Raume Koblenz – Wildegg – Dielsdorf» (NEFF 1980) sowie «Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung» (NEFF 1984) dar.

Im Projektgebiet bieten sich – vom Liegenden ins Hangende – die teilweise *geklüftete Oberkante des kristallinen Grundgebirges*, der *Buntsandstein* sowie der *Obere Muschelkalk* als potentielle Thermalwasserträger an. Wegen der geringeren und daher ökonomisch leicht nutzbaren Tiefe wurde besonders der letztgenannte Aquifer im Detail untersucht.

Mittels *geophysikalischer Explorationsmethoden*, bestehend aus reflexions- und refraktionsseismischen Untersuchungen, gravimetrischen Messungen sowie geoelektrischen und elektromagnetischen Methoden konnte der geologische Untergrund an den geothermisch interessantesten Standorten Schinznach, Hausen, Birnenstorf und Baden näher erforscht werden. Im folgenden wurden die *fünf mitteltiefen Probebohrungen* Schinznach S2 [135,7 m], Hausen HH1 [408 m], Mülligen BT2 [74 m], Birnenstorf BT3 [72,0 m] und BT4 [241 m] mit dem Ziel abgeteuft, den Oberen Muschelkalk als potentiellen Thermalwasser-Aquifer im Hangenden der Jura-Hauptüberschiebung an- bzw. durchzubohren (leider war die Realisierung einer geplanten Versuchsbohrung im Gebiet Baden aus regionalpolitischen Gründen nicht möglich). Die in diesen fünf Bohrungen durchgeführten *Pumpversuche* lieferten, je nach lokalem Zerklüftungsgrad des Oberen Muschelkalkes, die folgenden hydraulischen Parameter:

Transmissivität

$$T = 6,8 \times 10^{-3} - 7,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Durchlässigkeit

$$K = 4,8 \times 10^{-4} - 5,7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

Spezifische Ergiebigkeit

$$Q/s = 7,4 \times 10^{-3} - 2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

[wobei Q = Ergiebigkeit bei einer Absenkung s]

Die Bohrung Schinznach S2 lieferte bis zu 400 l/min. Thermalwasser bei einer Temperatur von ca. 37°C, die Bohrung Hausen (HH1) 120 l/min. bei einer Temperatur von ca. 30°C, und die Bohrung Birnenstorf BT4 bis zu 800 l/min. Thermalwasser bei einer Temperatur von ca. 25°C.

Die in den fünf Bohrungen durchgeführten *geophysikalischen Bohrlochmessungen* lieferten wichtige Daten über die Porositätsverhältnisse, der genauen Lage der Thermalwasser-Produktionshorizonte sowie die Temperaturgradienten, die Werte bis zu 100°C/km in der Bohrung Schinznach S2 erreichten. Generell zeigten die *Temperaturmes-*

sungen in den Bohrungen lokal sehr unterschiedliche geothermische Gradienten. Dies kann als Folge der nur eng begrenzten Wasseraufstiegswege entlang von Kluftzonen interpretiert werden. Weiter war es möglich, mittels Temperaturmessungen in 15 Flachbohrungen in Ennetbaden (d. h. östlich von Baden) die Existenz von Thermalwasser parallel zur Hauptüberschiebung weiter nach E zu verfolgen, wobei als Maximaltemperatur 45,7°C auf Kote 340 m gemessen wurde.

Mittels *geochemischer Methoden* bzw. *Isotopenbestimmungen*, die in dieser Art erstmalig in der Schweiz durchgeführt wurden, konnten völlig neue Erkenntnisse bezüglich des *Alters der Thermalwässer* erhalten werden. Für die Thermalquellen von Baden, Schinznach, Zurzach, Säkingen und Lottstetten kommen demnach *Alterswerte in der Grössenordnung* von mindestens 20000 Jahren in Betracht. Die *«Verweildauer»* des Thermalwassers im tiefen Untergrund ist also beträchtlich länger als bis heute angenommen und muss in zukünftigen Untersuchungen als *wichtiger Parameter berücksichtigt* werden. Es gelang jedoch nicht, mittels des bis heute zur Verfügung stehenden geochemischen Datenmaterials das eigentliche Einzugsgebiet bzw. die Infiltrationszone der Thermalwässer genau zu lokalisieren.

Gestützt auf *«chemische Geothermometer»* konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass nur in den Thermalzonen um Schinznach und Baden Reservoirtemperaturen über 50°C zu erwarten sind.

Mit Hilfe von *thermohydraulischen Modellrechnungen* (Finite Elemente) wurden geothermische Potentialabschätzungen ausgeführt bzw. verschiedene Szenarien von Thermalwasserförderungen durchgerechnet. Für den Standort Baden ergab sich dabei eine natürlich regenerierbare, geothermische Leistung von ca. 3,2 MW_{th}, was ca. der doppelten thermischen Leistung der bekannten Thermalquellen von Baden entspricht. Eine bedeutend grössere Wärmemenge könnte aber gewonnen werden, wenn durch die Nutzung das Gestein selbst abgekühlt wird (sog. «Wärmining»). Für das gesamte Gebiet von Hausen bis Baden würde dann die so extrahierbare thermische Leistung ca. 20 MW_{th} betragen.

Zwecks Abschätzung der *geothermischen Nutzungsmöglichkeiten* der beiden Explorationsbohrungen in Hausen und in Birnenstorf wurden verschiedene Varianten der Wärmeversorgung für Heizzwecke von Gewächshäusern und Gebäuden mittels Wärmepumpen untersucht.

Bei allen Varianten hat es sich gezeigt, dass trotz vorhandener Bohrungen die spezifischen Gestehungskosten einer Fernwärmeversorgung mit Thermalwasser höher liegen als diejenige einer konventionellen Wärmeversorgung mittels Heizöl. Die Energiekosten (Preisstand 1984) lie-

gen zwar bei der Wärmeversorgung mit Thermalwasser tiefer als diejenigen mittels Heizöl, reichen jedoch nicht aus, um die höheren Kapitalkosten auszugleichen.

Im *Bäderquartier Baden* wäre aber eine Nutzung des Thermalwassers für Heizzwecke durchaus wirtschaftlich und es könnten jährlich dadurch ca. 840 t Heizöl eingespart werden.

Im Falle der neuen Produktionsbohrung in Schinznach liegen die Einsparungen an Primärenergie nach Aufgabe der «alten» Thermalquelle – je nach Heizölkosten – jährlich bei über 50000 Fr.

Eine Analyse der *möglichen Auswirkungen* einer Nutzung des Thermalwassers auf die *Umwelt* ergab, dass die genutzten Thermalwässer nur noch eine geringe Restwärme aufweisen würden, die mengenmässig kaum ins Gewicht fällt, so dass die thermischen Grenzwerte der Verordnung über Abwassereinleitungen mit Sicherheit nicht tangiert werden. Mit wenigen Ausnahmen der Arsen- und Fluoridgehalte an zwei Standorten genügen die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe den Gewässerschutzbedingungen (eine selektive Reduktion dieser beiden Bestandteile auf Spurengehalte ist jedoch mittels aktiviertem Aluminiumoxid problemlos durchführbar).

Vom *juristischen Standpunkt* ist es wichtig festzuhalten, dass für die Bestimmung der Haftung bei einer möglichen Beeinträchtigung von Heilquellen durch die Ausführung einer Pilotbohrung – trotz des «Dekretes über die Sicherung der öffentlichen Heilquellen und das Graben von solchen in Baden und Ennetbaden» vom 12. Januar 1869 – ausschliesslich die allgemeinen Bestimmungen des Zivilgesetzbuches über den Quellenschutz zur Anwendung kommen (zum Beispiel betreffs Schadenersatzpflicht, Wiederherstellung des früheren Zustandes, Realersatz etc.).

Nachdem anhand der Wirtschaftlichkeitsanalysen nachgewiesen werden konnte, dass eine Nutzung der geothermischen Ressourcen für Raumheizungen (Hotels, öffentliche Gebäude etc.) nur im engeren Raum Baden rentabel wäre, erfolgte die *Bestimmung des optimalen Standortes für die Errichtung einer Produktionsbohrung* inklusive einer Pilotanlage im Kurpark von Baden. Unter Berücksichtigung einer Bohrtiefe von ca. 250 m und einer maximal abgesicherten Bohr- und Fördertechnik ergaben sich Gesamtkosten von *Fr. 1,4 Mio.* Im Laufe der Untersuchungen für das Abteufen einer solchen Produktionsbohrung im Bäderquartier (d. i. Kurpark) Baden konnte immer wieder festgestellt werden, dass bei der Realisierung eines solchen Projektes ein starkes Interesse bzw. eine gute Kooperationsbereitschaft aller daran beteiligten Körperschaften wie kantonaler Behörden, Gemeinden und Quellenbesitzer Grundvoraussetzungen wären.

Abschliessend sei darauf hingewiesen, dass vorgängig einer zukünftigen geothermischen Exploration im *weiteren Bereich* des Untersuchungsgebietes eine sorgfältige Zusammenstellung und Auswertung aller geothermischen Daten von den Nagra-Tiefbohrungen erfolgen sollte. Das gilt im besonderen für das geochemische Datenmaterial, um mit Hilfe von detaillierten Analysen der Isotopen die Wiederanreicherung bzw. Erneuerung (= «Recharge-Mechanismus») der Thermalwässer sowie deren tiefe, regionale Zirkulationsbahnen besser in den Griff zu bekommen. In diesem Zusammenhang wären auch, während der Wintermonate, *thermographische Messungen* von Flüssen, kombiniert mit Eichmessungen zwecks Erkennung von Warmwasseraufstössen sehr empfehlenswert.

II. RÉSUMÉ

Cette étude représente en aperçu des résultats de deux projets de recherche du NEFF (Nationaler Energie-Forschungs-Fonds) dans la zone de Koblenz - Wildegg - Dielsdorf et de Baden (NEFF 1980 et NEFF 1984).

Dans la région de Baden, les aquifères thermaux potentiels sont les suivants (stratigraphiquement, de bas en haut): *la partie sommitale et diaclasée du soubassement cristallin*, le *Buntsandstein* et le *Muschelkalk supérieur*.

Ce dernier aquifère a été étudié plus en détail à cause de sa profondeur relativement faible et par conséquent de la possibilité de l'exploiter économiquement.

Des *méthodes intégrées de géophysique* ont été appliquées: sismique de réflexion et de réfraction, gravimétrie, méthodes électrique et électromagnétique. Ces méthodes ont été employées dans les localités de Schinznach, Hausen, Birmenstorf et Baden pour mieux connaître la *géologie profonde* des endroits présentant un intérêt géothermique.

Cinq forages d'essai de profondeur moyenne ont été effectués: Schinznach S2 (135,7 m), Hausen 441 (408 m), Mülligen BT2 (74 m), Birmenstorf DTJ (72 m) et BT4 (241 m). Le but de ces sondages était d'atteindre le *Muschelkalk supérieur* considéré comme un aquifère potentiel important au-dessus de la *Hauptüberschiebung* du Jura. Malheureusement, la réalisation d'un forage prévu dans la région de Baden n'a pas été possible pour des raisons de politique régionale.

Des *essais de pompage* dans ces cinq forages ont permis de définir les paramètres hydrologiques suivants du *Muschelkalk supérieur*, selon le degré de fracturation.

Transmissivité

$$T = 6,8 \times 10^{-3} - 7,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Perméabilité

$$K = 4,8 \times 10^{-4} - 5,7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

Débit spécifique

$$Q/s = 7,4 \times 10^{-3} - 2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Le forage de Schinznach S2 a fourni 400 l/min à la température de l'ordre de 37°C, le forage de Hausen 120 l/min à la température d'environ 30°C et le forage de Birmenstorf jusqu'à 800 l/min à une température d'environ 25°C.

Les *mesures géophysiques* effectuées dans ces forages ont fourni des données importantes concernant la porosité, la position exacte des horizons productifs de l'eau thermique, ainsi que les gradients de température qui ont atteint des valeurs jusqu'à 100°C par kilomètre dans le forage de Schinznach S2.

D'une façon générale, les *mesures de température* dans les forages ont mis en évidence des gradients géothermiques très différents. Ces variations peuvent être interprétées comme la conséquence de la montée limitée de l'eau le

long des zones de diaclases. En particulier, des mesures de température dans quinze forages peu profonds à Ennetbaden, à l'est de Baden, ont permis de suivre l'existence d'une zone d'eau thermique parallèle à la *Hauptüberschiebung* vers l'est. Une température maximum de 45,7°C a été mesurée à la cote 340 m.

Des *méthodes géochimiques et isotopiques modernes*, en partie appliquées pour la première fois en Suisse, ont rendu possible l'acquisition de connaissances tout à fait nouvelles au sujet de l'âge des eaux thermales.

L'ordre de grandeur des âges est d'au moins 20 000 ans pour l'eau des sources thermales de Baden, Schinznach, Zurzach, Säkingen et Lottstetten. La *permanence de l'eau thermique* dans le sous-sol est donc considérablement plus longue que celle admise jusqu'à présent et *doit être prise en compte comme un paramètre important* dans des études ultérieures.

Il n'a pas été possible de définir avec précision la zone d'infiltration des eaux thermales avec les données géochimiques disponibles sur la base des *géothermomètres chimiques*. Par contre on a pu démontrer que les températures de réservoir au-dessus de 50°C sont à prévoir dans les eaux thermales de Baden et Schinznach.

A l'aide de *modélisation thermohydraulique* (éléments finis), plusieurs évaluations du potentiel thermique ont été effectuées par le calcul de plusieurs scénarios de production d'eau thermique. Dans le cas de Baden on a calculé ainsi un rendement géothermique qui se régénère naturellement, et qui correspond au double du rendement des sources thermales de Baden connues. Pour la région entre Hausen et Baden, le rendement thermique exploitable serait d'environ 20 megawatt.

Dans le cas des deux forages d'exploitation de Hausen et Birmenstorf, plusieurs *possibilités d'utilisation géothermique* ont été envisagées pour le chauffage des serres et des bâtiments. Toutes les variantes examinées ont indiqué que malgré des forages déjà disponibles, les coûts spécifiques d'un chauffage à distance avec l'eau thermique sont supérieurs à ceux d'un approvisionnement en chaleur par le mazout, à cause, surtout, des investissements importants nécessaires pendant la phase de la prospection. Dans le *quartier des bains de Baden*, une utilisation de l'eau thermique pour le chauffage serait tout à fait rentable et une économie de 840 t de mazout par an pourrait être réalisée. Les économies d'énergie du nouveau forage de production de Schinznach effectué pendant le premier projet NEFF, ont été estimées à environ Fr. 50 000 par an.

Une analyse des *effets possibles* de l'utilisation d'eau thermique résiduelle sur *l'environnement* a permis d'établir que les eaux thermales usées ne gardent qu'une chaleur mi-

nime, de sorte que les limites thermiques de l'ordonnance fédérale sur les eaux usées ne seraient pas dépassées.

A de rares exceptions près, les teneurs en arsenic et fluorure sont conformes aux ordonnances de protection de l'eau. Une réduction sélective de ces éléments en trace est d'ailleurs facilement réalisable avec de l'oxyde d'aluminium activé.

Du *point de vue juridique*, il est important de constater que pour l'établissement de la responsabilité des dommages éventuels par l'exécution d'un forage pilote, les décisions du Code civil sur la protection des sources est exclusivement applicable, malgré l'ordonnance du 12 janvier 1869 sur les sources publiques de Baden et Ennetbaden.

Les analyses économiques ont prouvé que l'utilisation des ressources géothermiques pour le chauffage d'immeubles, hôtels, bâtiments publics dans la proximité immédiate de Baden peut être rentable. *L'emplacement optimal pour un forage de production* et une usine pilote se situe dans le

Kurpark de Baden. Avec une profondeur de forage d'environ 250 m et des méthodes de forage et d'exploitation appropriées, on estime le coût total à *1,4 million de francs*. Il ne faut pas perdre de vue que la réalisation d'un projet de forage de production dans le quartier des bains de Baden présuppose un intérêt soutenu des autorités cantonales et communales ainsi que des propriétaires des sources. En conclusion, il faut remarquer qu'avant de continuer l'exploration thermique dans un *domaine plus vaste* que celui de la zone étudiée, il faudrait réunir et évaluer avec soin toutes les données des sondages profonds de la Cedra. En effet, seule une interprétation détaillée des données géochimiques et isotopiques de la Cedra permettra de mieux saisir les mécanismes régionaux de recharge et de circulation profonde. Dans ce contexte, les *mesures thermographiques* des rivières sont à conseiller pour mieux déterminer d'éventuelles venues d'eau thermique.

III. ABSTRACT

This study presents a summary of the results from two geothermal research projects carried out under the auspices of NEFF (Nationaler Energie-Forschungs-Fonds), the Swiss National Energy Research Foundation: "Geothermic Prospection in the Koblenz - Wildeggen - Diesdorf Region" (NEFF 1980) and "Utilization of Geothermal Energy in the Region of Baden and Surroundings" (NEFF 1984).

In region covered by these two studies, the potential aquifers of thermal water are - from lowest to highest - the fractured uppermost zone of the crystalline basement, the Buntsandstein (Lower Triassic Sandstones), and the Upper Muschelkalk (Middle Triassic Limestones). Due to its shallower depth - and therefore economically more favorable position - the latter aquifer was selected for an especially detailed investigation.

Using geophysical exploration methods comprising reflection and refraction seismics, gravimetric measurements, and geoelectric and electromagnetic methods, the geological subsurface in the geothermally promising areas of Schinznach, Hausen, Birnenstorf and Baden (all in NE Switzerland) were investigated. Consequently, five middle-depth test boreholes Schinznach S2 (drilled to a depth of 135,7 m), Hausen HH1 (408,0 m), Mülligen BT2 (74,0 m), Birnenstorf BT3 (72,0 m) and BT4 (241,0 m) were sunk with the aim of drilling to or through the Upper Muschelkalk as a potential thermal water aquifer in the main Jura overthrust (unfortunately the realization of the planned test borehole in the Baden region was not possible due to reasons of local politics). The pump tests in these five boreholes yielded the following hydraulic parameters which varied according to the degree of local fracturing in the Upper Muschelkalk:

Transmissivity

$$T = 6,8 \times 10^{-3} - 7,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Permeability

$$K = 4,8 \times 10^{-4} - 5,7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

Specific capacity

$$Q/s = 7,4 \times 10^{-3} - 2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

(where Q = productivity at draw-down s)

The borehole Schinznach S2 yielded an output of 400 l/min. thermal water at a temperature of ca. 37°C, the borehole Hausen HH1 120 l/min. at a temperature of 30°C, and the borehole Birnenstorf BT4 up to 800 l/min. at a temperature of ca. 25°C.

Geophysical borehole measurements in the five drill sites yielded valuable data on the porosity, the exact position of the thermal water production horizon, and the temperature gradient (which reached 100°C/km in the Schinznach S2 borehole). In general, the temperature measurements

exhibited large local variations in geothermal gradients. This result can be interpreted as a consequence of upwelling water flows through very narrow, and locally varying, fracture zones. By means of temperature measurements in 15 shallow boreholes in Ennetbaden (E of Baden) it was also possible to trace further to the east thermal water existing parallel to the main Jura overthrust where a maximum temperature of 45°C at elevation 340 m above sea level was measured.

Using geochemical methods including isotope analyses, carried out in this way for the first time in Switzerland, completely new insights into the age of the thermal aquifers were achieved. The results of this method demonstrate that ages on the order of at least 20,000 years are probable for the thermal spring waters of Baden, Schinznach, Zurzach, Säkingen and Lottstetten. The "residence time" of the thermal waters at depth is considerably longer than previously assumed and this important parameter must be taken into consideration to characterize aquifers in future research. It was, however, not possible with the geochemical data available at present to localize the infiltration zones or the actual catchment area.

Furthermore, on the basis of the "chemical geothermometer" it could be shown that reservoir temperatures of over 50°C are to be expected only in the thermal zones around Schinznach and Baden.

With the help of thermohydraulic model calculations (using finite element methods), appraisals of geothermal potentials or various scenarios for thermal water production were calculated. For the locality of Baden these calculations yielded a naturally renewable geothermal output of ca. 3,2 MW_{th} which is approximately twice the productivity of Baden's well-known thermal springs. A significantly larger amount of heat could be won if the rocks themselves were cooled ("heat mining"). The thermal power extracted would then amount to 20 MW_{th} for the total area from Hausen to Baden.

For the purpose of estimating the possible geothermal application of the two exploration boreholes in Hausen and Birnenstorf, several scenarios were investigated for supplying heat to warm greenhouses and buildings by means of heat pumps.

In all the scenarios it turned out that in spite of the existing boreholes, the specific production costs of district heating with thermal water are higher than those of conventional oil heating. The energy costs to supply heat with thermal water is in fact lower than that of oil heating (oil price level 1984); however, it is not sufficiently low to balance out the higher capital costs.

In the bath district in Baden, however, the use of thermal waters for heating purposes would be economically advan-

tageous and could save approximately 840 t in heating oil yearly.

In the case of the new production borehole in Schinznach the saving on primary energy after abandoning the “old” thermal springs – depending on the prevailing heating oil prices – would be over SwF 50000 yearly.

An analysis of *possible effects on the environment* showed that the utilized thermal water would have only slight residual heat and negligible volume as compared with the receiving water course. Thus, it is certain that the tolerated limits in the regulations concerning the introduction of effluents would not be approached. With exception of the fluoride and arsenic content at two sites, the concentrations of solutes and mineral salts satisfy the requirements for the prevention of water pollution (a selective reduction of these two components to trace amount is easily carried out with activated aluminium oxide).

From the *legal standpoint* it is important to keep in mind that – despite the “Decree on the protection of the public health springs and the digging of such in Baden and Ennetbaden” from 12 January 1869 – the general civil code regulations are applied exclusively in the determination of liability in the case of a possible damage to the spa through conducting pilot drilling (for example, as compensation liabilities, restoration of previous conditions, replacement costs, etc.).

After an economic analysis showed that utilization of geothermal resources for space heating (such as in hotels, pub-

lic buildings etc.) would only be profitable in the immediate region of Baden, there followed a *specification of the optimal location for the construction of a production borehole* and a pilot installation in the spa park of Baden. Taking into account a borehole depth of ca. 250 m and a maximally safeguarded drilling and production technology, the total cost would amount to *SwF 1,4 million* (including the pilot plant). Experience gained during the course of investigations for the sinking of such a production borehole in the bath district of Baden showed that the basic prerequisites for realising such a project are the strong interest and cooperation of all participating bodies, including cantonal officials, municipalities, and owners of the springs.

In conclusion it should be pointed out that prior to any future geothermal exploration in the *greater area* around Schinznach Bad – Baden, a careful compilation and evaluation of all the geothermal data from the NAGRA deep drilling should take place. This holds particularly true for the geochemical data. In order that the re-enrichment or renewal (“recharge-mechanism”) of thermal waters and their deep regional circulation paths be better understood, it is necessary to rely on the detailed analyses of isotopes. In this connection, it is highly recommended to make *thermographic measurements* from rivers during the winter months and to combine these with calibration samplings to locate occurrences and possible upwellings of warm water.

1. EINFÜHRUNG

H. L. Gorhan [1]

Im Dezember 1975 machte die Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG im Rahmen der Eidg. Fachkommission für die Nutzung geothermischer Energie und die unterirdische Wärmespeicherung den Vorschlag, die Warmwasserzone zwischen Baden und Olten als potentielles geothermisches Feld näher zu untersuchen. Dabei sollten die folgenden Untersuchungen durchgeführt werden:

- Klassifizierung der zahlreichen Thermalquellen in diesem Gebiet
- Abklärung der Möglichkeiten zur Steigerung der Quellergiebigkeiten und Erhöhung der Wassertemperatur
- Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer eventuellen Wärmenutzung

Die Ergebnisse dieser Studie wurden 1977 unter dem Titel «Geothermische Studie der Warmwasserzone Zurzach – Lostorf – Baden» in der Schriftreihe der Eidg. Kommission für die Gesamtenergiekonzeption (Studie Nr. 14) veröffentlicht.

Als Fortsetzung dieser Studie wurden im ungefähr gleichen Gebiet die Durchführung des folgenden Projektes vom NEFF (= Nationaler Energie-Forschungs-Fonds) finanziert: «Teilprojekt I: Geothermische Prospektion im Raume Koblenz – Wildegg – Dielsdorf» (NEFF-Projekt Nr. 33). Zur Realisierung dieses Forschungsvorhabens haben sich Mitte Dezember 1977 folgende Institutionen, die am Aufbau eines geothermischen Forschungsprogrammes in der Schweiz interessiert waren, zur sogenannten «Arbeitsgemeinschaft Geothermie» zusammengetan.

- Institut für Geophysik, ETH Zürich
- Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden
- Département de minéralogie, Université de Genève
- Institut d'économie et aménagements énergétiques (IENER), EPF Lausanne
- Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel

Der Schlussbericht der vorerwähnten Studie wurde im November 1980 (NEFF 1980) veröffentlicht, wobei aus dem Projektgebiet die folgenden Standorte für detaillierte zukünftige Untersuchungen empfohlen wurden (von Westen nach Osten):

- Hausen
- Birmenstorf
- Baden
- Dielsdorf

Die dafür erforderlichen wissenschaftlichen Arbeiten begannen Anfang 1982 und endeten 1984 mit der Erstellung des Schlussberichtes mit dem Titel «Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung» (NEFF 1984). Die Kosten dieser Untersuchungen wurden ebenfalls in dankenswerter Weise vollumfänglich vom NEFF übernommen (NEFF-Projekt Nr. 165).

Das Hauptziel dieser Studie war die Auswahl des geothermisch günstigsten Gebietes innerhalb der oben erwähnten Standorte* für die Lokalisierung und Errichtung einer zukünftigen Produktionsbohrung bzw. Pilotanlage für eine Nutzung der vorhandenen geothermischen Ressourcen.

Mittels zusätzlicher, auf die schweizerischen Verhältnisse zugeschnittenen Untersuchungstechniken konnte die in den Jahren 1979/1980 (NEFF 1980) erarbeitete geothermische Explorationsmethode weiterentwickelt bzw. verfeinert werden. Dabei erwies sich wieder die gute Zusammenarbeit der aus wissenschaftlichen Instituten und der Privatwirtschaft zusammengesetzten «Arbeitsgemeinschaft Geothermie» als besonders förderlich.

Entsprechend ihrer Spezialisierung wurde von den einzelnen Mitgliedern der Arbeitsgemeinschaft eine Vielzahl von Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt.

Die Untersuchungsergebnisse bzw. die entsprechenden Grunddaten aus den einzelnen Fachgebieten wurden laufend in Form von technischen Spezialberichten festgehalten. In Kapitel 1.2 ist eine Liste dieser Berichte aufgeführt (aus NEFF 1984).

Das Ziel der nun vorliegenden Publikation ist es, dem Leser einen Überblick über die in den beiden NEFF-Studien erarbeiteten geothermischen Grundlagedaten und die dar-

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

* Beim Standort Dielsdorf, d. h. der an einer N-S-Störung abgesackte östliche Ausläufer der Lägern-Hochstruktur (NEFF 1980), liegt die potentielle Warmwasserzone jedoch bereits in Tiefen, die mit den im Projekt vorgesehenen Mitteln nicht erreicht werden konnten.

aus gezogenen Schlussfolgerungen für die Nutzung dieser erneuerbaren Energiequelle zwischen Baden und Schinznach zu geben.

Das Hauptgewicht wurde auf eine systematische und vollständige Zusammenstellung aller erdwissenschaftlichen Ergebnisse gelegt, um diese Resultate auch weiteren interessierten Kreisen zugänglich zu machen.

An der Ausführung des NEFF-Projekts Nr. 165 haben folgende Hauptsachbearbeiter mitgewirkt:

Institut für Geophysik ETH Zürich:	Prof. L. Rybach (Projektkoordinator) Dr. J.-C. Griesser, P. J. Cagienard
Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden:	Dr. H. L. Gorhan (Projektleiter) Dr. J.-P. Tripet, Dr. J. Schneider, Ch. Bélaz, Z. Cicic, M. Obrist, Dr. H. B. Diriwächter, Dr. Chr. Zimmermann, Ch. Sieber
Département de minéralogie, Université de Genève:	Prof. F. C. Jaffé, J.-D. Dubois, J. Flück
Institut d'économie et amé- nagements énergétiques (IENER), EPF Lausanne:	J. D. Favrod, B. Saugy, Y. Lavanchy
Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel:	Prof. A. Burger M. Geister

1.1 Verdankungen

Es ist den Projektpartnern ein Bedürfnis, an dieser Stelle dem NEFF-Projektpaten, Herrn Direktor M. R. Epprecht, für seine stete Unterstützung des vorliegenden Projektes zu danken. Ferner gebührt auch Herrn Prof. C. Schindler (Geologisches Institut, Baugeologie, ETH Zürich) aufrichtiger Dank für seine Kooperationsbereitschaft bei geologischen Beratungen, der Firma Dr. von Moos AG für die Erlaubnis zur Einblicknahme in Bohrprotokolle der Sondierkampagne 1983 in Ennetbaden, Herrn M. Utard von der Compagnie Générale de Géophysique (CGG) für seine stets aktive Mithilfe bei diesem Projekt sowie den Herren Dr. Ch. Sprecher von der NAGRA und Prof. St. Müller von der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission für die Überlassung des reflexionsseismischen Profils 82-NF-30.

Gemeindebehörden und Grundeigentümer der Gemeinden Hausen und Birmenstorf sei für ihre Zustimmung zur Durchführung der Geländearbeiten ebenfalls gedankt.

Besonderer Dank gebührt auch den zuständigen kantonalen Behörden (hier speziell den Herren A. Meier, M. Gloor, A. Erne, Dr. H.-P. Müller, H. Rey und A. Windel) für den Zugang zu geologischen und hydrogeologischen Daten.

Im Zuge von Besuchen bzw. während wertvoller Diskussionen haben die folgenden Personen in dankenswerter Weise zur Vervollständigung der nun vorliegenden Studie beigetragen: Prof. E. Mazor, Prof. J. Gat (Geo-Isotope Group, The Weizmann Institut, Rehovot, Israel); Prof. H. Moser, Dr. W. Rauert, Dr. W. Stichler (Institut für Radiohydrometrie, München, Bundesrepublik Deutschland); Prof. M. Ivanovich (Harwell Low Level Measurements Laboratory, Harwell, England); Prof. H. Oeschger, Dr. U. Siegenthaler, Dr. H. H. Loosli, Dr. W. Balderer (Physikalisches Institut der Universität Bern); Dr. F. D. Vuataz (I. M. R. G., Institut mixte de Recherche Géothermique, Orléans, France); Dr. E. Hoehn (Kaiserstuhl), Dr. U. Münzel (Baden), Dr. Prier (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Bundesrepublik Deutschland); M. R. Molinari (Stadtammann von Rheinfelden).

Bei mehreren interessanten Begegnungen konnten wichtige Informationen von folgenden Bäderbesitzern in Baden bekommen werden: Herrn J. R. Erne, R. Halter, R. Schaerer sowie Frau Dr. C. Matter. Im weiteren konnten wertvolle Erfahrungswerte bezüglich der Wärmenutzung von Thermalwässern für Heizzwecke erhalten werden, und zwar vom Thermal-Badecenter der Bürgergemeinde Leukerbad, vom Thermalbad Zurzach und Verenhof Baden sowie von den Thermalbädern des Grandhotels Bad Ragaz.

Für einige spezifische Aufgaben wurden Unterakkordanten beauftragt, wie:

Bohrarbeiten: Gebr. Meier AG, Brugg
Fehlmann Grundwasserbauten AG,
Liestal

Bohrlochgeophysik: Geotest AG, Zollikofen

Bohrloch-TV: Forces Motrices Neuchâteloises
S. A., Corcelles/NE

Reflexionsseismik: Compagnie Générale de Géophysique, Massy, Paris

Very low frequency
(VLF): Dr. I. Müller, Centre d'Hydrogéologie,
Université de Neuchâtel

Für die Durchführung von diversen Analysen wurden folgende Institutionen beigezogen: Département de chimie minérale analytique et appliquée, Université de Genève: Chemische Analysen; Institut für Radiohydrometrie, München, Bundesrepublik Deutschland: Isotopen-Analysen (T, O¹⁸, D); Harwell Low Level Measurements Laboratory, Harwell, England: Isotopen-Analysen (C¹³, C¹⁴); Geo-Isotope Group, The Weizmann Institut of Science, Rehovot Israel: Analysen von Edelgasen.

1.2 Liste der technischen Spezialberichte

Nachfolgend ist die Liste der internen Spezialberichte aufgeführt, welche im Rahmen des zweiten NEFF-Projektes (NEFF 1984) erstellt wurden. Je ein kompletter Satz dieser

im ganzen 39 internen Berichte befinden sich sowohl in der Landesgeologie, Schweizerischen Geologischen Dokumentationsstelle, Bernerstrasse 28, 3003 Bern, als auch bei der Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Parkstrasse 27, 5401 Baden.

Dok.-Nr.	Titel	Autor*	Datum
NEFF 165 IB 001	Utilisation de la Geothermie la region de Baden: Proposition d'un modele local	UNI Neuenburg	Februar 1982
NEFF 165 IB 002	Commentaires à la carte tectonique d'ensemble du pied sud du jura de Genève à Dielsdorf (ZH)	MC ING	Mai 1982
NEFF 165 IB 003	Wärmetechnische Grundlagen Wärmebedarf im Raum Hausen Zwischenbericht	MC ING	Juli 1982
NEFF 165 IB 004	3 Profils geologiques au 1 : 25 000 et commentaires (données de base pour la geometrie du modele thermo-hydraulique)	MC ING	Juli 1982
NEFF 165 IB 005	Refraktionsseismische Untersuchungen im Raum Hausen – Habsburg	ETH Zürich	Juli 1982
NEFF 165 IB 006	Gravimetrische und refraktionsseismische Untersuchungen im Gebiet Baden	ETH Zürich	August 1982
NEFF 165 IB 007	Zusammenstellung der Temperaturmessungen im Untersuchungsgebiet Raum Baden	ETH Zürich	November 1983
NEFF 165 IB 008	Travaux effectues au Weizmann Institute of Sciences, Rehovot, Israel	UNI Genf	November 1983
NEFF 165 IB 010A	Sismique haute Resolution Hausen – Habsburg; Rapport de mise en oeuvre et d'interpretation	CGG	Mai – Juni 1982
NEFF 165 IB 010B	Reflexionsseismische Messungen im Gebiet von Hausen Interpretation	ETH Zürich	August 1983
NEFF 165 IB 011A	Geophysikalische Bohrlochlogs: Bohrung Hausen	GEOTEST	August 1983
NEFF 165 IB 011B	Geophysikalische Bohrlochlogs: Bohrung Birmenstorf	GEOTEST	April 1983
NEFF 165 IB 012	Interpretation der bohrlochgeophysikalischen Messungen in den Bohrungen Hausen HH1 und Birmenstorf BT4	ETH Zürich	November 1983
NEFF 165 IB 013	Die Felsoberfläche im Gebiet von Hausen-Habsburg aufgrund von oberflächen-geophysikalischen Messungen	ETH Zürich	August 1983
NEFF 165 IB 014	Die Bohrungen in Hausen und Birmenstorf; Untersuchungsprogramm der durchgeführten Bohrlocharbeiten und bohrtechnische Erläuterungen	MC ING	Mai 1983
NEFF 165 IB 015	Bohrgutuntersuchungen und Kernphotographien in den Bohrungen Hausen und Habsburg	MC ING	Juni 1983
NEFF 165 IB 016	Petrophysikalische Daten von Gesteinen der Schweiz	ETH Zürich	April 1983
NEFF 165 IB 017	Bohrung BT4 (Birmenstorf/Bolleren); Temperaturmessungen während des Flow-Meter-Logs	ETH Zürich	Mai 1983
NEFF 165 IB 018	Auswertung der in den Bohrungen Hausen (HH1) und Birmenstorf (BT4) durchgeführten Pumpversuche	MC ING	Juli 1983
NEFF 165 IB 019	Rapport preliminaire sur les thermominerales profondes entre Baden et le Schwarzwald	UNI Genf	Oktober 1983
NEFF 165 IB 020	Modele thermohydraulique tridimensionnel de Baden, Hydrogeologie et reseau de calcul	UNI Neuenburg EPF Lausanne	Juni 1983

* Projektpartner bzw. Unterakkordant

Dok.-Nr.	Titel	Autor*	Datum
NEFF 165 IB 023	Fernsehkontrolle in der Bohrung Birnenstorf am 18. 05. 1983	FMN, MC ING	Juli 1983
NEFF 165 IB 029	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Regionale Geologie	MC ING	März 1984
NEFF 165 IB 030	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Lokale Geologie	MC ING	März 1984
NEFF 165 IB 031	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Temperaturmessungen	ETH Zürich	März 1984
NEFF 165 IB 032	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Geochemie	UNI Genf	Juli 1984
NEFF 165 IB 033	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Geophysikalische Untersuchungen	ETH Zürich	März 1984
NEFF 165 IB 034	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Bohrungen	MC ING	März 1984
NEFF 165 IB 035	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Modele Thermohydraulique	UNI Neuen- burg EPF Lausanne	April 1984
NEFF 165 IB 036	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Nutzungsmöglichkeiten	MC ING	Oktober 1983
NEFF 165 IB 037	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Wirtschaftlichkeit der Nutzung geothermischer Wärme	MC ING	Oktober 1983
NEFF 165 IB 038	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Analyse der Umweltaspekte	MC ING	Dezember 1983
NEFF 165 IB 039	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Juristische Aspekte der geothermischen Nutzung	MC ING	August 1983
NEFF 165 IB 040	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Optimierung des Standorts für die Erstellung einer Pilot- anlage	MC ING	September 1984
NEFF 165 IB 041	Geothermische Vorkommen: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden Literaturverzeichnis	MC ING	September 1984
NEFF 165 IB 051	Ergebnisse der VLF-Messungen im Gebiet Hausen	ETH Zürich UNI Neuen- burg	Juni 1984
NEFF 165 IB 053	Interpretations geochemiques et isotopiques des essais de pompage effectues sur les forages de Hausen (HH1) et Birnenstorf (BT4), Argovie	UNI Genf	Januar 1984
NEFF 165 IB 054	Koordinaten der Bohrungen HH1 und BT4	ETH Zürich	Oktober 1983
NEFF 165 IB 056	Liste der entnommenen Wasserproben von den Bohrun- gen Birnenstorf BT4 und Hausen HH1	MC ING	März 1984

* Projektpartner bzw. Unterakkordant

2. REGIONALE GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE

J. C. Griesser [1, 2]

Das Schwergewicht der geothermischen Felduntersuchungen in den beiden NEFF-Projekten aus den Jahren 1980 und 1984 lag entlang der Jura-Hauptüberschiebung zwischen Baden und Schinznach.

Das Verständnis der geothermischen Vorgänge in dieser Zone verlangt die Kenntnis der regionalen tektonischen und stratigraphischen Verhältnisse zwischen dem Rhein und dem Jura-Südrand. In diesem Kapitel wird deshalb kurz auf die Geologie im weiteren Untersuchungsgebiet eingegangen.

2.1 Tektonik

Im weiteren Untersuchungsbereich treten von Norden nach Süden folgende tektonische Einheiten auf: das Schwarzwaldmassiv, der Tafeljura, der Faltenjura und das Molassebecken (Figur 2.1). Als zusätzliches tektonisches Element ist der vor kurzem im Zuge der Nagra-Sondierarbeiten entdeckte E-W-verlaufende Permokarbondrog zu nennen (NAGRA 1985 a).

Das herzynische Schwarzwaldmassiv bildet als kristallines Grundgebirge die Unterlage der paläozoischen und mesozoischen Sedimente. Die Kristallinoberfläche fällt, ausserhalb des Trogbereiches, mit ca. 3–5° unter das Mesozoikum ein.

Der E-W-verlaufende, ca 10–15 km breite Permokarbondrog konnte durch die reflexionsseismischen Untersuchungen der Nagra in seiner Form und seiner Lage definiert werden. Durch die NAGRA-Bohrungen Weiach (in 989 m Tiefe), Riniken (in 816 m Tiefe) und Kaisten (in 125 m Tiefe) wurden die Permokarbonsedimente auch tatsächlich nachgewiesen.

Im Osten, in der Bohrung Weiach betrug die Permokarbon-Mächtigkeit 1031 m, in Riniken wurden 985 m dieser Sedimentserien angetroffen, wobei der Trog an dieser Stelle aber mindestens 3000 m mächtig sein dürfte. Die Bohrung Kaisten, welche am nördlichen Trogrand liegt, wies noch lediglich 172 m paläozoische Sedimente auf (NAGRA 1985 a). Es wird angenommen, dass der Trog bis an den Bodensee weiterzieht, wo in der Bohrung Dingelsdorf (D) 724 m ebenfalls mächtige paläozoische Sedimente angetroffen wurden.

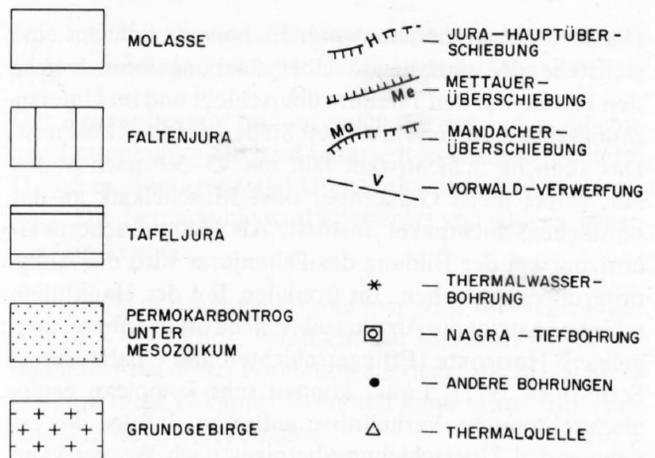
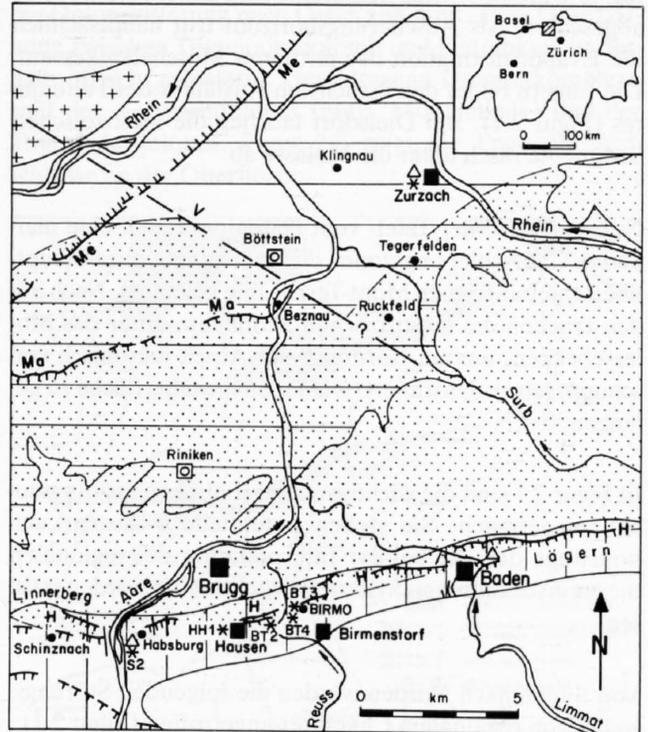


Fig. 2.1: Überblick über die wichtigsten tektonischen Einheiten im weiteren Untersuchungsgebiet (modifiziert nach NEFF 1980)

Im Untersuchungsgebiet dürfte die Lage des Südrandes des Permokarbondroges mit dem Verlauf der Jura-Hauptüberschiebung zusammenfallen; weiter im Westen ist diese Übereinstimmung nicht mehr sicher nachgewiesen. Vor der Entdeckung dieses Troges war Rotliegendes in der Nordschweiz nur durch Explorationsbohrungen für Kohle in den Kantonen Basel-Land und Aargau sowie durch einen Oberflächenaufschluss in der Umgebung von Mumpf nachgewiesen worden.

[1] Institut für Geophysik, ETH Zürich
[2] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

Das Kristallin und das Paläozoikum werden im Norden von den Gesteinsformationen des Tafeljuras überlagert. Es handelt sich dabei um ein mehr oder weniger autochthones Schichtpaket mit Sedimenten von der Trias bis zum Malm. In topographisch höheren Zonen findet man darüber auch Relikte tertiärer Ablagerungen (Eozän, Molasseformationen bis hin zur Oberen Süsswassermolasse).

Südlich anschliessend folgt der östlichste Teil des Faltenjuras. Die mesozoischen Sedimente sind dabei verfaltet und abgeschert. Als Abscherungshorizont tritt hauptsächlich die Evaporitformation des mittleren Muschelkalkes auf. Die Lägern bildet den östlichsten Ausläufer des Faltenjuras (Figur 2.1). Bei Dielsdorf tauchen die mesozoischen Sedimente rasch unter die Molasse ab.

Getrennt wird der Tafel- vom Faltenjura durch eine markante Überschiebungszone, die sogenannte Jura-Hauptüberschiebung (auch Mont-Terri-Linie genannt). Nach Süden tauchen die mesozoischen Sedimente unter das Molassebecken, um am Nordrand der Alpen tektonisch verschuppt (stark deformiert) wieder an die Oberfläche zu gelangen.

In Figur 2.1 sind die wichtigsten tektonischen Störungszonen eingetragen. Sie stellen potentielle Wasserzirkulationswege dar, die bei der Interpretation des regionalen thermohydraulischen Systems berücksichtigt werden müssen.

Von Süden nach Norden werden die folgenden Störungszonen von regionalem Charakter angetroffen (Figur 2.1):

Die Jura-Hauptüberschiebung: Es handelt sich um eine steilstehende, südfallende Überschiebungszone, welche den Falten- auf den Tafeljura überschiebt und im Untersuchungsgebiet an verschiedenen Stellen aufgeschlossen ist. Das südliche Schichtpaket fällt mit 45–50° nach Süden ein, wobei meist Gipskeuper oder Muschelkalk an das nördliche Schichtpaket anstösst. Als Hauptabscherungshorizont bei der Bildung des Faltenjuras wird die Anhydritgruppe angesehen. Im frontalen Teil der Hauptüberschiebung steigt die Abscherungsfläche oft in höhere, mergeligere Horizonte (Effingerschichten und Opalinustone; SCHINDLER 1977). Lokal können sehr komplexe geologisch/tektonische Verhältnisse auftreten. Infolge des zunehmenden Überschiebungsbetrages nach Westen kann im eigentlichen Überschiebungsbereich eine Verschuppung erfolgen. Dies wurde z. B. in der gesamten Zone zwischen Baden und Schinznach in der Trias festgestellt. Westlich der Reuss bei Birnenstorf treten zwei Überschiebungszonen auf, die sich bei Hausen wieder vereinigen. Auch östlich der Reuss gegen Baden spaltet sich die Hauptüberschiebung in mindestens drei Überschiebungsflächen auf (NEFF 1980).

Die unmittelbar an die Hauptüberschiebung anschliessenden Schichten des Tafeljuras wurden z. T. aufgewölbt, bei Habsburg wird in diesen Schichten ein Nordfallen von bis zu 35° gemessen.

Verschiedene Autoren (LAUBSCHER 1961; SCHINDLER 1977, u. a.) nehmen an, dass die Hauptüberschiebung mit einer bis ins Kristallin hinuntergreifenden Bruchzone verknüpft ist. Die neuesten Resultate der Nagra scheinen diese Hypothese zu bestätigen. Sie lassen auch vermuten, dass der Südrand des Permokarbondrogens mit der Lage der Hauptüberschiebung räumlich zusammenfällt (NAGRA 1984 b).

Von besonderer Bedeutung für die geothermischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet sind die N-S-Störungen, die die Hauptüberschiebung schneiden. Im NEFF-Projekt 1980 wird angenommen, dass Thermalwasserausstritte nur dort stattfinden, wo die Hauptüberschiebung von N-S-verlaufenden, tiefgreifenden Störungen geschnitten wird. Nach SCHINDLER (1977) können diese N-S-Störungen älter als Eozän sein, da Bohnerz in solchen Störungen gefunden wurde. Nachgewiesen wurden N-S-Störungen bei Schinznach, Birnenstorf (Kapitel 3.3), in der Umgebung von Baden und an der Lägern (SCHINDLER 1977).

Auch die drei grossen Flüsse (Aare, Reuss, Limmat) zeigen bei ihrem Durchbruch durch die Hauptüberschiebungszone N-S-Richtung. Dieser Durchbruch könnte ebenfalls entlang von N-S-verlaufenden Schwächezonen erfolgt sein.

Die im Rahmen des NEFF-Projektes aus dem Jahr 1980 entdeckte übertiefe Klus bei Birnenstorf (Kapitel 3.3) hat ihre Fortsetzung nach Norden in der Felsrinne zwischen Böttstein, Gebenstorf und Würenlingen. Sie fällt mit dem Aaredurchbruch bei Lauffohr zusammen. HALDIMANN et al. (1984) führen die Bildung dieser Felsrinne auf glaziale Erosion zurück. Sie schliessen aber die Existenz einer N-S-Störung nicht aus, da in der nördlichen Fortsetzung dieser Felsrinne zwischen Böttstein und Villigen am Bötterberg und Nassberg eine NNW-SSE-streichende Bruchzone auffallend ist.

Die *Mandacher Überschiebung* ist die markanteste in einer Reihe von Störungen, die das gegen Südosten einfallende Sedimentpaket des Tafeljuras im unteren Aaretal versetzen. Sie zieht von Westen auf der Höhe des Stauwehres Beznau ins untere Aaretal hinein. Es handelt sich um eine nordgerichtete Aufschiebung mit einem Versetzungsbetrag beim Stauwehr von 80–100 m. Inwieweit sich diese Aufschiebung nach Osten fortsetzt, ist noch nicht bekannt.

Bei der *Mettauer Überschiebung*, welche von Leibstadt nach Frick verfolgbar ist, handelt es sich um eine Antiklinale, deren NW-Schenkel abgeschert und auf die Kernzone aufgeschoben worden ist (WILDI 1975). Aus den seismischen Profilen der Nagra ist ersichtlich, dass sowohl die Mandacher wie auch die Mettauer Überschiebung mit Sockelsprüngen im Kristallin verknüpft sind, die nördlich des Permokarbondrogens einen E-W-verlaufenden Horst im Kristallin bilden.

Die *Vorwald-Störung* ist als dextrale Blattverschiebung im Südschwarzwald nachgewiesen. Durch die seismischen Untersuchungen der Nagra konnte sie nach Süden bis in

den Permokarbondrog weiterverfolgt werden (NAGRA 1984 a). Diese Störung könnte als oberpermische Abschiebung für die Mächtigkeitsänderungen zwischen dem östlichen und westlichen Trog verantwortlich sein.

2.2 Stratigraphie

Aufgrund von Nagra-Daten (1985 a) sowie der beiden NEFF-Projekte (1980, 1984) ergibt sich, vom Liegenden ins Hangende, folgende Beschreibung der regionalen stratigraphischen Verhältnisse:

Die Lithologie des *kristallinen Grundgebirges* ist durch die Nagra-Bohrungen genauer bekannt geworden. Es handelt sich überwiegend um Gneise mit granitischen Intrusivkörpern. In Böttstein wurde ein Biotitgranit angetroffen. In Weiach fand man einen Biotit-Gneis, in Kaisten und in Leuggern ebenfalls Gneis und in Schafisheim vorwiegend Granit-Syenit. Der Granit von Böttstein weist ein Alter von ca. 320 Mio Jahren auf (NAGRA 1985 b).

In Böttstein fand man im oberen Kristallin (in 320–850 m Tiefe) dichte Gesteinsbereiche, durchsetzt von Kakiritzonen und lokal durchlässigen Gängen (Aplite/Pegmatite). Es wurden viele Klüfte angetroffen, die meist mit Tonen völlig versiegelt waren. Im tiefen Kristallinbereich (in 950–1300 m Tiefe) wurde ein praktisch unverwitterter Granit angetroffen mit verheilten und geschlossenen Klüften. Die geringen Mengen Wasser aus dieser Zone hatten eine sehr hohe Salinität von 13 g/l (NAGRA 1985 b).

Die Lithologie des *Permokarbondrog* besteht vorwiegend aus Tonsteinen, Silt- und Sandsteinen. Im Karbon (Stephanien) und unteren Perm (Autunien) findet man zudem bituminöse Tone und Kohleflöze (z. B. wurden in der Bohrung Weiach im Stephanien Kohleflöze von total 32 m Mächtigkeit durchfahren).

Von Osten nach Westen erfolgt eine bedeutende Mächtigkeitszunahme der permischen Sedimente (Weiach 256 m, Riniken über 985 m). In Riniken wird eine Mächtigkeit der Permokarbonsedimente von über 3000 m vermutet.

Der *Buntsandstein* hat im Untersuchungsgebiet eine wechselnde, meist geringe Mächtigkeit (5–22 m) und besteht vorwiegend aus Sandsteinen, z. T. mit Karneollagen (Zurzach).

Darüber folgt der *Untere Muschelkalk* mit z. T. mergelig ausgebildeten Dolomit- und Kalkformationen (Mächtigkeit 30–60 m).

Der *Mittlere Muschelkalk* wird aus einer 80–100 m mächtigen evaporitischen Schichtfolge (Anhydritische Mergel, evtl. Salz), der sogenannten Sulfatzone, und einer ca. 10 m mächtigen dolomitischen Formation (Anhydritdolomit) gebildet.

Der *Obere Muschelkalk* (44–50 m mächtig) wird von unten nach oben in den Trochitenkalk, Plattenkalk und Tri-

gonodusdolomit eingeteilt. Die Zugehörigkeit der Lettenkohle ist noch umstritten, faziell gehört sie eher zum Muschelkalk als zum Keuper. In dieser Arbeit wird die Lettenkohle, wie in den meisten publizierten Arbeiten in der Schweiz und in Süddeutschland, trotzdem dem Keuper zugerechnet.

Der Trochitenkalk und der Plattenkalk sind aus Kalken in verschiedenen Ausbildungsformen aufgebaut. Diese Formationen sind in wechselndem Masse dolomitisiert, wobei die Dolomitisierung nach Osten zunimmt. Eine Grenzziehung zwischen Trigonodusdolomit und Plattenkalk ist deshalb oft sehr schwierig. Geschlossene Dolomitkomplexe sind der Anhydritdolomit (mittl. Muschelkalk) und der Trigonodusdolomit. Figur 2.2 zeigt die Lage der Aufschlüsse an der Oberfläche.

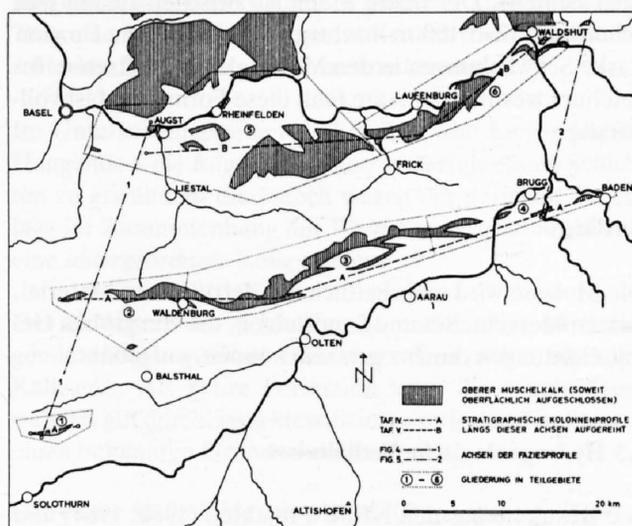


Fig. 2.2: Oberflächenaufschlüsse von oberem Muschelkalk (inkl. Lettenkohle) im Tafel- und Faltenjura (MERKI 1961)

Der *Keuper* beginnt im Liegenden mit der 3–6 m mächtigen Lettenkohle. Sie wird unterteilt in Estherienschiefer (1–1,5 m, Tonlagen) und Grenzdolomit (1,5–6 m, Dolomit). Die Lettenkohle wird überlagert von siltigen Tonen des Gipskeupers.

Der 60–90 m mächtige Gipskeuper wird vorwiegend aus Anhydrit oder Gips, vermischt mit Mergeln, aufgebaut. Steinsalz ist in dieser Formation aus dem östlichen Schweizer Jura nicht bekannt. Eventuell kann etwas Bittersalz ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) vorkommen.

Der obere Keuper besteht aus dolomitischen Mergeln mit sandigen Schichten (Schilfsandstein) und Dolomiten (Gansingerdolomit).

Die höheren mesozoischen und die tertiären Schichten spielen aus geothermischer Sicht nur noch eine untergeordnete Rolle und werden hier deshalb nur kurz erwähnt:

Lias:

15–30 m mächtig, Kalke abwechselnd mit mergeligen Lagern.

Dogger:

Vom Liegenden ins Hangende treten folgende lithologische Einheiten auf: Opalinuston, 80–110 m mächtige mergelige Tone und 60–70 m Mergel, mergelige Kalke und Sande; ca. 85–100 m mächtig, im Gebiet westlich der Achse Reuss/unteres Aaretal als Hauptrogenstein mit total ca. 70–75 m Kalkoolithabfolgen, östlich davon ist diese Formation mergelig bis kalkig; ca. 15 m mergelige Kalke.

Malm:

Der untere Malm – bei Birnenstorf ca. 230 m mächtig – ist aus Mergeln und mergeligen Kalken aufgebaut (Effingerschichten). Der obere Malm ist zwischen Baden und Schinznach über 100 m mächtig, wobei durch die Erosion starke Schwankungen in den Mächtigkeiten auftreten. Im Tafeljura westlich der Aare fehlt diese Formation fast vollständig.

Tertiär:

Die Molasse wird mehrheitlich aus detritischem Material, bunten Mergeln, Silt und Sandsteinen, die von groben Geröllschüttungen durchzogen sein können, aufgebaut.

2.3 Hydrogeologische Verhältnisse

Die Resultate aus den NEFF-Projekten (1980, 1984) und den Nagra-Resultaten (1985 a) können im folgenden Sammelprofil zusammengefasst werden (Figur 2.3):

Gut durchlässige Formationen finden sich ausser im Quartär und Tertiär im oberen Malm, im Hauptrogenstein, im oberen Muschelkalk (Muschelkalk-Aquifer) sowie im Buntsandstein. Auch den verwitterten und zerklüfteten obersten Bereich des kristallinen Grundgebirges kann man regional als Aquifer bezeichnen. Diese Aquifere sind durch schlecht leitende, meist tonige und/oder evaporitische Formationen getrennt (Aquitarde). Die bedeutendsten grossregionalen Aquitarde sind der untere Dogger (Opalinuston), der Gipskeuper und der mittlere Muschelkalk (Sulfatzone).

Aufgrund der vorhandenen Messungen muss auch die Sedimentfüllung des Permo-karbondrogenes als eine im allgemeinen wenig durchlässige Formation angesehen werden. Die hydraulische Leitfähigkeit schwankt im zentralen Teil des Troges von $5 \cdot 10^{-8}$ – 10^{-13} m/s.

Die Sandsteinabfolgen des Karbons zeigen einen gewissen offenen Porenraum, die effektive Porosität scheint aber dennoch gering zu sein.

Aufgrund ihrer Tiefenlage eignen sich im Untersuchungsgebiet nur die folgenden Aquifere für eine geothermische Energienutzung:

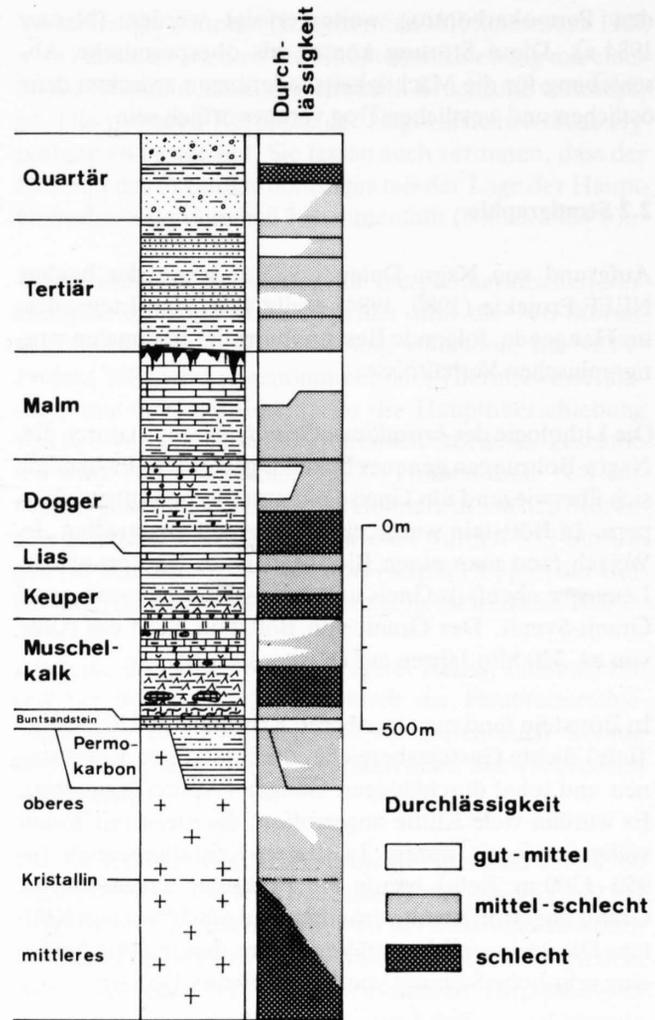


Fig. 2.3: Stratigraphisches Sammelprofil des Untersuchungsgebietes mit Angaben über die zu erwartenden Durchlässigkeiten (modifiziert nach NAGRA 1985 a)

- der Muschelkalk-Aquifer
- der Buntsandstein
- Verwitterungs- und Klüftbereich in der obersten Zone des Kristallins

Die folgende Tabelle 2.1 zeigt eine Zusammenstellung der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten in den oben erwähnten geothermisch interessanten Aquifern.

Der *Muschelkalk-Aquifer* wird aus dem Oberen Muschelkalk (Trigonodusdolomit, Plattenkalk, Trochitenkalk) und dem lithofaziell ähnlichen Anhydritdolomit (im Liegenden) und der Lettenkohle (im Hangenden) gebildet. Im Rahmen der beiden NEFF-Projekte (1980, 1984) wurde dieser Aquifer mit je einer Bohrung bei Schinznach (S2) und bei Hausen (HH1) sowie mit drei Bohrungen bei Birnenstorf (BT2, BT3, BT4) untersucht.

Der Muschelkalk-Aquifer kann aufgrund des hohen Zertrennungsgrades an Schichtflächen und Klüften, welche z. T. durch Verkarstung erweitert wurden, als gut bis sehr gut durchlässig beurteilt werden. Im untersuchten Gebiet kann jedoch angenommen werden, dass die Durchlässigkeit im Zusammenhang mit strukturellen Faktoren lateral

Tab. 2.1: Zusammenstellung der hydraulischen Leitfähigkeiten der geothermisch wichtigsten Aquifere im Untersuchungsgebiet

Muschelkalk-Aquifer:	
Bohrung S2, Schinznach Bad* ¹	$1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s
Bohrung HH1, Hausen ²	$5,7 \cdot 10^{-8}$ m/s
Bohrung BT2, Mülligen* ¹	$3,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bohrung BT3, Birmenstorf* ¹	$7,0 \cdot 10^{-5}$ m/s
Bohrung BT4, Birmenstorf ²	$3,9 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bohrung Z3, Zurzach ¹	$6,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
Bohrung Böttstein ³	$3,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bohrung Weiach ³	$1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bohrung Riniken ³	$7,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
Bohrung Schafisheim ³	$3,0 \cdot 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-8}$ m/s

Buntsandstein:	
Bohrungen Böttstein, Riniken, Kaisten ³	$1,0 - 2,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bohrung Weiach ³	$1,0 - 3,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
Bohrung Schafisheim ³	$1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s

Kristallines Grundgebirge:	
Bohrung Zurzach ¹	$2,0 \cdot 10^{-7}$ m/s
Bohrung Böttstein ³	$10^{-7} - <10^{-11}$ m/s
Bohrung Weiach ³	$1,0 \cdot 10^{-9} - 2,0 \cdot 10^{-11}$ m/s
Bohrung Kaisten ³	$8,0 \cdot 10^{-6} - <10^{-11}$ m/s
Bohrung Schafisheim ³	$>10^{-6} - <10^{-12}$ m/s

* nur Teile des Muschelkalkaquifers getestet

¹ NEFF (1980)

² NEFF (1984)

³ NAGRA (1985 a)

stark variiert bzw. mit der Tiefe generell abnimmt. Alle Thermalquellen entlang der Jura-Hauptüberschiebung entstammen diesem Aquifer.

Der geringmächtige *Buntsandstein* (5–25 m) bildet den tiefsten mesozoischen Aquifer im Untersuchungsgebiet, und es bestehen erst relativ wenige hydraulische Leitfähigkeitsdaten. Der Buntsandstein kann jedoch als gut- bis mitteldurchlässig beurteilt werden.

Im Bereich des Permokarbondrogens könnte der Buntsandstein jedoch von grösserer Bedeutung für die tiefen Grundwasserströmungen sein, indem er eine hydraulische Verbindung zwischen den durchlässigen Gesteinspaketen des Grundgebirges nördlich bzw. südlich des Troges herstellen könnte.

Der *verwitterte und geklüftete Bereich des oberen Kristallins* wurde in allen Bohrungen nördlich des Troges angetroffen. In der Bohrung Böttstein ist dieser Bereich ca. 500 m mächtig (NAGRA 1985 b). In den Bohrungen Kaisten und Leuggern traf man ebenfalls bis mindestens

600 m Tiefe im Kristallin wasserführende Klüftbereiche an.

Südlich des Troges wurde in der Nagra-Bohrung Schafisheim nur eine relativ dünne Verwitterungs- und Klüftzone im Kristallin festgestellt. Unter diesem Verwitterungshorizont folgt das unverwitterte Kristallin mit Durchlässigkeiten meist kleiner als 10^{-11} m/s. In diesem Bereich erfolgt der Wassertransport nur noch entlang von unregelmässig verteilten tiefreichenden Klüften meist geringer Durchlässigkeit.

In der Bohrung Weiach wurde unter dem Permokarbondrog relativ unverwittertes Kristallin angetroffen. Nimmt man an, dass das Kristallin unter dem Trog nie oder nur während kurzer Zeit der oberflächlichen Verwitterung ausgesetzt war, dann scheint es plausibel, dass unter dem Trog eine Verwitterungszone im Kristallin fehlt und somit schlechte Durchlässigkeiten anzunehmen sind.

Im Untersuchungsgebiet sind noch – vom Liegenden ins Hangende – die folgenden grundwasserführenden Schichten zu erwähnen, die jedoch wegen der geringen Tiefenlage im Zusammenhang mit *Warmwasservorkommen* nur eine *untergeordnete* Rolle spielen.

Der im Westen der Achse Reuss – unteres Aaretal vorliegende *Hauptrogenstein* bildet eine rund 100 m mächtige Kalkserie. Als ganze Formation kann der Hauptrogenstein als gut durchlässig klassifiziert werden und stellt auch einen bekannten Grundwasserleiter dar.

Der *obere Malm* bildet eine rund 100 m mächtige Kalkserie. Diese Kalke sind zerklüftet und stark verkarstet. Als ganze Formation kann der obere Malm als gut durchlässig beurteilt werden. Aufgrund der nur geringen Tiefenlage im geologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes bilden die Malmkalke den Rahmen für lokale Grundwasserströmungen, welche im Zusammenhang mit Warmwasservorkommen allerdings nicht von Bedeutung sind.

Aus den gleichen Überlegungen wird an dieser Stelle nicht auf die Durchlässigkeitswerte der *Molasse-* und *Quartärablagerungen* eingegangen.

Wie bereits erwähnt, werden die grundwasserführenden Gesteinsabfolgen durch mächtige, schlecht durchlässige Gesteinskomplexe getrennt. Die Mächtigkeit jedes einzelnen dieser Komplexe liegt in der Grössenordnung von 150 bis 250 m. Die hydraulische Leitfähigkeit liegt im Bereich von $5 \cdot 10^{-9} - 10^{-14}$ m/s (NAGRA 1985 a).

Im Zusammenhang mit der Tektonisierung der Gesteine müssen bezüglich der Dichtigkeit dieser an sich sehr schlecht durchlässigen Formationen jedoch lokal Vorbehalte angebracht werden. Die tiefen Grundwasserleiter (oberes Grundgebirge und Muschelkalk-Aquifer, evtl. begrenzte Zonen des Permokarbondrogens) werden von Störungszonen wie der Jura-Hauptüberschiebung und N-S-verlaufenden Brüchen versetzt. Diesen Störungen kommt prominente Bedeutung zu, da sie in der Region die einzi-

gen vertikalen Grundwasserwege darstellen. Sie können verschiedene Grundwasserstockwerke miteinander verbinden: Grundgebirge bzw. Permokarbondrog, Buntsandstein, Muschelkalk, Hauptrogenstein, oberer Malm, obere Meeresmolasse und Quartär. Damit sind Grundvoraussetzungen für die Bildung von Thermalwasseraufstößen bis an die Oberfläche gegeben.

Diese rein hydrogeologischen Überlegungen passen recht gut in das Tóth'sche Modell, wo ganz generell zwischen lokalen, intermediären und regionalen Grundwasserströmungen unterschieden wird (Figur 2.4). Wichtig ist die Feststellung, dass die Strömungsrichtungen dieser verschiedenen Grundwasservorkommen nicht unbedingt übereinstimmen müssen. Mit anderen Worten, es ist durchaus denkbar, dass in den tieferen, regionalen Grundwasserströmungen N-S-gerichtete Fließrichtungen existieren, während im intermediären System dazu rechtwinklig verlaufende Strömungen vorherrschen. Wie bereits oben erwähnt, kann es entlang tiefgreifender tektonischer Störungen zu Vermischungen der genannten Grundwassersysteme kommen.

Die Thermalwasseraquifere oder besser thermalwasserführende Kluftkörper (oberes Grundgebirge und Muschelkalk-Aquifer) können somit regionale hydrogeologische Systeme zwischen dem Aare-Gotthard-Massiv (im Süden) und der Thermalwasseraustrittszone bilden. Regionale hydrogeologische Systeme zwischen dem Schwarzwald und der Jura-Hauptüberschiebung wurden ebenfalls postuliert (NEFF 1980). Die Entdeckung des Permokarbondrogens sowie die Interpretation der Resultate der Nagra-Untersuchungen lassen eine N-S-Fließrichtung sowohl im Kristallin als auch im Muschelkalk zwischen Rhein und Jura-Hauptüberschiebung als wenig wahrscheinlich erscheinen. Mögliche hydraulische Verbindungen zwischen den durchlässigen Partien des Grundgebirges beidseits des Troges können allenfalls durch den miteldurchlässigen Buntsandstein sowie durch das Vorhandensein von N-S-verlaufenden tektonischen Störungen gegeben sein. Die hydrochemischen Untersuchungen der Nagra deuten darauf hin, dass die Wässer im Kristallin nördlich und südlich des Troges aus dem Schwarzwald

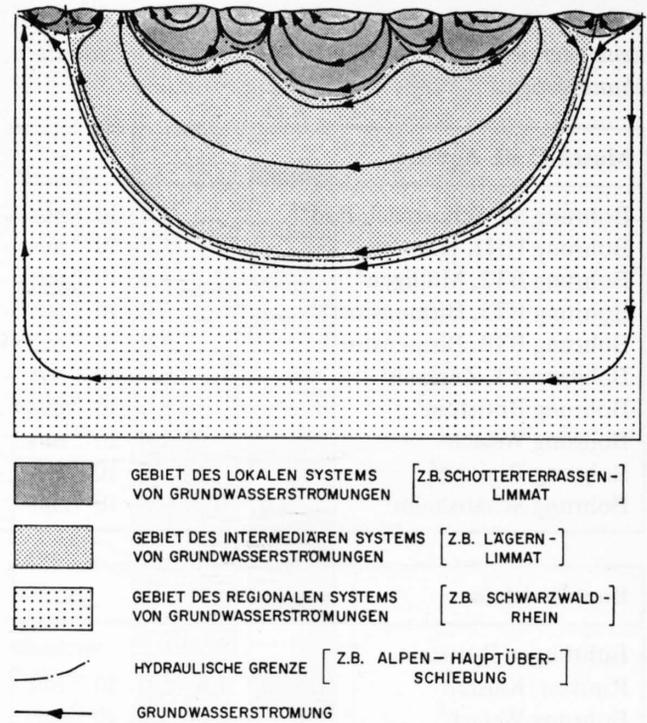


Fig. 2.4: Schematische Darstellung von lokalen, intermediären und regionalen Systemen von Grundwasserströmungen (Tóth 1963)

resp. den Alpen stammen und somit unterschiedlichen Ursprungs sind. Die Herkunft des Muschelkalkwassers entlang der Jura-Hauptüberschiebung dürfte dagegen eher aus dem Jura selber stammen, da vor allem im Westen der Zone Baden-Schinz nach Oberer Muschelkalk ansteht (Figur 2.2). Dieses Wasser müsste aber im Muschelkalk in relativ grosse Tiefen gelangen und langsam fließen, um die benötigten Temperaturen zu erreichen. Abschliessend sei noch auf die Möglichkeit von regionalen oder lokalen, tiefen Grundwasserströmungen parallel zu den Rändern des Permokarbondrogens hingewiesen. Entlang dieser Ränder verlaufen E-W-Bruchsysteme, welche potentiell durchlässige Zonen über mehrere 10 km bilden können. Insbesondere kann durch die räumliche Nähe der Jura-Hauptüberschiebung zu den Bruchsystemen des südlichen Trograndes eine hydraulische Verbindung begünstigt werden.

3. LOKALE GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE

Ch. Sieber [1], M. Obrist [1, 2] und J.-P. Tripet [1, 3]

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die geologischen und tektonischen Verhältnisse derjenigen Gebiete gegeben werden, die im Hinblick auf die Nutzung von geothermischer Energie genauer untersucht wurden. Dieses Kapitel stützt sich in erster Linie auf bereits existierende Literaturangaben; es wurden aber auch – wo nötig – zusätzliche geologische Detailkartierungen durchgeführt (NEFF 1980).

3.1 Region Schinznach

Die Thermalquelle von Schinznach Bad befindet sich südlich der Jura-Hauptüberschiebung in der Linnerberg-Habsburg-Antiklinale, wo der wasserdurchlässige obere Muschelkalk, beidseits von den undurchlässigen Formationen Gipskeuper und Anhydritgruppe begrenzt, quer durch das Aaretal streicht und durch eine oder mehrere

sub-parallel zur Aare laufende Störungszonen geklüftet wird (Figur 3.1).

Das Gesteinsinventar des Felsuntergrundes des Aaredurchbruches bei Schinznach Bad reicht von der Molasse, bei fehlender Kreide, über den Jura bis in die Trias hinab und endet mit dem mittleren Muschelkalk (Anhydritgruppe).

Aufgrund der lokalen geologischen Verhältnisse (Geometrie der geologischen Einheiten im Zusammenhang mit der Jura-Hauptüberschiebung, Diskontinuität der geologischen Schichten entlang der Hauptüberschiebung, tiefer

Einschnitt der Aare in die geologischen Strukturen) bildet das Aaretal zwischen Wildeggen und Schinznach eine Entwässerungszone bezüglich der benachbarten geologischen Formationen. Durch die Kontinuität der geologischen

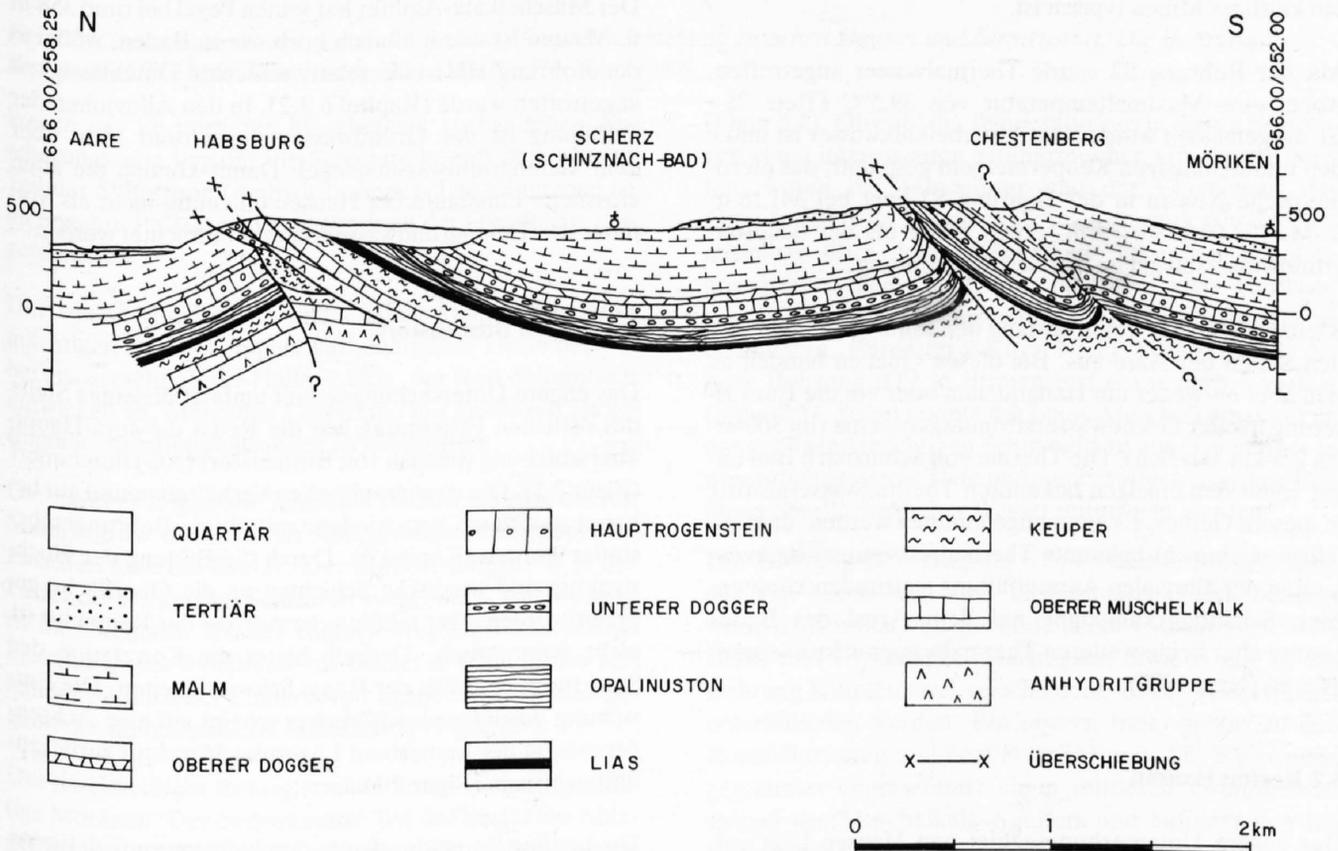


Fig. 3.1: Geologisches Profil Habsburg–Schinznach Bad–Möriken (NEFF 1980; modifiziert nach SCHINDLER 1982)

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden
 [2] Jetzt bei Holderbank Management und Beratungs AG
 [3] Jetzt bei Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)

Schichten (insbesondere der Tiefengrundwasserleiter, wie z. B. der obere Muschelkalk) im Norden der Hauptüberschiebung und im Süden von Wildeggen kann diese Entwässerungszone eine sowohl lokale (im 500-m- bis 2,5-km-Bereich) wie auch regionale (im 20 km- oder 100-km-Bereich) Bedeutung haben. Die Therme von Schinznach Bad ist ein Hinweis auf diese regionale Entwässerungsfunktion dieser Zone. Im Bereich der Talsohle sind die prä-quartären geologischen Formationen jedoch durch die alluviale Talfüllung bedeckt, so dass allfällige, noch nicht bekannte Thermalwasseraustritte in den Grundwasserstrom der Schotter des Aaretals übertreten könnten, ohne an der Terrainoberfläche auszutreten.

Im Einschnitt der Jura-Hauptüberschiebung durch die Aare bildet der obere Muschelkalk zusammen mit dem Anhydritdolomit den tiefsten aufgeschlossenen Grundwasserleiter. Eine Bohrung (S2) wurde im Rahmen des NEFF-Projektes vom Jahre 1980 in den Hauptmuschelkalk südlich der Jura-Hauptüberschiebung angesetzt (Kapitel 6.2).

Die Ergebnisse der bei dieser Bohrung durchgeführten Pumpversuche haben im Muschelkalk-Aquifer eine im allgemeinen mässige, z. T. aber hohe bis sehr hohe Durchlässigkeit auf Klüften gezeigt (Tabelle 2.1); die durchlässigen Trennflächen sind lokal verkarstet. Die räumliche Verteilung der Durchlässigkeit ist also extrem heterogen, was für ein klüftiges Milieu typisch ist.

Mit der Bohrung S2 wurde Thermalwasser angetroffen, wobei eine Maximaltemperatur von 39,5°C (Tiefe 75–81 m) gemessen wurde. Das Muschelkalkwasser ist unter den undurchlässigen Keupermergeln gespannt; das piezometrische Niveau in der Bohrung S2 liegt bei 341,18 m ü. M. (04.04.1980), d. h. etwas höher als der Schottergrundwasserspiegel im Bereich der Bohrung.

Kleinere Quellen treten entlang der Talhänge an den beiden Seiten der Aare aus. Bei diesen Quellen handelt es sich aber entweder um Hangquellen oder um die Entwässerung lokaler Grundwasserströmungssysteme (im 500-m- bis 2,5-km-Bereich). Die Therme von Schinznach Bad bildet somit den einzigen bekannten Thermalwasseraustritt in diesem Gebiet. Es kann angenommen werden, dass allfällige noch nicht bekannte Thermalwasseraustritte eventuell in der alluvialen Aaretalfüllung stattfinden könnten. Eine Seichtbohrkampagne auf dem Areal des Bades konnte aber keine weiteren Thermalwasseraufstösse lokalisieren (NEFF 1980).

3.2 Region Hausen

Das engere Untersuchungsgebiet von Hausen liegt entlang der Jura-Hauptüberschiebung zwischen den Flusstälern der Aare und der Reuss (Figur 2.1).

Gerade westlich von Hausen ziehen zwei ehemalige Flussläufe durch den Faltenjura. Ein alter Aarearm erodierte dabei bis unter Kote 320 m ü. M. Die Mulde ist heute mit

über 100 m Lockergestein aufgefüllt. 1 km östlich davon befindet sich eine weniger tiefe Rinne, die wohl als Abfluss eines ehemaligen Sees in der Birrfeldregion diente. Ihre tiefste Felslinie liegt bei der Jura-Hauptüberschiebung bei etwa 340 m ü. M. Sie ist dort mit etwa 40 m Quartärablagerungen überdeckt (Kapitel 5.2.2).

Auf der östlichen Flanke dieser jüngeren, weniger tiefen Rinne wurde die Bohrung HH1 abgeteuft (Kapitel 6.3).

In der Bohrung HH1 wurde eine vollständige Abfolge vom Lias bis zum Anhydritdolomit durchfahren, wobei unter dem Anhydritdolomit wieder Oberer Muschelkalk angetroffen wurde. Diese Schichtverdoppelung lässt sich wie folgt erklären: Der Anhydritdolomit bildete mit dem Oberen Muschelkalk eine kompetente Platte, während sich der Keuper im Hangenden und die Sulfatzone im Liegenden plastisch verhielten. Dies führte lokal zu einer Aufschuppung von frontalen Teilen der Muschelkalkplatte, d. h., sie schoben sich übereinander, was zu einem mehrfachen Schichtrepetieren führte.

Östlich vom Schloss Habsburg lässt ein ungefähr N-S-streichender Querbruch den im W anstehenden Muschelkalk im E verschwinden. Dieser Bruch ist bisher die einzige an der Oberfläche mit Sicherheit nachgewiesene N-S-Störung im Raume Hausen (Kapitel 5.1.2).

Der Muschelkalk-Aquifer hat seinen Pegel bei rund 358 m ü. M. und ist damit ähnlich hoch wie in Baden, wobei in der Bohrung HH1 eine relativ schlechte Durchlässigkeit angetroffen wurde (Kapitel 6.3.2). In den Alluvionen der Talfüllung ist der Grundwasserspiegel rund 18 m über dem Tiefengrundwasserspiegel. Damit können die alten «fossilen» Flussläufe bei Hausen eindeutig nicht als Vorfluter des Tiefengrundwassersystems betrachtet werden.

3.3 Region Birnenstorf

Das engere Untersuchungsgebiet umfasst diejenige Stelle des östlichen Faltenjuras, wo die Reuss die Jura-Hauptüberschiebung westlich von Birnenstorf (AG) durchquert (Figur 2.1). Die stratigraphischen Verhältnisse sind gut bekannt und durch verschiedene mitteltiefe Bohrungen bestätigt worden (Kapitel 6). Durch die Bildung der Hochstruktur sind triadische Schichten an die Oberfläche gepresst worden. Der tektonische Aufbau der Reussklus ist nicht symmetrisch. Deshalb bietet die Korrelation der Strukturen beidseits der Reuss Schwierigkeiten. Die Entstehung des Reussdurchbruches scheint auf eine Achsen-depression der Linnerberg-Lägernhochstruktur zurückzuführen zu sein (Figur 2.1).

Die heutige Reussklus wurde durch die vermutlich bis ins Risswürm-Interglazial an dieser Stelle durchfliessende Ur-Aare gebildet, wobei sich deren Lauf einzig die Rippen des Muschelkalks, des Lias und der Effingerkalke (?) entgegenstellten. Diese Ur-Aare floss südlich des Chestenbergs Richtung Birrfeld – Mülligen auf einer gegenüber heute wesentlich tieferen Kote.

sich über dem Reusspiegel ein. Diese Tatbestände werden mit der heterogenen Wasserwegsamkeit des Tiefengrundwasserleiters erklärt. Dabei repräsentieren die Pegelmessungen in den beiden alten Bohrungen den obersten lokalen Grundwasserleiter, der in die Reuss entwässert.

Die tiefen Pegelmessungen im neuen Bohrloch repräsentieren hingegen den gespannten Tiefengrundwasserspiegel. Da er unter dem Reusspiegel liegt, kann der Tiefengrundwasserleiter daher bei Birnenstorf kaum die Reuss als Vorfluter haben. Man muss annehmen, dass die Entwässerung des Tiefengrundwassers entlang einer N-S-Verbindung erfolgt, die die Reuss oder die Aare vermutlich weiter nördlich schneidet.

3.4. Region Baden

Die Thermen von Baden sind im Projektgebiet neben Schinznach die einzigen bekannten, natürlichen Warmwasseraustritte an die Oberfläche (Figuren 2.1 und 3.3).

Die Geologie von Baden und Umgebung wurde von SCHINDLER (1977) im Detail beschrieben. Die Situation der Thermen von Baden wurde u. a. von CADISCH (1931, 1936), HARTMANN (1943), MÜNZEL (1947) und VUATAZ (1982) analysiert. Im folgenden wird nur ein kurzer Abriss über die Geologie dieses Gebietes gegeben.

Die Jura-Hauptüberschiebung wird bei Baden/Wettingen von der Limmat auf einer vermuteten Querstörung durchbrochen. Im Bäderquartier am Limmatknie reicht der obere Muschelkalk bis knapp unter die Limmat hinauf. Beidseits der Limmat treten aus dem nordvergent überkippten und aufgeschobenen Südschenkel der Lägernantiklinale mindestens 17 Quellen aus (3 davon am rechten Ufer in Ennetbaden). Einige wenige wilde Wasseraustritte

in der Limmat sind ebenfalls bekannt. Die auf engstem Raum mit wenig tiefen Fassungen erschlossenen Thermalquellen hängen hydraulisch eng zusammen und liefern artesisch durchschnittlich 750 l/min Wasser mit rund 48°C Temperatur und etwa 4,7 g/l Mineralgehalt (Natrium-Kalzium-Sulfat-Chlorid-Thermen).

Die Frage, ob diese Thermalwasseraustritte an eine N-S-Querstörung gebunden sind, ist mangels Aufschlüssen schwer zu beurteilen. Der tiefste Punkt des überschobenen Südschenkels der Lägernantiklinale und damit des Oberen Muschelkalkes befindet sich jedoch weiter westlich bei einer N-S-Querströmung unter dem Gelände der Brown, Boveri & Cie AG auf weniger als 300 m ü. M. (Figur 5.9.). An dieser Stelle sind deshalb unterirdische Thermalwasseraustritte wahrscheinlich, weil der alte Limmatlauf den Gipskeuper bis auf eine Felskote von 320 m ü. M. erodierte und dabei neben der Jura-Hauptüberschiebung einen N-S-verlaufenden Bruch kreuzt. Vertikale Wasserwege wären damit vorgezeichnet.

Eine Bohrkampagne für die Umfahrung von Ennetbaden anfangs 1983 (Dr. von Moos AG, 1983) lieferte zusätzliche wichtige Hinweise über die örtliche Beschaffenheit sowie über die Wasserwegsamkeit des Gipskeupers, welcher in seiner Funktion als Deckschicht über dem Hauptmuschelkalk eine wichtige Rolle einnimmt.

Dieser Gipskeuper besteht in Ennetbaden aus tonigen Siltsteinen mit Karbonatgrus und Dolomitlagen. Sandige Partien sind darin eingelagert, Gips fehlt zum Teil völlig, wobei nicht ganz klar ist, ob er sekundär weggelöst oder primär gar nicht abgelagert wurde. Die erwähnten Bohrungen für den Umfahrungstunnel Ennetbaden haben weiter gezeigt, dass die Durchlässigkeiten des Gipskeupers lokal höher sind als bis anhin angenommen (NEFF 1980; Dr. von Moos AG, 1983, nichtpublizierter Bericht).

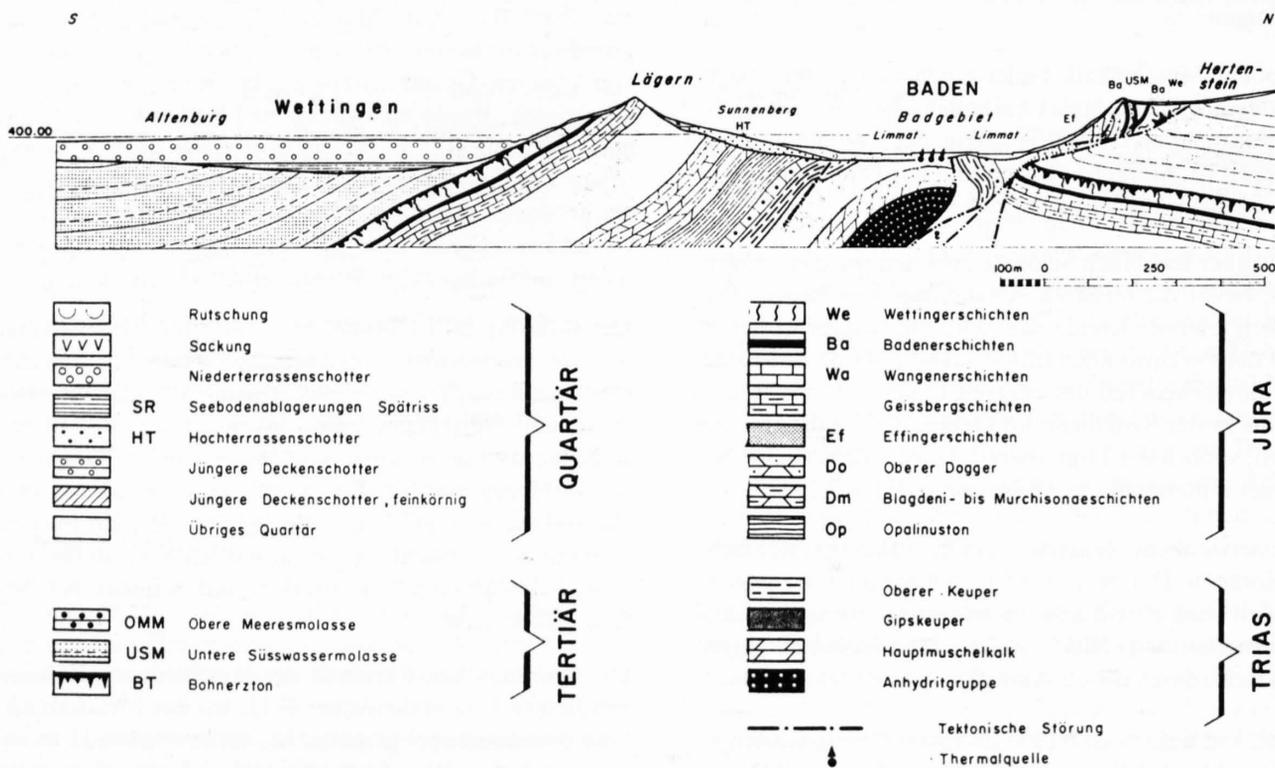


Fig. 3.3: Geologisches Profil durch die Lägern-Antiklinale in Baden und Ennetbaden (SCHINDLER 1977)

4. GEO- UND ISOTOPENCHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG DER TIEFEN THERMALWÄSSER

J. Flück, J.-D. Dubois und F. Jaffé [1]

4.1. Einleitung

Die integrierte Interpretation der Resultate hydrogeologischer, geochemischer und isotonchemischer Untersuchungsmethoden erlaubte es, das Alter, die mittlere Infiltrationshöhe und die Temperatur der tiefen Thermalwasserkomponente im Untergrund abzuschätzen (DUBOIS und FLÜCK 1984).

Das Schwergewicht der geochemischen Arbeiten befasste sich mit der Analyse und Interpretation aller bekannten Thermalwasseraustritte im eigentlichen Projektgebiet (Quellen und Bohrungen, Figur 2.1). Für Kontroll- und Referenzmessungen wurden aber auch zahlreiche Wasserproben von kalten Quellen und Flüssen im Projektgebiet sowie Thermalquellen *ausserhalb* des eigentlichen Untersuchungsgebietes untersucht.

Die Schüttmengen, Temperaturen, elektrische Leitfähigkeiten sowie die pH-Werte wurden stets «in situ» gemessen. Die chemischen Analysen sowie die Isotopenbestimmungen (wichtigste Kationen und Anionen, Tritium, Deuterium, Sauerstoff O^{18} , Kohlenstoff C^{13} und C^{14}) erfolgten in verschiedenen Speziallaboratorien der Schweiz und im Ausland. An einigen ausgewählten Wasserproben gelangten auch Edelgasbestimmungen zur Durchführung.

In der folgenden Tabelle ist die Anzahl der durchgeführten Messungen zusammengestellt:

- Entnahme von Wasserproben (1982-1983)	170
- Messungen von Schüttmengen, Temperaturen, elektrischer Leitfähigkeit und pH-Werten	680
- chemische Analysen (9 Parameter pro Analyse)	1530
- Isotopenanalysen	
• Tritium, Deuterium, Sauerstoff O^{18}	135
• Kohlenstoff C^{13} und C^{14}	26
• Edelgase	8

Tabelle 4.1 liefert eine Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der Thermalwasser im Projektgebiet sowie weiterer ausgewählter Thermal- und Mineralwässer, die in diesem Kapitel zur Sprache kommen.

Bei der Datenauswertung der diversen Analysen wurden jedoch auch Ergebnisse von vorherigen Untersuchungen (MÜNDEL 1974; CARTE 1975; SCHINDLER 1977; SCHMASSMANN 1977; HÖGL 1980; VUATAZ in NEFF 1980; ZORN und JAFFÉ 1982; LOOSLI 1978) mitberücksichtigt.

4.2 Chemisch-physikalische Eigenschaften der Thermalwässer

Die Austrittstemperaturen der Thermalwässer im untersuchten Gebiet schwanken im allgemeinen zwischen $20^{\circ}C$ (Lottstetten) und 40° (Zurzach). Einzig die Thermalquellen von Baden zeigen höhere Temperaturen ($44^{\circ}C - 48^{\circ}C$).

Die totale Mineralisation der Thermalwässer variiert zwischen 1000 und 4500 mg/l, es sind jedoch auch sehr geringe Konzentrationen, wie zum Beispiel in der Bohrung Lostorf F3 (760 mg/l), und sehr hohe Mineralgehalte (z. B. Bohrung Birmenstorf BT4: 14500 mg/l) beobachtbar.

Die chemische Zusammensetzung der meisten Thermalwasseraustritte lässt auf eine Zirkulation durch Sedimentfolgen mit Halit, Anhydrit und Dolomit schliessen, die vermutlich zum Teil dem Keuper (Obere Trias) aber hauptsächlich dem Muschelkalk (Mittlere Trias) zuzuordnen sind.

Die Thermalwässer der Bohrung von Zurzach, die unterhalb der triassischen Sedimentschichten im granitischen Sockel gefasst werden, zeigen jedoch chemische Zusammensetzungen, die für Zirkulationswässer aus kristallinen Gesteinen typisch sind ($Na \gg Ca > K > Mg$). Es ist interessant festzustellen, dass in Bad Säkingen, wo die Thermalwässer ebenfalls aus Klüften des Granitsockels entspringen, diese Wässer eine chemische Zusammensetzung aufweisen, die auf einen Kontakt mit triassischen, halitreichen Evaporitformationen schliessen lassen (SAUER 1969).

Da die untersuchten Thermalwässer unterschiedliche Mengen an Tritium, dem radioaktiven Isotop des Wasserstoffes (Halbwertszeit: 12,3 Jahre), enthalten, kann auf das Vorhandensein von eher jungen Thermalwasserkomponenten geschlossen werden (d. h., letztere sind erst nach den Nuklearversuchen von 1953 infiltriert). Gleichzeitig weisen jedoch die relativ geringen Gehalte an Kohlenstoff C^{14} , einem radioaktiven Isotop des Kohlenstoffes (Halbwertszeit: 5730 Jahre), darauf hin, dass auch ziemlich alte Thermalwasserkomponenten vorhanden sein müssen (mehrere tausend bis zehntausend Jahre).

[1] Département de Minéralogie, Université de Genève

Tab. 4.1: Darstellung der wichtigsten physikalisch-chemischen Eigenschaften der untersuchten Thermalwässer

Lokalität und Höhe des Austritts	Quelle	Temp. (°C)	Mineralisierung (mg/l)	Chemie	Grundwasserträger	Thermalwasserkomponenten				
						Prozentanteil (%)	extrapolierte Temperatur (°C)	min. Zirkulationstiefe (m)	mittlere Infiltrationshöhe (m)**	Alter (Jahre)
BADEN (354 m)	Gesamtquellen	44–48	4200–4800	Na>Ca>Mg>K>Sr Cl>SO ₄ >HCO ₃	Muschelkalk (intermediäres Reservoir)	94	50	400–1000	580 ± 60	≥ 19000
SCHINZNACH (344 m)	Alte Quellen	28–32	1500–2500	Ca>Na>Mg>K>Sr SO ₄ >Cl>HCO ₃	Muschelkalk	40–60	39	650	700 ± 70	≥ 17000
	Bohrung S2 (90 m)	29–36	1700–2800	Ca>Na>Mg>K>Sr SO ₄ >Cl>HCO ₃	Muschelkalk					
ZURZACH (340 m)	Bohrung Z2 (469 m)	40	1000	Na>Ca>K>Mg>Sr SO ₄ –HCO ₃ >Cl	Granitsockel	100	–	800	750 ± 80	≥ 24000
LOSTORF (549 m)	Bohrung 3 (580 m)	26	760	Ca>Mg>Na>Sr>K SO ₄ >HCO ₃ >Cl	Keuper und/oder Muschelkalk	63–91	–	500	685 ± 70	≥ 4500
	Bohrung 4 (280 m)	26	2450	Ca>Mg>Na>Sr>K SO ₄ >HCO ₃ >Cl	Keuper und/oder Muschelkalk	100	–	500	675 ± 70	≥ 4500
HAUENSTEIN BASISTUNNEL	5,174 km	27	900	Ca>Mg>Na>Sr>K SO ₄ >HCO ₃ >Cl	Keuper und/oder Muschelkalk	–	29	400	450 ± 50	–
HAUSEN (380 m)	Bohrung HH1 (408 m)	29	1000	Ca>Mg>Na>K>Sr SO ₄ >Cl	Muschelkalk	~ 90	29	290	650 ± 70	–
BIRMENSTORF (343,6 m)	Bohrung BT4 (241 m)	23	14500	Na>Ca>Mg>K>Sr Cl>SO ₄	Muschelkalk	~ 90	23	–	700 ± 70	–
RHEINFELDEN (300 m)	Bohrung	26	4300	Na>Ca>K>Mg>Sr HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Muschelkalk	–	–	–	470 ± 50	–
SÄCKINGEN (292 m)	Badequelle (201 m)	29	3200	Na>Ca>K>Mg>Sr Cl>HCO ₃ >SO ₄	* Granitsockel plus Kontakt mit Evaporitformationen	~ 50	–	–	390 ± 40	≥ 25000
	Margarethenquelle (154 m)	21	1000	Na>Ca>Mg>K>Sr Cl>HCO ₃ >SO ₄	* dito	–	–	–	340 ± 30	–
LOTTSTETTEN (433 m)	Bohrung (543 m)	20	950	Na>Ca>Mg>K>Sr HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Malm	–	–	–	700 ± 70	≥ 20000

* Obschon das Thermalwasser aus Klüften des kristallinen Sockels entstammt, besitzt es doch chemische Eigenschaften von Wässern, die mit triassischen Formationen (reich an Halit) in Kontakt kamen.

** Bestimmung ausschliesslich für die «warme» Komponente, mit Ausnahme für den Hauenstein-Basistunnel, Rheinfelden, Säcking und Lottstetten.

Dieser scheinbare Widerspruch kann auf einfache Weise damit erklärt werden, dass es sich hier um eine unterschiedliche Mischung von mindestens zwei Thermalwasserkomponenten handelt. Ein Teil der Wässer ist warm, stark mineralisiert und stammt aus der Tiefe, wohingegen der andere Teil aus kaltem, schwach mineralisiertem, jungem und oberflächennahem Wasser gebildet wird.

Mittels Extrapolationsmethoden, die auf Korrelationen zwischen verschiedenen physikalischen und chemischen Parametern sowie auf Isotopenanalysen basieren, ist es nun unter gewissen Umständen möglich, die typischen Merkmale der beiden Hauptkomponenten (d. h. die Extremwerte bzw. «end members») der Mischung zu bestimmen sowie deren potentielle Beteiligung an einer Austrittsstelle abzuschätzen (MAZOR et al. 1985). Auf diese Weise ergaben sich Verdünnungen durch oberflächennahe Gewässer von 6 % für die Thermalwässer von Baden bzw. von 20 % bis 60 % für diejenigen von Schinznach. Es muss hinzugefügt werden, dass keine zeitlichen Schwankungen des Verdünnungsgrades bei den Badener Thermalquellen auftreten. Aufgrund von starken, jahreszeitlich bedingten Grundwasserschwankungen werden jedoch dementsprechende Variationen im Verdünnungsgrad der Thermalwässer von Schinznach verursacht. Die Wässer von Zurzach und von der Bohrung Lostorf F4 dürften jedoch keine Beimengungen von «jungem» Wasser enthalten, da hier kein Tritium nachgewiesen werden konnte.

4.3 Abschätzung des Alters der Thermalwasserkomponenten

Es existieren heute diverse Untersuchungsmethoden, um Altersbestimmungen an Wässern durchzuführen. Einige dieser Methoden beruhen auf wenig belegten Hypothesen und sind daher schwierig zu kontrollieren. Altersbestimmungen sind deshalb immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die im folgenden beschriebenen Werte sollten daher in erster Linie dazu dienen, gewisse Hypothesen zu überprüfen und so Anregungen für konstruktive Diskussionen zu geben.

Während der Arbeiten für das NEFF-Projekt 1984 hat die Nagra, unabhängig vom NEFF-Projekt, ebenfalls eine Studie unternommen, um das Alter der Tiefengewässer im gleichen Gebiet zu bestimmen. Die dabei erhaltenen Resultate sind grössenordnungsmässig vergleichbar mit den Ergebnissen des NEFF-Projekts. Dies, obwohl von der Nagra z. T. völlig unterschiedliche Methoden zur Altersbestimmung verwendet wurden (SCHMASSMANN et al. 1984).

Im Rahmen des NEFF-Projekts erfolgt die Altersbestimmung der tiefen Thermalwasserkomponente aufgrund der Isotope Tritium und Kohlenstoff C^{14} . Folgende Informationen wurden dazu benötigt:

- Die mittlere Tritium-Konzentration der infiltrierten Wässer beträgt nach dem Jahre 1953 (Beginn der thermonuklearen Versuche) ca. 90 TU («tritium unit»*).

Zudem enthalten diese Wässer eine Konzentration an Kohlenstoff C^{14} von ca. 90 PCM**. Darin ist bereits berücksichtigt, dass durch die Interaktion zwischen dem Wasser und dem Gestein die C^{14} -Konzentration um ca. 25 % reduziert wird (tatsächlich enthalten infiltrierte Wässer seit 1953 eine C^{14} -Konzentration von ca. 120 PCM). Man kann also annehmen, dass bei einer Konzentration von 1 TU ebenfalls eine C^{14} -Konzentration von 1 PCM vorhanden ist.

- Der C^{14} -Gehalt, der in einer Probe gemessen wird, setzt sich aus der Summe des C^{14} -Gehaltes der alten Komponente und derjenigen einer jungen Komponente (nach 1953) zusammen.
- Durch die Bestimmung des Anteils des C^{14} -Gehaltes der jungen Wasserkomponente an einer Probe ist es möglich, die approximative Konzentration an Kohlenstoff C^{14} zu bestimmen, welche in der tiefen, alten Thermalwasserkomponente enthalten ist.

Aus der Anfangskonzentration (ca. 90 PCM) und der Halbwertszeit von Kohlenstoff C^{14} (5730 Jahre; FRRZ und FONTES 1980) ist es möglich, auf die Verweilzeit im Untergrund (= Alter) dieser tiefen Thermalwasserkomponente zu schliessen (MAZOR et al. 1986).

Die folgende Tabelle 4.2 liefert eine Zusammenstellung der Isotopengehalte und dem daraus errechneten Alter der tiefen Thermalwasserkomponente von 6 Standorten.

Es muss an dieser Stelle noch einmal betont werden, dass es sich bei den erhaltenen Altersangaben um grössenordnungsmässige Minimalwerte handelt. Es ist jedoch wichtig festzustellen, dass alle verwendeten Interpretationsmethoden gegen die gleichen Alterswerte konvergieren. Im Falle der Thermalwässer von Schinznach wurde die Altersbestimmung durch den hohen CO_2 -Gehalt erschwert, welcher aus einer Zersetzung von organischem Material resultiert. Bei der Durchführung der Altersbestimmung wurde aber dieser Besonderheit Rechnung getragen.

4.4. Infiltrationszonen

Die Interpretation der Gehalte an stabilen Isotopen (Sauerstoff O^{18} und Deuterium) erlaubt unter günstigen Verhältnissen die Bestimmung der mittleren Höhe der Infiltrationszone der Grundwässer. Es existieren Beziehungen zwischen dem Gehalt an stabilen Isotopen in meteorischen Wässern und geographischen und paläogeographischen Parametern (geographische Breite, Höhe, Jahreszeiten und Klimaperioden; CRAIG 1961).

* 1 TU: eine Tritium-Einheit entspricht einem Tritium-Atom in 10^{18} Wasserstoff-Atomen

** 1 PCM = pourcent carbone moderne

Tabelle 4.2: Liste der analysierten Isotopen sowie Altersbestimmungen der thermalen Tiefenkomponenten (NEFF 1984)

Standort	Quelle	Datum	Tritium (TU)*	Kohlenstoff 14 (PCM)**	Kohlenstoff 13 (δ ‰)**	Alter der thermalen Tiefenkomponente (Jahre)
BADEN	Limmat	23.06.83	$3,6 \pm 0,5$	$7,0 \pm 0,3$	- 9,9	≥ 19000
	Schwanen	23.02.83	$6,2 \pm 0,6$	$7,2 \pm 0,3$	- 8,5	
	Verenahof	14.12.83	$5,8 \pm 0,7$	7,0	- 8,0	
SCHINZNACH	Alte Quelle	22.06.83	$46,9 \pm 5,1$	$41,4 \pm 0,5$	- 12,0	≥ 17000
	"	13.12.82	$39,8 \pm 4,5$	42,0	- 10,4	
	Bohrung S2	22.06.83	$18,0 \pm 2,1$	$24,5 \pm 0,3$	- 10,4	
	"	14.12.83	$24,9 \pm 4,2$	28,0	- 9,4	
ZURZACH	Bohrung Z 2	24.02.83	< 1	$3,5 \pm 0,4$	- 9,4	≥ 24000
LOSTORF	Bohrung 3	23.02.82	$5,8 \pm 0,7$	$44,1 \pm 0,5$	- 9,6	≥ 4500
	"	12.12.83	$7,1 \pm 3,3$	41,0	- 9,3	
	Bohrung 4	23.06.83	< 1	$15,5 \pm 0,2$	- 6,8	≥ 4500
	"	13.12.83	< 0,8	15,0	- 9,3	
SÄCKINGEN	Badequelle	27.06.83	$39,4 \pm 4,2$	$34,0 \pm 0,4$	- 14,2	≥ 25000
	"	15.12.83	$35,3 \pm 4,3$	28,0	- 12,4	
LOTTSTETTEN	Bohrung	26.06.83	$0,8 \pm 0,7$	$4,0 \pm 0,5$	- 3,9	≥ 20000

* TU: eine Tritium-Einheit entspricht einem Tritium-Atom in 10^{18} Wasserstoff-Atomen

** PCM: pourcent carbone moderne

*** δ ‰: Abweichung des $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses in einer Probe von einem Standardwert in ‰ (als Standard dient das Kohlenstoffisotopenverhältnis einer bekannten Belemnitenformation in USA)

Für die Thermalwässer der Region von Baden wurde die Abschätzung der mittleren Infiltrationshöhe mit Hilfe einer linearen Korrelation durchgeführt, die auf dem Isotopengehalt kalter Quellen mit kurzen unterirdischen Fließwegen und bekannten Infiltrationszonen (Gebiet des Fricktals und des Schwarzwalds) basiert. In Tabelle 4.1 sind die Resultate dieser Abschätzungen für die verschiedenen Thermalquellen aufgeführt.

Leider sind diese Resultate nicht genügend aussagekräftig, um eine exakte Bestimmung der Infiltrationshöhe zu erhalten. Die Unsicherheit bei der Interpretation ist primär mit der sehr langen Verweilzeit des Wassers im Untergrund verknüpft. Im Falle von Rheinfelden, Säcking und Zurzach stützen die Daten die Annahme einer Herkunft aus dem Schwarzwald.

Bei der Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass der Gehalt an stabilen Isotopen des Regenwassers und damit des infiltrierenden Wassers von klimatischen Faktoren abhängig ist. Unter Berücksichtigung vom mittleren Alter der tiefen Thermalwasserkomponente von ca. 20'000 Jahren ist es notwendig, *paläoklimatische* Untersuchungen durchzuführen, um die ursprünglichen Gehalte an stabilen Isotopen der infiltrierten Wässer zu bestimmen. Die letzten 20'000 Jahre sind in der Tat durch zahlrei-

che und wichtige Klimavariationen charakterisiert (Ende der letzten Eiszeit). Zudem ist es möglich, dass auch die warme Thermalwasserkomponente aus einer Mischung von Wässern verschiedener Herkunft besteht, welche bei unterschiedlichen Klimaperioden infiltrieren. Für den Moment reichen die Informationen nicht aus, um mit Hilfe der stabilen Isotopen genaue Aussagen über die Herkunft der Thermalwässer machen zu können. Folglich ergibt sich, dass an das Problem der Herkunft der Thermalwässer (d. h. der Lage der Infiltrationsgebiete) nur mittels einer verbesserten geologischen und tektonischen Kenntnis speziell des Permokarbondotropes sowie des regionalen und lokalen Grundwasser-Fließregimes herangegangen werden kann.

4.5 Temperaturen in den tiefen Thermalwasserleitern

Die Abschätzung der in den tiefen Grundwasserleitern vorherrschenden Temperaturen erfolgte mit Hilfe von verschiedenen sog. chemischen »Geothermometern« (ELLIS 1979; FOURNIER und POTTER 1979).

Verglichen mit den Temperaturen an den Quellenaustritten bzw. mit Temperaturen, die durch verschiedene Extrapolationsmethoden erhalten wurden, erbrachten nur die

Tab. 4.3: Gemessene Thermalwassertemperatur am Queraustritt sowie die mit Hilfe des «Geothermometers» errechnete und extrapolierte Temperatur der tiefen Thermalwasserkomponente (in °C)

Quelle	mittlere Temperatur	extrapolierte Temperatur	Temp. SiO ₂ Chalzedon	Temp. SiO ₂ Quartz	Temp. Na-K-Ca-Mg
Baden	48	50	81	110	74
Schinznach	32	38	37	69	-

Tab. 4.4: Liste der Edelgaskonzentrationen (in cm³ STP* pro cm³ Wasser; für die Gasphase in Baden in cm³ pro cm³ des Gesamtgehaltes)

Quelle	Probennummer	He x 10 ⁻⁸	Ne x 10 ⁻⁸	Ar x 10 ⁻⁴	Kr x 10 ⁻⁸	Xe x 10 ⁻⁸	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	Ar atm** x 10 ⁻⁴	Ar rad** x 10 ⁻⁴
Baden Limmat (Wasser)	662	9100 ± 700	7,8 ± 0,4	2,00 ± 0,2	7,9 ± 0,6	1,06 ± 0,06	317 ± 4	1,93	0,07
	663	7400 ± 600	5,8 ± 0,3	1,80 ± 0,2	6,9 ± 0,5	0,90 ± 0,06	316 ± 4	1,68	0,12
	671	8900 ± 700	7,4 ± 0,4	1,66 ± 0,2	5,5 ± 0,5	0,75 ± 0,06	320 ± 4	1,53	0,13
Baden Verenahof (Gas)	679	10600 ± 750	9,0 ± 0,5	2,20 ± 0,2	9,7 ± 0,7	1,60 ± 0,10	310 ± 4	2,10	0,10
	692	9700 ± 700	8,4 ± 0,5	1,86 ± 0,2	8,1 ± 0,6	1,00 ± 0,06	312 ± 4	1,76	0,10
	801			58,4 ± 5			315 ± 4	54,8	3,6
	803	330000 ± 2300	68 ± 4	75,0 ± 6,5	135 ± 10	16 ± 1	313 ± 4	70,8	4,2
Lostorf Bohrung F3	675	12 ± 5	36 ± 2	3,44 ± 0,3	13,3 ± 1	1,4 ± 0,10	300 ± 4		
	691	16 ± 7	42 ± 3	3,50 ± 0,3	12,1 ± 1	1,2 ± 0,1	316 ± 4	3,27	0,23
Lostorf Bohrung F4	676	70 ± 30	33 ± 2	3,50 ± 0,3	13,7 ± 1	1,6 ± 0,1	299 ± 4		
	690	36 ± 20	21 ± 2						
	693	30 ± 15	27 ± 2	3,00 ± 0,3	11,0 ± 1	1,2 ± 0,1	306 ± 4	2,90	0,10
Säckingen	677	10500 ± 800	20 ± 1	2,70 ± 0,2	10,4 ± 1	1,3 ± 0,1	316 ± 4	2,52	0,18
	694	13600 ± 1000	34,0 ± 2,0	3,40 ± 0,3	12,3 ± 1,0	1,3 ± 0,10	300 ± 4		
Zurzach Bohrung Z2	674	11000 ± 800	31 ± 2	3,70 ± 0,3	14,0 ± 1	1,6 ± 0,1	297 ± 4		
	689	10000 ± 700	32 ± 2	3,64 ± 0,3	11,3 ± 0,8	1,2 ± 0,1	303 ± 4	3,55	0,09
Yverdon	804	150 ± 10	38 ± 2	6,60 ± 0,6			292 ± 4		
	809	130 ± 10	38 ± 2	6,60 ± 0,6	12,0 ± 1,0	1,7 ± 0,1	292 ± 4		
	800	55 ± 10	30 ± 2	5,60 ± 0,5	8,6 ± 0,6	1,0 ± 0,1	304 ± 4	5,44	0,16
	806	40 ± 10	21 ± 1	4,06 ± 0,4	7,8 ± 0,6	1,2 ± 0,1	300 ± 4		
wassergesättigte Luft auf Meeresebene bei 10°C		4,8	21	3,90	9,4	1,3	295,5		

* Standard-Temperatur und -Druck

** berechnet für den Fall von ⁴⁰Ar/³⁶Ar > 300

Thermalwässer von Baden und in etwas untergeordneter Weise diejenigen von Schinznach Bad Hinweise auf deutlich erhöhte Temperaturwerte in den tiefen Grundwasserleitern. In der Tabelle 4.3 sind die mittels verschiedenen »Geothermometern« errechneten bzw. für die tiefe Thermalwasserkomponente extrapolierten Temperaturwerte zusammengestellt.

Für die Quellen von Baden wurden verschiedene Reservoirtemperaturen einerseits aufgrund der Extrapolation des regionalen Temperaturgradienten, andererseits mittels »Geothermometer« bestimmt. Es zeichnen sich dabei zwei Temperaturbereiche ab: Temperaturen zwischen 50 bis 80°C und grösser als 100°C.

Tab. 4.5: Isotopenverhältnisse der Edelgase (NEFF 1984)

Quelle	Probennummer	Ne		Ar		Kr			Xe				
		20/22	22/21	40/36	36/38	82/84	83/84	86/84	129/132	130/132	131/132	134/132	136/132
Baden Limmat (Wasser)	662	10,1	34,8	317	5,6	0,18	0,18	0,30	0,98	0,18	0,80	0,38	0,32
	663	10,0	38,2	316	5,6	0,17	0,18	0,29	0,98	0,15	0,82	0,39	0,34
	671	9,9		320	5,5	0,19	0,19	0,3	0,97	0,17	0,80	0,37	0,31
Baden Verenahof (Gas)	679	8,9		310	5,6	0,16	0,17	0,26	0,99	0,18	0,79	0,40	0,33
	692	9,8		312	5,8	0,18	0,19	0,29	0,98	0,18	0,80	0,39	0,32
	801			315									
	803			313	6,2	0,19	0,19	0,32					
Lostorf Bohrung F3	675	10,1	34,8	300	5,7	0,18	0,18	0,31	0,98	0,17	0,80	0,38	0,34
	691	10,3	36,2	316	5,5	0,18	0,18	0,31	1,00	0,15	0,81	0,38	0,31
Lostorf Bohrung F4	676	10,0	37,1	299	5,9	0,20	0,19	0,31	0,97	0,15	0,79	0,37	0,32
	690	10,1	34,4										
	693	10,2	35,9	306	5,9	0,19	0,19	0,30	0,98	0,16	0,77	0,38	0,31
Säckingen	677	10,1	35,5	316	5,7	0,18	0,19	0,31	0,96	0,18	0,81	0,39	0,32
	694	10,1	37,5	300	6,1	0,19	0,19	0,31	0,96	0,16	0,76	0,37	0,32
Zurzach Bohrung Z2	674	9,8	35,5	297	5,4	0,18	0,19	0,31	0,98	0,18	0,8	0,38	0,32
	689	10,2	39,6	303	5,4	0,18	0,20	0,31	0,98	0,14	0,77	0,38	0,34
Yverdon	804	9,9		292	5,7								
	809	10,1		292	5,4	0,22	0,20	0,32					
	800	10,2		304	5,3	0,22	0,22	0,34					
	806	10,6		300	5,4	0,21	0,22	0,31					
wasserge- sättigte Luft auf Meeres- niveau bei 10 °C		9,9	34,1	295,5*	5,4	0,20	0,20	0,30	0,98	0,15	0,79	0,39	0,33
		+0,4	+0,6	+4	+0,1	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01	+0,01

* Das $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnis ist für Luft allgemein gültig und wurde für die Vereinheitlichung der Daten verwendet. Alle anderen Isotopenverhältnisse für Luft stellen gemessene Mittelwerte dar.

Dies deutet darauf hin, dass das thermische System von Baden ein intermediäres Reservoir mit einer Temperatur um 50°C besitzt. Bei einem mittleren geothermischen Gradienten von 45°C/km dürfte dieses Reservoir in einer Tiefe von ca. 1000 m liegen.

Die chemische Zusammensetzung der Thermalwässer dieses intermediären Reservoirs weist auf einen atmosphärischen Ursprung des Wassers hin, wobei eine Anreicherung an He^4 und Ar^{40} sowie an O^{18} vorliegt. Letzteres lässt die Vermutung zu, dass das intermediäre Reservoir auch Zufluss von einer sehr alten und tiefen Komponente erfährt. Das Vorhandensein einer grossen Menge von Gas, welches in der Verenaquelle von Baden in der Form von Gasblasen beobachtbar ist, lässt ebenfalls auf ein geothermisches Reservoir in grosser Tiefe schliessen (MAZOR et al. 1987).

Die chemischen Geothermometer sind somit nicht die einzigen Indikatoren, dass Thermalwasserkomponenten mit höheren Temperaturen vorhanden sind. Darauf deutet auch eine leichte Anreicherung von Sauerstoff O^{18} in den Thermalwässern von Baden – im Vergleich zur Eichgeraden der Niederschläge – sowie deren Gehalt an Edelgasen hin.

4.6 Edelgase

Durch die Auswertung der Edelgaskonzentrationen in den Thermalwässern, was bis heute in der Schweiz noch selten durchgeführt wurde, konnten ebenfalls zusätzliche Auskünfte über den Ursprung, das Alter sowie die Wärmequelle der tiefen Thermalwasserkomponente erhalten werden.

Tabelle 4.4 liefert eine Zusammenstellung der gemessenen Edelgaskonzentrationen und Tabelle 4.5 zeigt die Isotopenverhältnisse der Edelgase.

Generell entspricht der in den Thermalwässern gelöste Gehalt an Edelgasen derjenigen Zusammensetzung, wie sie in der Atmosphäre des Untersuchungsgebietes auftritt, was erwartungsgemäss auf einen meteorischen Ursprung dieser Thermalwässer hindeutet.

Figur 4.1 zeigt die Beziehung zwischen der korrigierten Konzentration an Kohlenstoff C^{14} , d. h. indirekt die Beziehung zwischen dem Alter der tiefen Thermalwasserkomponente und der Konzentration an radiogenem Helium.

Das Auftreten von radiogenem Helium im Untersuchungsgebiet ist ein Phänomen, wie es bereits sehr häufig in (geologisch) alten Thermalwässern anderer Gebiete festgestellt werden konnte (MAZOR und WASSERBURG 1965). Im Falle des Projektgebietes kann damit indirekt das beträchtliche Alter der Thermalwässer, wie es bereits mit Hilfe der C^{14} -Methode bestimmt wurde, bestätigt werden (MAZOR et al. 1986).

Spezielle Aufmerksamkeit wurde dem Studium der Thermalwasserquellen von Baden gewidmet. Einerseits gibt es von hier ein beachtliches Datenmaterial und andererseits scheint das geothermische Potential sehr interessant zu sein, um hier weitere Studien in der Zukunft durchzuführen. Im Badener Thermalwasser ist eine deutliche Gasphase beobachtbar, die sich an den Quellaustritten durch die Bildung zahlreicher Gasblasen bemerkbar macht. Diese Gasbläschen enthalten in erster Linie N_2 , CO_2 , O_2 , H_2 , CH_4 (in abnehmender Menge) sowie auch die folgenden Edelgase: He, Ne, Ar, Kr, Xe. Wie im Falle der flüssigen Phase, lässt auch die Konzentration von Edelgasen in der gasförmigen Phase, auf eine meteorische Herkunft der Thermalwässer bzw. die Anreicherung an Helium auf deren radioaktiven Ursprung schliessen. Es ist daher wahrscheinlich, dass diese Bläschenbildung an der Austrittsstelle die Entgasung einer geothermischen Tiefenkomponente darstellt. Die Zusammensetzung dieser gasförmigen Phase lässt auf den Zusammenhang mit einer «versunkenen Fumarole» (= «drowned fumarole») schliessen (der Ausdruck «Fumarole» ist hier im ganz generellen Sinne zu verstehen und deutet nicht notwendigerweise auf eine Verbindung mit vulkanischen Manifestationen hin (MAZOR et al. 1987).

Ein leichter Überschuss an Helium ist indessen bei den Wässern von Lostorf bzw. ein sehr deutlicher Überschuss bei den Quellen von Baden, Zurzach und Säckingen feststellbar. Diese Anreicherung an Helium ist auf eine Zufuhr von radiogenem Helium zurückzuführen, welches beim Zerfall von Uran, Thorium und Kalium K^{40} in Tiefengesteinen entsteht. Selbst eine Herkunft des Heliums aus dem Erdmantel lässt sich nicht ausschliessen.

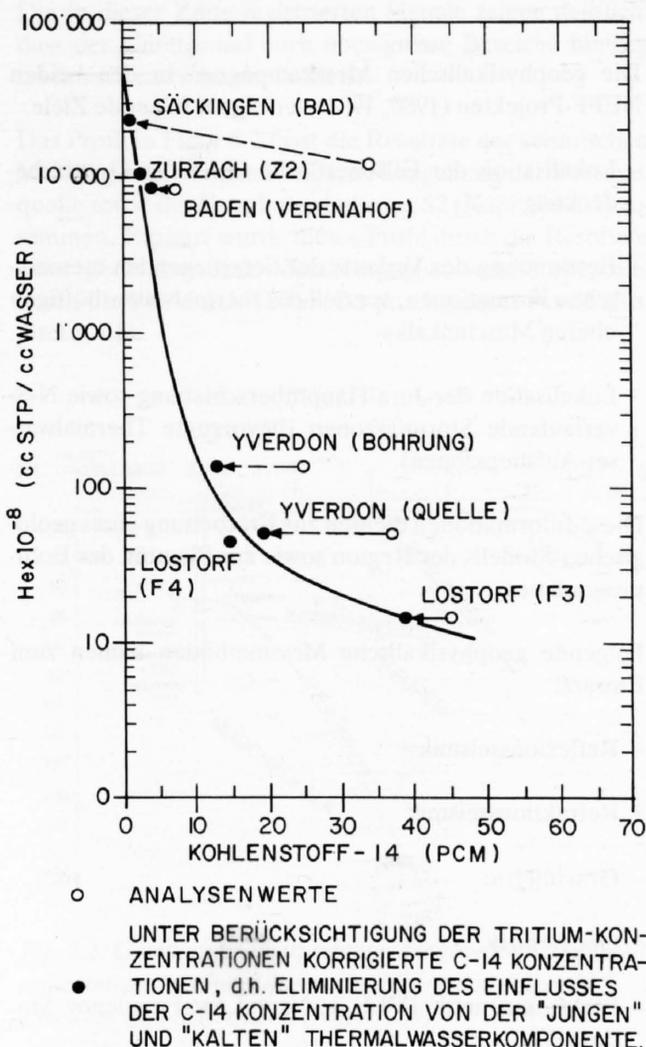


Fig. 4.1: Beziehung zwischen der Konzentration an radiogenem Helium und C^{14} in den «alten» Thermalwasserkomponenten (im weiteren Untersuchungsgebiet und in Yverdon; NEFF 1984)

Bei jeder Quelle ist in der «alten» Thermalwasserkomponente die C^{14} -Konzentration umgekehrt proportional zu derjenigen von radiogenem Helium.

5. OBERFLÄCHENGEOPHYSIK

J. C. Griesser [1, 2] und L. Rybach [1]

Die geophysikalischen Messkampagnen in den beiden NEFF-Projekten (1980, 1984) verfolgten folgende Ziele:

- Lokalisation der Felsoberfläche unter der Quartärbedeckung
- Bestimmung des Verlaufs der tieferliegenden mesozoischen Formationen, speziell des thermalwasserhöffigen oberen Muschelkalks
- Lokalisation der Jura-Hauptüberschiebung sowie N-S-verlaufende Störungszonen (bevorzugte Thermalwasser-Aufstiegszonen)

Diese Informationen dienten zur Erarbeitung eines geologischen Modells der Region sowie zur Planung des Bohrprogrammes.

Folgende geophysikalische Messmethoden kamen zum Einsatz:

- Reflexionsseismik
- Refraktionsseismik
- Gravimetrie
- Geoelektrik
- Elektromagnetik (VLF = Very Low Frequency Methode)

Die Messungen erfolgten in folgenden Untersuchungsgebieten:

- Schinz nach Bad: Im weiteren Bäderareal zwischen Aare und der SBB (Figur 5.1)
- Hausen: Gebiet zwischen Habsburg – Scherz – Hausen – südlicher Stadtrand von Brugg (Figur 5.3)
- Birmenstorf: Reussklus zwischen Gebenstorf und der Autobahnbrücke bei Mülligen (Figur 5.7)
- Baden: Stadtgebiet Baden – Ennetbaden (Figur 5.9)

Die Durchführung der reflexionsseismischen Messungen wurde in Hausen der französischen Firma Compagnie

Générale de Géophysique (CGG) übertragen. Eingesetzt wurde das sogenannte Mini-Sosie-Verfahren. Es handelt sich dabei um ein leichtes Untersuchungssystem zur Erzeugung hochauflösender seismischer Profile mit einer maximalen Eindringtiefe von ca. 1000 m (CGG 1979). Die Messungen auf dem Areal des Thermalbades Schinz nach wurden 1978 von der Prakla Seismos durchgeführt (NEFF 1980).

Folgende Methoden wurden in den einzelnen Gebieten eingesetzt:

Gebiet	Reflexionsseismik	Refraktionsseismik	Gravimetrie	Geoelektrik	VLF
Schinz nach 1)	x	x	x	x	
Hausen 2)	x	x			x
Birmenstorf 1)		x	x	x	
Baden 2)			x		

1) Arbeiten im Rahmen des NEFF-Projekts 1980

2) Arbeiten im Rahmen des NEFF-Projekts 1984

Die refraktionsseismischen Untersuchungen wurden vom Institut für Geophysik der ETH Zürich durchgeführt. Diese Messungen dienten hauptsächlich dazu, die Felsoberfläche unter dem Quartär zu lokalisieren sowie Informationen über den Geschwindigkeitsverlauf seismischer Wellen in den oberflächennahen Schichten zu erhalten.

Bei der Very-Low-Frequency-Methode (VLF) handelt es sich um eine elektromagnetische Prospektionsmethode, die es erlaubt, an einem Messpunkt die Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) des elektrischen Gesteinswiderstandes zu messen. Die VLF-Methode eignet sich deshalb zur Lokalisierung von untiefen Klüftzonen (FISCHER et al. 1983).

In den Jahren 1981/82 wurden durch die Schweizerische Geophysikalische Kommission (SGPK) und die Nagra in der Nordschweiz umfangreiche reflexionsseismische Untersuchungen durchgeführt. Durch einen Austausch ausgewählter geophysikalischer Daten konnten zusätzliche Informationen gewonnen werden.

[1] Institut für Geophysik, ETH Zürich

[2] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

5.1 Reflexionsseismik

5.1.1 Region Schinznach

Im Auftrage der Bad Schinznach AG führte die PRAKLA-SEISMOS GmbH gegen Ende des Jahres 1978 eine reflexions- und refraktionsseismische Vermessung auf dem Areal des Thermalbades Schinznach durch (Figur 5.1). Die Anordnung der Datenpunkte erfolgte flächenhaft (3D-Seismik).

Der geophysikalischen Vermessung war die Aufgabe gestellt, in der Nähe der bereits produzierenden Thermalquelle tektonische Strukturen, insbesondere Störungen, zu erfassen, die für das Zirkulieren von Thermalwässern von Bedeutung sind und die das Abteufen einer oder mehrerer Bohrungen sinnvoll erscheinen lassen.

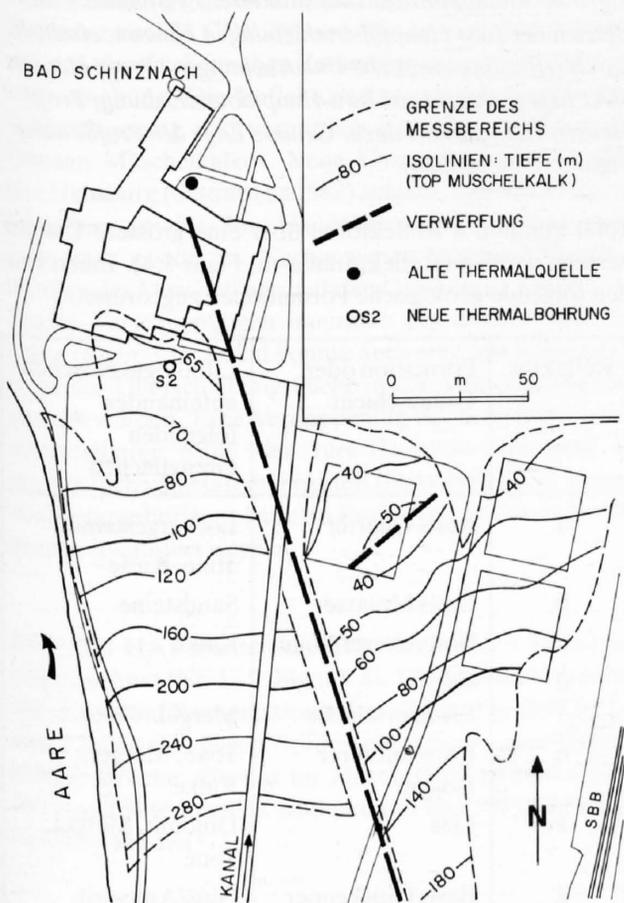


Fig. 5.1: Strukturkarte des Daches des Oberen Muschelkalles, ermittelt durch reflexionsseismische Messungen (NEFF 1980)

Die seismische Untersuchung der Umgebung der Thermalquelle erlaubte die Kartierung zweier verschiedener Reflektoren (Keuper bzw. Top-Muschelkalk) und der lokalen tektonischen Verhältnisse. Als Beispiel ist die Isohypsenkarte des Top-Muschelkalles dargestellt (Figur 5.1). Eine NNW-SSE-verlaufende, vermutlich gegen WSW steil fallende Querstörung zur Jura-Hauptüber-

schiebung versetzt den Top-Muschelkalk innerhalb des Badareals um 70 bis 160 m. Neben dieser Querstörung, deren Verlauf wegen ihrer parallelen Lage zu den Messprofilen etwas unsicher ist, verläuft eine zweite kleine Störung schräg im Osten dazu. Diese ist als Abschiebung zu interpretieren, was auf eine episodische Dehnungsphase hindeutet.

Die in dieser Zone registrierten Signale zeigen deutlich, dass der Untergrund auch über grosse Bereiche hinweg tektonisch stark beansprucht ist.

Das Profil in Figur 5.2 fasst die Resultate der seismischen Messungen in der unmittelbaren Umgebung der Thermalquelle sowie der Forschungsbohrung S2 (Kapitel 6.2.1) zusammen. Ergänzt wurde dieses Profil durch die Resultate einer geoelektrischen Messkampagne, welche ebenfalls durch die PRAKLA-SEISMOS durchgeführt wurde (Kapitel 5.4.1).

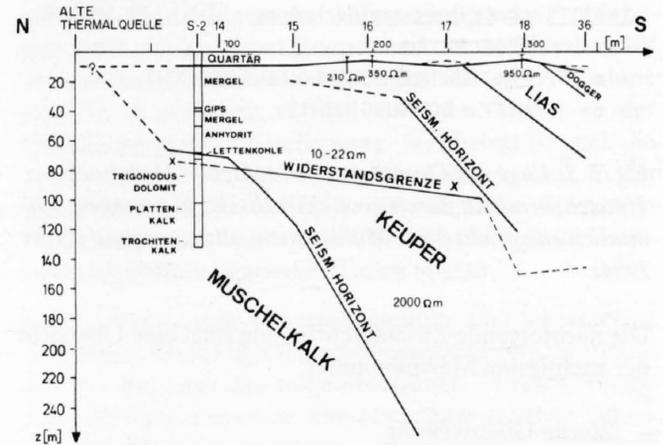
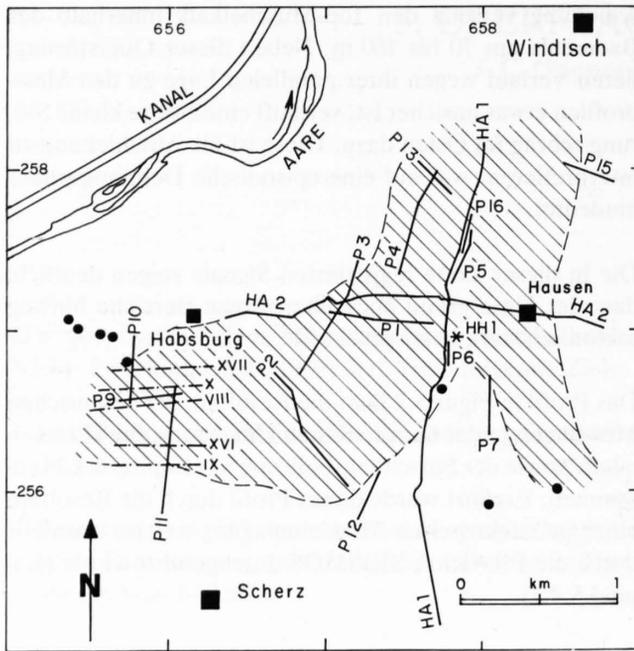


Fig. 5.2: Geologische Interpretation der geoelektrischen und reflexionsseismischen Untersuchungen entlang eines N-S-Profiles in Bad Schinznach (NEFF 1980)

5.1.2 Region Hausen

Figur 5.3 zeigt die Lage aller geophysikalischen Profile der Region Hausen, welche im Rahmen des geothermischen NEFF-Projektes im Jahre 1984 vermessen wurden (bei den Geoelektrikprofilen handelt es sich um Messungen des Institutes für Geophysik der ETH Zürich aus dem Jahre 1955).

Durch die Compagnie Générale de Géophysique (CGG) wurden zwei Profile (HA1 und HA2) mit einer Gesamtlänge von 5,5 m reflexionsseismisch vermessen (Figur 5.3). Die Lage der beiden Profile HA1 und HA2 wurde so gewählt, dass sie von Strassen und Wegen aus vermessen werden konnten, da dort ein bedeutend besseres Inputsignal erreicht wird. Diese Profile wurden zudem noch refraktionsseismisch ausgewertet. Die Feldaufnahmen erfolgten nach der eingangs erwähnten Mini-Sosie-Methode.



- P15 REFRAKTIONSSEISMIK PROFIL
- HA1 REFLEXIONSSEISMIK PROFIL
- X1 GEOELEKTRIK
- EXISTIERENDE BOHRUNG, FELS ERREICHT
- * NEFF - BOHRUNG (HH1)
- ▨ QUARTÄRMULDE

Fig. 5.3: Lage der Quartärmulde im Gebiet Habsburg-Hausen, ermittelt durch geophysikalische Messungen. Vermutlich entspricht diese Mulde einem alten Aarelauf (NEFF 1984)

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt eine Übersicht der wichtigsten Messparameter:

- 12fache Überdeckung
- Registrierung auf 24 Spuren
- Geophongruppenabstand: 15 m
- Anzahl Geophone pro Gruppe: 18
- Vibrationspunktabstand: 15 m
- Anzahl Vibrationen pro Messpunkt: 3000 (bei Refraktionsseismik 300-6000)
- Registrierungszeit: 1000 ms
- Low-cut-Filter: 30 Hz
- Anti-Aliasing-Filter: 250 Hz

Das Processing beinhaltet folgende Schritte: Auswertung der Refraktionsseismik, um den Geschwindigkeitsverlauf im Quartär zu bestimmen; statische Korrekturen; dynamische Korrektur (NMO-Korrektur); Durchführung einer automatischen statischen Residualkorrektur (Programm SATAN); Stapelung; Filtertests; Migration der Zeitsektion; Konversion der Zeitprofile in Tiefenprofile.

Figur 5.4 zeigt die Interpretation der Profile HA1 und HA2, wobei auch die Informationen der Bohrung HH1 mit berücksichtigt wurden. Des Weiteren stand zusätzlich die Auswertung des reflexionsseismischen Profils 82-NF-30 der Nagra zur Verfügung. Trotzdem ist der Tiefenverlauf der Formationen im Überschiebungsbereich wegen

der komplizierten geologischen Verhältnisse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Zur besseren Orientierung ist für jedes Profil die CDP-Numerierung (Common Depth Point) angegeben.

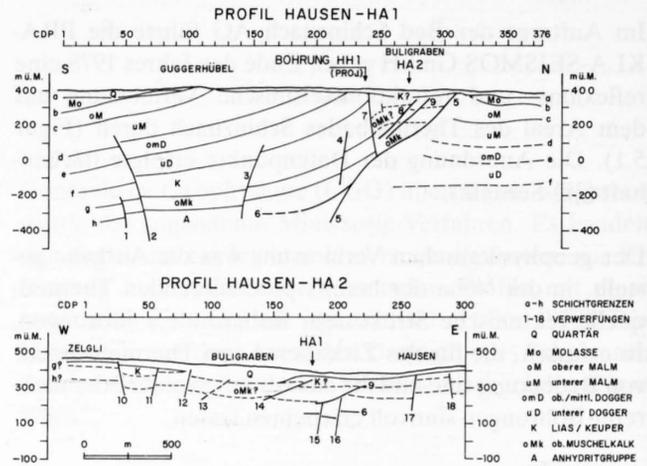


Fig. 5.4: Stratigraphische und strukturelle Verhältnisse im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung in Hausen, ermittelt durch reflexionsseismische Untersuchungen (Profil Hausen HA1 liegt senkrecht zur Jura-Hauptüberschiebung, Profil Hausen HA2 parallel dazu. Genaue Lage der Profile siehe Figur 5.3; NEFF 1984)

Total konnten 8 Reflektoren über eine grössere Distanz verfolgt werden (Reflektoren a-h; Figur 5.4). Ihnen wurden folgende geologische Formationen zugeordnet:

Reflektor	Formation oder Grenzschicht	Lithologie zwischen aufeinanderfolgenden Grenzflächen
a	Basis Quartär	Lockergesteine, Tone, Kiese
b	Basis Molasse	Sandsteine
c	Basis oberer Malm	Kalke
d	Basis Effingerschicht	Mergel
e	Basis mittlerer Dogger	Tone, Mergel, Kalke
f	Lias	Dolomit, Mergel, Tone
g	Basis Gipskeuper	Gips/Anhydrit, Tone, Mergel, Kalk
h	Basis oberer Muschelkalk	Kalke, Dolomite, Evaporite, Mergel

Diese Reflektoren liegen alle im Bereich bis 400 ms doppelter Laufzeit. Tiefere Reflektoren treten im Profil HA1 ebenfalls noch auf, doch ist ihre geologische Zuordnung sehr spekulativ; sie wurden deshalb in Figur 5.4 nicht mehr eingezeichnet. Es handelt sich dabei vermutlich um Reflektoren der unteren Trias und evtl. des Permokarbons.

Das N-S-Profil HA1

Die mesozoischen Sedimente sind von einer quartären Schicht von variabler Mächtigkeit bis zu 40 m überdeckt. Südlich der Jura-Hauptüberschiebung konnten alle oben definierten Horizonte gefunden werden. Nördlich davon ist der tiefste nachgewiesene Horizont der Lias. Zwischen CDP 1 und 150 fallen die Schichten mit maximal 15°, im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung bis 45° gegen Süden ein. Nördlich der Jura-Hauptüberschiebung liegen die Schichten mehr oder weniger horizontal. Eine Aufwölbung dieser Schichten im unmittelbaren Bereich der Jura-Hauptüberschiebung ist wahrscheinlich. Nördlich und östlich der Habsburg wurde in Aufschlüssen ein Nordfallen des Malms von bis zu 35° gemessen (SCHINDLER 1982). Zwischen CDP 150 und 250 tritt eine leichte Verdickung des Gipskeuper gegenüber dem Südteil auf, was auf interne Überschiebungen hindeutet.

Nicht eindeutig geklärt sind die Lagerungsverhältnisse im Bereich zwischen CDP 240 und 300. Es handelt sich dabei um den oberflächennahen Zentralbereich der Jura-Hauptüberschiebung. Die Reflektoren zeigen eine horizontale Schichtlagerung und vermutlich eine Verschuppung des Oberen Muschelkalkes. Neue Untersuchungen westlich der Habsburg (SCHINDLER 1982) zeigten, dass die Zone unmittelbar an der Jura-Hauptüberschiebung tektonisch sehr stark gestört ist. Nachgewiesen wurden Überschiebungen des Muschelkalks auf den Gipskeuper sowie 2- bis 3fache Verschuppungen innerhalb des oberen Muschelkalks (Figur 3.1). Lokal konnte auch eine fast horizontale Lage der Überschiebungsfäche in der Anhydritzone festgestellt werden. Eine Verdoppelung der Schichtpakete in unmittelbarer Nähe der Jura-Hauptüberschiebung ist auch östlich von Hausen bekannt (NEFF 1980). Der Hauptabscherungshorizont kann im Profil HA1 in der Anhydritgruppe lokalisiert werden.

Im Profil HA1 wurden die neun wichtigsten Störungen eingezeichnet (Nr. 1–9; Figur 5.4). Die Mehrzahl der Brüche deutet auf Kompressionstektonik hin. Die Brüche 1, 2 und 7 fallen steil gegen Norden ein. Ebenso eine Vielzahl kleiner Brüche, die nur im Muschelkalk zwischen CDP 150 und 230 feststellbar sind und in Figur 5.4 nicht eingezeichnet wurden.

Mit Ausnahme der Struktur Nr. 5 scheinen alle Brüche in der Anhydritzone zu beginnen. Einzig Bruch Nr. 5 lässt sich bis in die tiefsten Reflektoren verfolgen und dürfte seinen Ursprung in den prätriadischen Formationen haben. Die meisten Störungen keilen in der plastischen Zone des Keupers aus. Die eigentliche Überschiebungsfäche dürfte Nr. 5 (zusammen mit Nr. 6) sein, wobei im oberflächennahen Bereich eine Aufschuppung in mehrere Schollen eintritt. Dieses Phänomen lässt sich sowohl östlich wie westlich des Profils durch Aufschlüsse belegen. Nördlich der Jura-Hauptüberschiebung lassen sich Störungen nicht mehr eindeutig nachweisen.

Das E-W-Profil HA2

Dieses Profil hatte zum Ziel, N-S-verlaufende Störungszonen zu lokalisieren (Figur 5.4). Leider lässt sich die Datenqualität nicht mit derjenigen in Profil HA1 vergleichen. Aufgrund des steilen Einfallens der Schichten parallel zum Profil wurden seitliche Reflexionen registriert, die auch durch spezielle Verarbeitungsschritte (Migration) nicht entfernt werden konnten.

Das Profil kreuzt die beiden in der Refraktionsseismik festgestellten Quartärmulden (Figur 5.3). Bei der tieferen westlichen Mulde handelt es sich um einen ehemaligen Aarelauf. Es konnten nur zwei oberflächennahe Reflektoren entlang des gesamten Profilverlaufs verfolgt werden. Es handelt sich dabei um das Dach und die Basis des Oberen Muschelkalkes (Reflektoren g und h, Figur 5.4). Der gestörte Verlauf ist auf die z. T. intensive Verschuppung im Zentralbereich der Jura-Hauptüberschiebung zurückzuführen.

Zusätzlich wurden neun dominierende Störungen im Oberen Muschelkalk oder darunter festgestellt. Die Versetzung Nr. 10 ist in einem Aufschluss nördlich des Profils belegt; dort stossen direkt Keuper und oberer Muschelkalk aneinander. Die anderen Störungen, die mit Ausnahme von Nr. 13 praktisch vertikal verlaufen, treten an der Oberfläche nicht in Erscheinung. Gut belegt ist auch die Störung Nr. 17 bei Hausen, die den Muschelkalk in der westlichen Scholle um 30 m absenkt. Die Störungen Nr. 15 und 16 sind unter dem Oberen Muschelkalk lokalisiert und dürften in grössere Tiefen reichen.

Figur 5.5 zeigt eine Zusammenstellung aller lokalisierten Störungen. Die Hauptüberschiebungszone (Nr. 5) stimmt gut mit der Lage der aufgeschlossenen Überschiebungszone im Westen überein. Die scheinbare dextrale Versetzung der Hauptüberschiebung an der N-S-Störung Nr. 17 ist eine Folge der vertikalen Versetzung des Muschelkalkes um ca. 20 m an diese Störung.

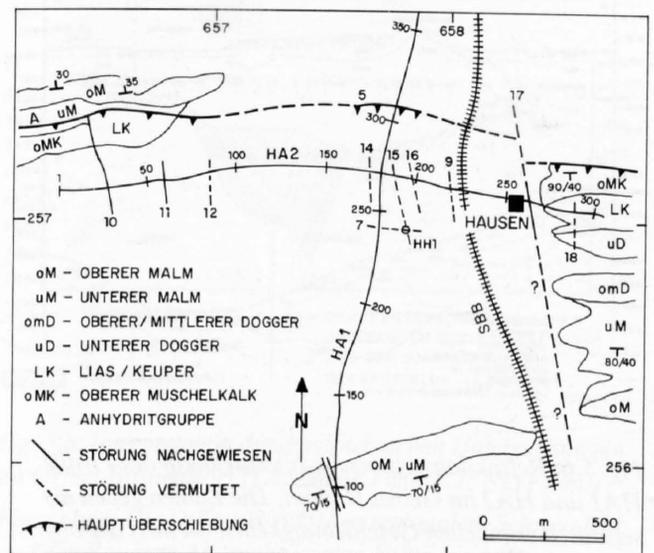


Fig. 5.5: Lage von Störungen an der Felsoberfläche im Gebiet Hausen, ermittelt aufgrund von Aufschlüssen und reflexionsseismischen Untersuchungen (SCHINDLER 1982 und NEFF 1984)

Der Standort der geothermischen Explorationsbohrung HH1 in den Muschelkalk wurde an der vermuteten Kreuzung der Störung Nr. 7, die einen Ast von Nr. 6 darstellt, mit Störung Nr. 15 gewählt. Man hoffte, im Bereich dieser beiden tiefgreifenden Störungen auf Zonen erhöhter Durchlässigkeit zu treffen.

Refraktionsseismische Auswertung der beiden Profile HA1 und HA2

Das Profil HA2 wurde speziell refraktionsseismisch vermessen, um genaue Informationen über den Quartärverlauf zu erhalten. Aber auch in HA1 wurden seismische Ersteinsätze ausgewertet. Da aber keine Gegenschüsse vorhanden sind, konnten hier die Geschwindigkeiten und die Lage der Refraktoren nur annähernd bestimmt werden. Figur 5.6 zeigt die Resultate dieser Auswertung.

Im Quartär lassen sich generell 2 Schichten seismisch unterscheiden: Eine erste Schicht mit Geschwindigkeiten von 400–1100 m/s, bestehend aus unverfestigten Sedimenten, welche über dem Grundwasserspiegel liegen. Darunter folgt eine zweite Quartärschicht, welche sich im grundwassergesättigten Bereich befindet und bereits eine gute Kompaktion aufweist (Geschwindigkeiten 1500–2500 m/s). Unter diesen beiden Quartärschichten liegen die mesozoischen Formationen mit seismischen Geschwindigkeiten von 2500 m/s (Mergel) bis 4800 m/s (Kalke).

Deutlich kommt in der Mesozoikumscherfläche die Quartärmulde des vorriss-eiszeitlichen Aarelaufs sowie die Rinne bei Hausen zum Ausdruck. Bei Hausen wurde ebenfalls eine N-S-Störung im Mesozoikum festgestellt, die mit der Störung Nr. 17 in Figur 5.6 übereinstimmt. Innerhalb des Mesozoikums konnten nur noch vereinzelte Schichtgrenzen lokalisiert werden.

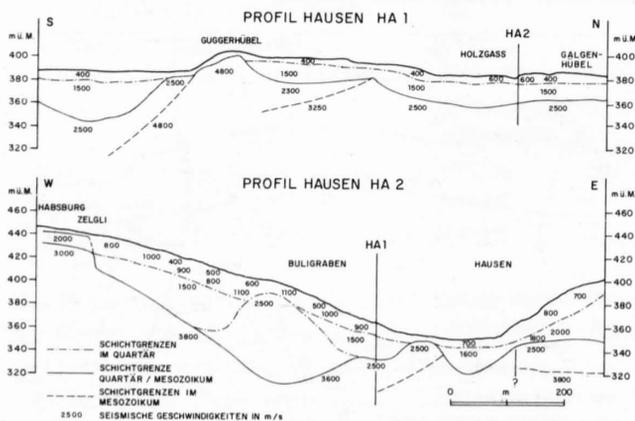


Fig. 5.6: Refraktionsseismische Interpretation der Profile HA1 und HA2 im Gebiet Hausen. Die Zahlen geben die seismisch ermittelten Geschwindigkeiten (in m/s) der obersten Gesteinsformationen an. Im Profil HA2 zeigt sich die Form des vorriss-eiszeitlichen Aarelaufs östlich von Habsburg sowie einer kleinen Rinne bei Hausen in der Mesozoikumschichtoberfläche (genaue Lage der Profile siehe Fig. 5.3; NEFF 1984)

5.2 Refraktionsseismik

Im NEFF-Projekt 1980 lag der Schwerpunkt der geophysikalischen Untersuchungen bei der Refraktionsseismik. Dies führte bei Birmenstorf und bei Schinznach zu einer besseren Kenntnis des Verlaufs der Felsoberfläche sowie zur Lokalisation von N-S-verlaufenden Störungszonen. Die Refraktionsseismik lieferte aber nur wenig zusätzliche Informationen über die Lage tieferer mesozoischer Formationen. In Hausen wurde die Refraktionsseismik ebenfalls hauptsächlich zur Lokalisation der Felsoberfläche unter dem Quartär eingesetzt.

5.2.1 Region Schinznach

Das Aaretal bei Schinznach ist relativ flach und breit. Die grösste Mächtigkeit der Lockermaterialfüllung beträgt entlang eines alten Flussbettes der Aare ca. 30 m, meistens ist sie jedoch wesentlich kleiner, lokal sogar weniger als 15 m. Innerhalb des Mesozoikums sind teilweise steil abfallende Schichtgrenzen erkennbar. Eine geophysikalische Kartierung derselben ist wegen der geringen Geschwindigkeitskontraste der Schichten und wegen deren Steillage nur schlecht möglich. Neben den längst bekannten, senkrecht zum Aareverlauf streichenden Überschiebungen des Faltenjuras wurde ein neues, ungefähr N-S-verlaufendes, steilstehendes Bruchsystem entdeckt (NEFF 1980). Inwieweit die einzelnen kartierten Störungslinien miteinander zusammenhängen und ob noch mehr zusätzliche Versätze auftreten, kann mit der bestehenden Datendichte nicht bestimmt werden. Bemerkenswert ist die Registrierung einer solchen Störung unmittelbar neben der Thermalquelle von Schinznach Bad (Figur 5.1).

5.2.2 Region Hausen

In der Region Hausen wurden 14 Refraktionsprofile mit einer totalen Länge von über 5 km aufgenommen. Zusammen mit den Ergebnissen der Reflexionsseismik, der Geoelektrik und den bestehenden Bohrungen stellt sich der Verlauf der Felsoberfläche folgendermassen dar (Figur 5.3):

Die Felsoberfläche zeigt im Untersuchungsgebiet zwei Vertiefungen, die durch eine N-S-verlaufende Schwelle im Gebiet Guggerhübel – Tannhübel – Holzgass voneinander getrennt werden. Eine ausgeprägte Vertiefung, der Ur-Aarelauf, zweigt beim Thermalbad Schinznach vom heutigen Aaretal ab, verläuft zuerst südlich von Habsburg gegen Osten, um sich dann nordwärts abbiegend bei Windisch wieder mit dem heutigen Aaretal zu vereinigen. Es handelt sich dabei nicht, wie im NEFF-Projekt 1980 vermutet, um eine schmale tiefe Rinne, sondern um eine breite Mulde, deren maximale Tiefe im Westen bei Kote 330 m liegt, was der Tiefenlage der Felsoberfläche beim Thermalbad Schinznach entspricht.

Die zweite, schmalere Mulde in der Felsoberfläche beginnt östlich des Guggerhübels und vereinigt sich nördlich

des Galgenhüfels mit dem Ur-Aarelauf. Diese Mulde entspricht einer ehemaligen Entwässerungsrinne aus dem Birrfeld (Figur 5.3).

5.2.3 Region Birmenstorf

Das wesentlichste Resultat aus der Seismik ist die Entdeckung einer ca. 200–250 m tiefen Schlucht, welche später weitgehend wieder mit Lockermaterial aufgefüllt worden ist (NEFF 1980). Diese Schlucht wurde ursprünglich von der Aare gebildet und verläuft im Raume Birmenstorf – Mülligen ziemlich genau unter dem heutigen Reussbett. Dieser Einschnitt durch die Hochstruktur ist derart eng, dass seine Basis mit Hilfe der Refraktionsseismik nicht mehr nachgewiesen werden kann, da die registrierten Ersteinsätze an den näherliegenden Seitenwänden und nicht von der Basis der Schlucht refraktiert werden. Zumindest jedoch gibt die Auswertung der Laufzeiten Auskunft über den Verlauf der Schlucht.

Ein Versuch zum Nachweis der Felsoberkante mit Hilfe von Sprengseismik im Bereich dieser Vertiefung wurde ausserhalb der Klus im Birrfeld gemacht, wo ein 720 m langes Profil parallel zur Autobahnbrücke geschossen wurde. Dies unter der Annahme, dass die Felsoberkante der alten Flussrinne sowohl innerhalb wie auch ausserhalb der Reussklus etwa gleich hoch liegt und dass nach der Erosion keine nachträglichen Hebungs- oder Senkungsvorgänge stattgefunden haben. Die Felsoberkante wurde bei 250 m Tiefe angetroffen.

Möglicherweise kann die Felsoberkante an anderen Stellen sogar noch tiefer liegen, da mit dem Messprofil nicht der gesamte in Frage kommende Querschnitt des ehemaligen Aaretales im Birrfeld abgedeckt worden ist. Schon frühere Untersuchungen haben auf eine lokale Vertiefung der Felsoberfläche hingewiesen, so eine Bohrkampagne in der Gegend von Turgi und eine refraktionsseismische Untersuchung bei der Autobahnbrücke Mülligen (Figur 5.7). In beiden Fällen wurde die Basis der Vertiefung nicht erreicht.

5.3 Gravimetrische Untersuchungen

In Birmenstorf und Baden wurden gravimetrische Messungen erfolgreich zur Abgrenzung des Tiefenverlaufs von Quartärmulden eingesetzt. Ein gravimetrisches Profil senkrecht über der Jura-Hauptüberschiebung am linken Aareufer auf der Höhe der Thermalquelle Schinz nach erbrachte dagegen keine interpretierbaren Ergebnisse.

5.3.1 Region Birmenstorf

Zum direkten Nachweis der Tiefe der Schlucht und deren Geometrie bot sich die Gravimetrie als geeignetste Methode an. Aus diesem Grunde wurde ein Profil quer zur Talachse, südlich von Gebenstorf angesetzt. Figur 5.7 zeigt die Lage des gravimetrischen Profils, welches senk-

recht zur Reuss, gerade nördlich der Jura-Hauptüberschiebung, verläuft. Das Profil hat eine Länge von 1200 m mit total 23 Messpunkten.

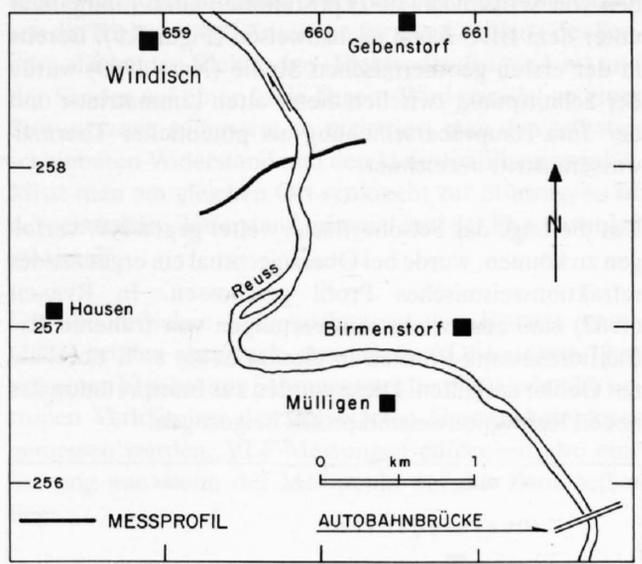


Fig. 5.7: Lage des gravimetrischen Messprofils nördlich von Birmenstorf (NEFF 1980)

Figur 5.8 zeigt die errechnete Form dieser ehemaligen Reussklus mit einer Tiefe von ca. 200 m, wobei ein Dichte-contrast von $0,47 \text{ g/cm}^3$ angenommen wurde. Die Tiefe der Klus ist vom verwendeten Dichtecontrast abhängig und dürfte demzufolge mit einem gewissen Fehler behaftet sein.

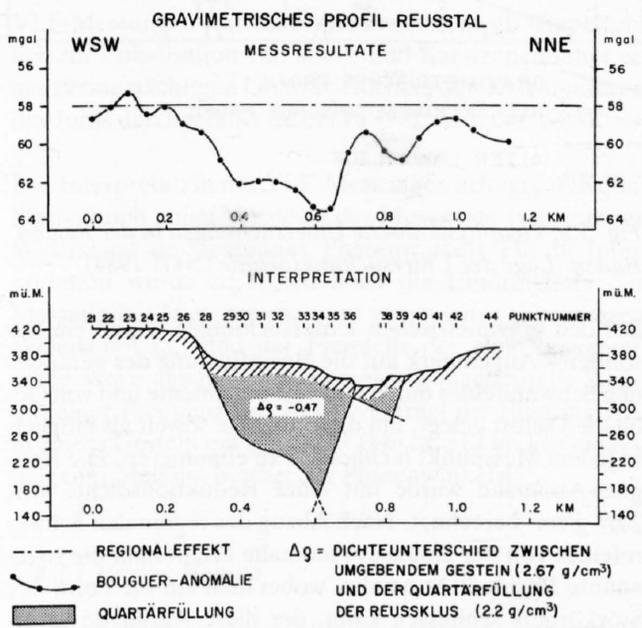


Fig. 5.8: Interpretation der gravimetrischen Untersuchungen im Gebiet Birmenstorf (Lage siehe Figur 5.7; NEFF 1980)

Figur oben: Die Differenz zwischen regionalem Schwerfeld und der Bouguer-Anomalie ist eine Folge der geringeren Dichte des Quartärs in der Reussklus.

Figur unten: Die aus der Schweredifferenz zwischen Bouguer-Anomalie und regionalem Schwerfeld rechnerisch ermittelte Form der Reussklus.

5.3.2 Region Baden

Es gelang mittels gravimetrischer Messungen recht gut, den von SCHINDLER (1977) postulierten alten Limmatlauf unter dem BBC-Areal nachzuweisen (Figur 5.9). Bereits in der ersten geothermischen Studie (NEFF 1980) wurde der Schnittpunkt zwischen dieser alten Limmatrinne und der Jura-Hauptüberschiebung als potentieller Thermalwasseraustritt bezeichnet.

Um die Lage der Felsoberfläche weiter gegen NW verfolgen zu können, wurde bei Obersiggenthal ein ergänzendes refraktionsseismisches Profil geschossen. In RYBACH (1962) sind zusätzliche Auswertungen von früheren Refraktionsseismik-Profilen in diesem heute z. T. überbauten Gebiet enthalten. Diese wurden zur Interpretation des neuen Refraktionsseismikprofils beigezogen.

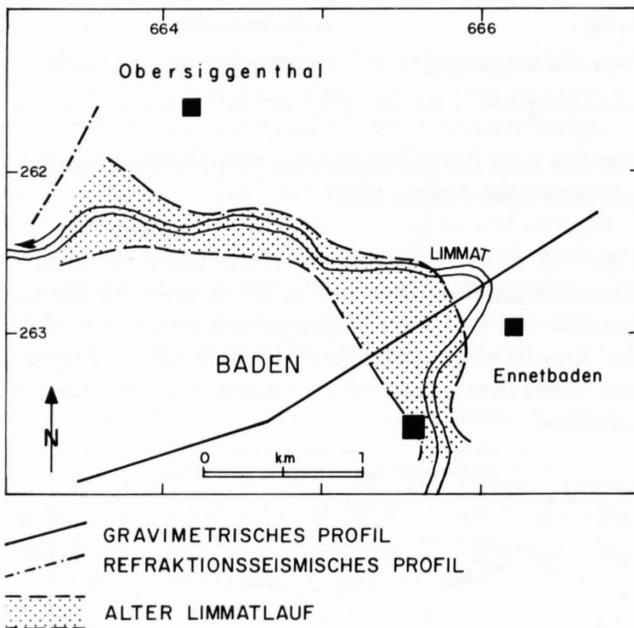


Fig. 5.9: Geophysikalische Untersuchungen in der Region Baden: Lage der Untersuchungsprofile (NEFF 1984)

Bei den gravimetrischen Untersuchungen wurde ein besonderes Augenmerk auf die Beeinflussung des gemessenen Schwerefeldes durch Keller, Fundamente und von Gebäuden selbst gelegt, um diese Effekte soweit als möglich in jedem Messpunkt rechnerisch zu eliminieren. Die Bouguer-Anomalie wurde mit einer Reduktionsdichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ berechnet. Nach Abzug des regionalen Schwerefeldes von der Bouguer-Anomalie erhält man die sogenannte Residual-Anomalie, wobei man auf die Form des Störkörpers schliessen kann, der diese Anomalie verursacht. Die Interpretation der Residual-Anomalie beschränkte sich auf deren Hauptmaximum mit einer Amplitude von $-1,3 \text{ mgal}$.

Die vermutete Limmatrinne konnte somit unter der Annahme einer Dichte für Quartärlagerungen von $2,07 \text{ g/cm}^3$ bestätigt werden. Ihr tiefster Punkt erreicht Kote 320 m. Der heutige Limmatlauf (Wasserspiegel ca. auf Kote 355 m) liegt im Bereich des Profils etwa 500 m östlich des damaligen Laufes (Figur 5.10).

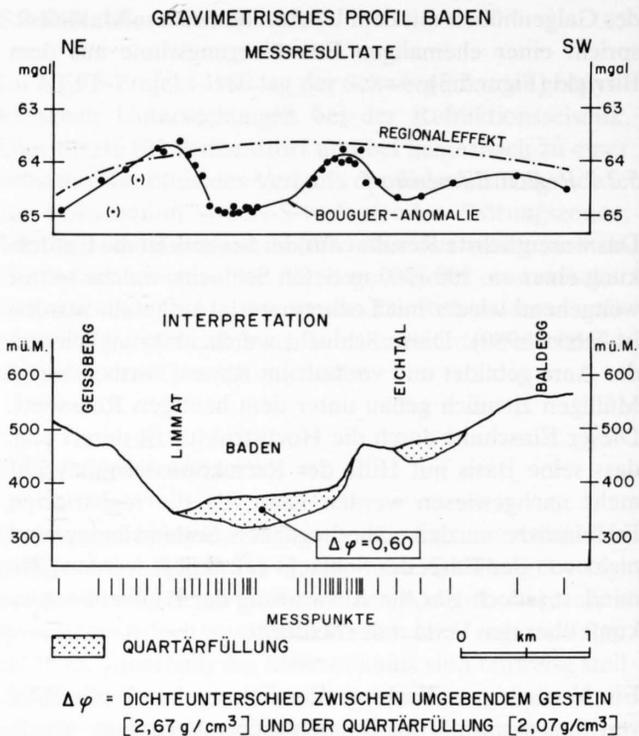


Fig. 5.10: Interpretation der gravimetrischen Untersuchungen im Gebiet Baden (Lage siehe Figur 5.9; NEFF 1984)

Figur oben: Die Differenz zwischen regionalem Schwerefeld und der Bouguer-Anomalie ist eine Folge der geringen Dichte des Quartärs unter Baden.

Figur unten: Die aus der Schweredifferenz zwischen Bouguer-Anomalie und regionalem Schwerefeld rechnerisch ermittelte Form der Quartärmulde.

Das Refraktionsprofil bei Obersiggenthal zeigt eine breite Mulde in der Molasseoberfläche von mindestens 25 m Tiefe, wobei die tiefste Stelle der Mulde ca. auf Kote 320 m liegt. Diese Mulde dürfte der Fortsetzung der alten Limmatrinne entsprechen. Die Mesozoikumoberfläche (Malmkalke), welche am südlichen Profilrand auf einer Kote von 270 m ü. M. liegt, taucht mit ca. 10° gegen NE ein. Im Zentralteil des Profils scheint der Malm nach N durch eine Flexur oder einen Bruch um ca. 50 m abgesenkt worden zu sein und erreicht am nördlichen Profilrand eine Kote von ca. 150 m ü. M. (BACHMANN 1983).

5.4 Geoelektrische und elektromagnetische Methoden

5.4.1 Geoelektrische Methoden

Im NEFF-Projekt 1980 wurden geoelektrische Messungen in Birnenstorf und in Schinznach durchgeführt. In Birnenstorf ergaben die geoelektrischen Messungen nicht die gewünschten Ergebnisse, da die zum Erreichen der Felsoberkante notwendigen Profillängen wegen der zu erwartenden Störeffekte (Leitungen, Kabel etc.) nicht ausgelegt werden konnten.

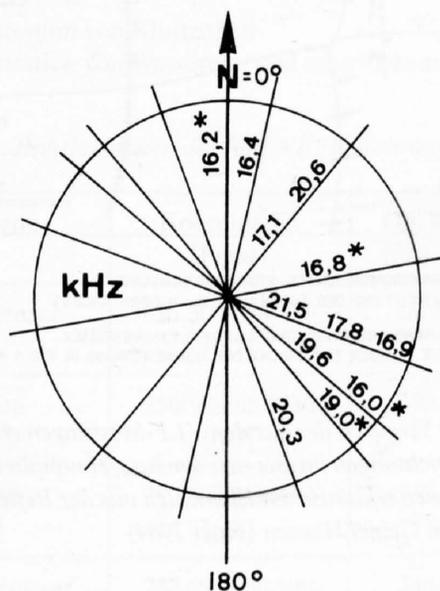
In Schinznach führten die Auswertungen der geoelektrischen Messungen auf dem Areal des Bades Schinznach ebenfalls zu Ergebnissen, die nicht ohne Widerspruch zu den bereits vorhandenen Informationen waren. Figur 5.2 zeigt, dass sich die geoelektrische Widerstandsgrenze X weder mit den geologischen Schichtgrenzen noch mit den seismischen Horizonten korrelieren lässt. Dies deutet darauf hin, dass hier eine reine physikalische Trennfläche vorliegt, die sowohl durch einen Wechsel der elektrischen Leitfähigkeit als Folge des Thermalwassers als auch durch unterschiedliche Wassergehalte oberhalb wie unterhalb der Trennfläche bedingt sein kann.

Aufgrund der im NEFF-Projekt 1980 gemachten Erfahrungen wurde im folgenden NEFF-Projekt auf die Durchführung von geoelektrischen Messungen verzichtet. Dagegen wurde bei Hausen die sogenannte Very Low Frequency Methode (VLF) zur Anwendung gebracht, welche bedeutend weniger empfindlich auf künstliche Störeffekte ist als die traditionellen geoelektrischen Methoden.

5.4.2 Die elektromagnetische VLF-Methode

VLF-Messungen verwenden elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz zwischen 15 und 25 kHz, d. h. mit einer Wellenlänge zwischen 12 und 20 km. Radiosignale in diesem Frequenzbereich werden von vielen Ländern für die Kommunikation mit U-Booten sowie für die Hochseeravigation ausgestrahlt.

Figur 5.11 zeigt die geographischen Richtungen, aus denen in der Schweiz VLF-Stationen mit den dazugehörigen Frequenzen zu empfangen sind. Daraus ist ersichtlich, dass aus praktisch allen Richtungen VLF-Stationen senden. Eine grössere Lücke besteht einzig zwischen 50° und 80°.



Figur 5.11: Richtung und Frequenz der in der Schweiz empfangbaren VLF-Stationen. Die mit Kreuzen bezeichneten Frequenzen wurden im Untersuchungsgebiet für die VLF-Messungen verwendet (NEFF 1984).

Störungen und Kluftzonen verändern die elektrische Leitfähigkeit des Gesteins. Aufgrund des erhöhten Flüssigkeitsgehaltes wird der Widerstand dieser Zonen herabgesetzt. Für die nachfolgend beschriebenen Messungen müssen die Richtung der Antennen für den Empfang des Senders, die beiden Elektroden (Elektrodenabstand 5 m) und der Sender auf einer Linie liegen. Wird parallel zu einer Störungszone gemessen, so registriert man den grössten scheinbaren Widerstand und den kleinsten Phasenwinkel. Misst man am gleichen Ort senkrecht zur Störung, so ist der scheinbare Widerstand minimal und der Phasenwinkel maximal.

Die theoretischen Untersuchungen von FISCHER et al. (1983) zeigten aber auch, dass in einer Distanz von 10 m von einer 10 m breiten Störungszone bereits wieder die isotropen Verhältnisse des ungestörten Gesteinskomplexes gemessen werden. VLF-Messungen entdecken also eine Störung nur, wenn der Messpunkt auf der Zone selber liegt.

Wird im Feld an einem Ort in Richtung von 3–4 verschiedenen VLF-Sendern je der scheinbare Widerstand und der Phasenwinkel gemessen, so kann bei Vorhandensein einer ausgeprägten Anisotropie auf die Richtung der dazugehörigen Störungszone geschlossen werden.

Bei der Interpretation von VLF-Messungen muss aber berücksichtigt werden, dass nicht nur tektonische Störungen Widerstandsanisotropien hervorrufen können, sondern z. B. auch mit Schotter gefüllte Bach- oder Flussrinnen.

VLF-Messungen wurden bisher in der Schweiz hauptsächlich zur Lokalisation von Kluft- und Karstzonen unter einer geringmächtigen Quartärschicht in den Kalkaquiferen des Juras durchgeführt (MÜLLER 1982; MÜLLER 1983).

Die Interpretation der VLF-Messungen erfolgte rein qualitativ durch einen Vergleich der Messwerte (scheinbarer Widerstand am Messpunkt, Phasenwinkel). Für die Interpretation wurde zusätzlich noch die Eindringtiefe der Messung benötigt, welche vom gemessenen scheinbaren Widerstand (ρ_a) und der Frequenz der elektromagnetischen Welle abhängt. Für eine elektromagnetische Welle mit einer Frequenz von 20 kHz beträgt die Eindringtiefe in einem Gestein mit $\rho_a = 1000 \Omega \text{ m}$ ca. 110 m. Für ein homogenes Medium beträgt der Phasenwinkel 45°.

5.4.2.1 Region Hausen

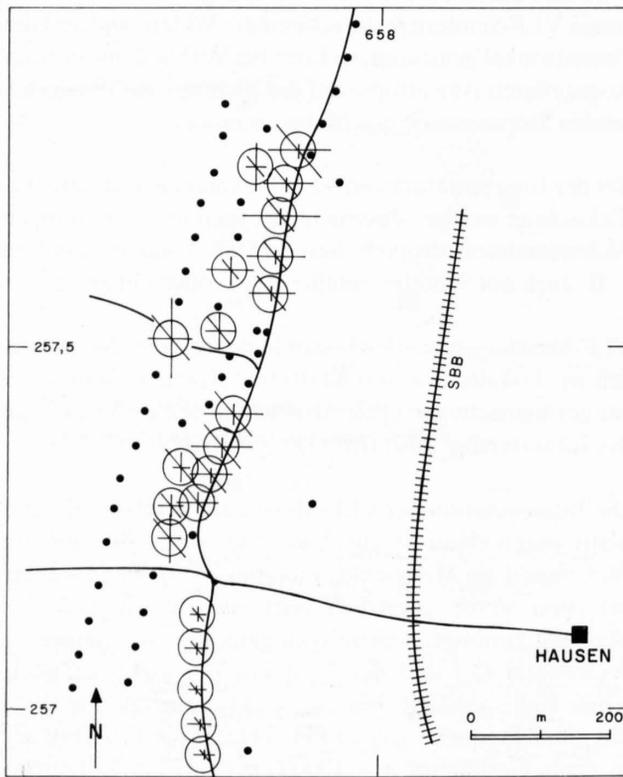
Bei den in Hausen durchgeführten Messungen handelte es sich um einen Versuch, Anisotropien im Malmkalk nördlich der Jura-Hauptüberschiebung und im Oberen Muschelkalk südlich davon zu lokalisieren. Als Folge solcher Anisotropien liesse sich die Existenz von Störungszone in diesen Formationen nachweisen. Der Zielhorizont ist dabei mit Quartär und Molasse von variabler Mächtigkeit überdeckt. Der Grundwasserspiegel in den Quartärablagerungen fällt von Kote 375 m ü. M. im Süden des Untersuchungsgebietes auf ca. 360 m ü. M. im Norden ab. Die

Überdeckung des Mesozoikums ist also aus mindestens zwei geoelektrischen Widerstandsschichten aufgebaut (trockener und wassergefüllter Schotter, evtl. Molasse).

Total wurden 63 Punkte vermessen, wobei an jedem Punkt drei Messungen in verschiedenen Richtungen durchgeführt wurden (Figur 5.11).

Die Messpunkte liegen auf drei parallelen N-S-verlaufenden Profilen mit einem Messpunktabstand von 50 m (Figur 5.12). Für die Auswertung standen zusätzlich die Interpretationen der beiden reflexionsseismischen Profile HA1 und HA2 sowie der Refraktionsseismik-Kampagne zur Verfügung (Kapitel 5.1.2 und 5.2.2).

In Figur 5.12 sind die scheinbaren Widerstände aller Stationen eingezeichnet, die den Fels erreicht haben. Die Messpunkte in der Ebene westlich von Hausen wurden von den zum Teil mächtigen quartären Tonablagerungen gestört, so dass dort das Mesozoikum nicht mehr angetroffen werden konnte.



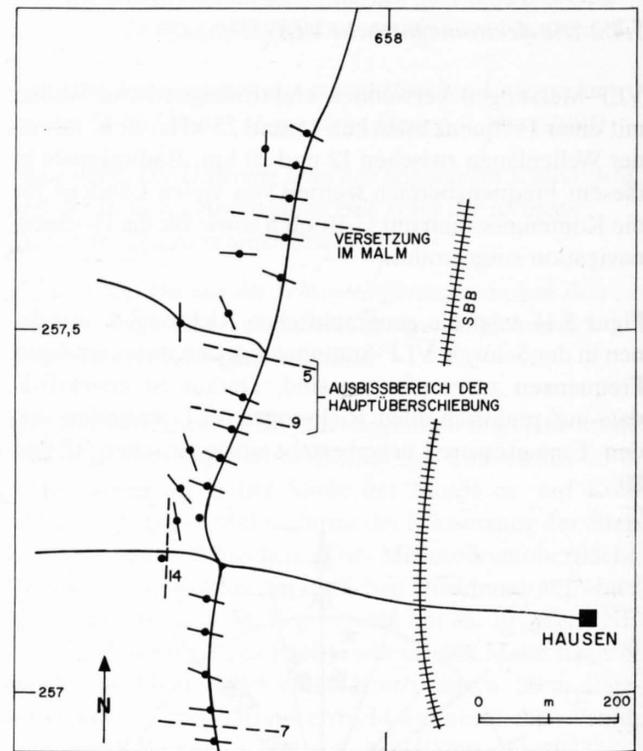
VLF-MESSPUNKT, DER DEN FELS ERREICHT HAT, MIT ANGABEN ÜBER RICHTUNG ZUM SENDEFRÄQUENZ
 • VLF-MESSPUNKT, DER DEN FELS NICHT ERREICHT HAT

Fig. 5.12: Betrag und Richtung der scheinbaren geoelektrischen Gesteinswiderstände, ermittelt durch VLF-Messungen im Gebiet Hausen. Die Längen der Balken sind proportional zum scheinbaren geoelektrischen Widerstand (als Referenz entspricht der Radius der Kreise 500 Ω). Die Punkte ohne Kreise entsprechen VLF-Messungen, wo der Fels nicht erreicht wurde, d. h. keine Auswertung der Messung durchgeführt werden konnte (NEFF 1984)

Ein Vergleich der aus diesen Messungen abgeleiteten wahrscheinlichsten Störungsrichtungen mit den oberflächennahen tektonischen Elementen aus der Reflexionsseismik zeigt eine gute Übereinstimmung (Figur 5.13). Die meisten Kluftzonen verlaufen E-W, also parallel zum Ausbiss der Jura-Hauptüberschiebung. Laut VLF-Untersuchungsergebnissen korreliert die einzige markante N-S-verlaufende Störungszone mit der Störung Nr. 14 im Seismikprofil HA2 (Figuren 5.4 und 5.5). Genau in deren nördlichen Fortsetzung zeigen drei VLF-Stationen N-S-verlaufende Kluftzonen an.

Nördlich des Ausbissbereiches der Jura-Hauptüberschiebung deuten noch zwei weitere Messstationen auf N-S-verlaufende Störungen.

Die Messungen geben jedoch keinen Hinweis auf den Fallwinkel der Störungszone. Die Störung Nr. 14 manifestiert sich zum Beispiel in der Reflexionsseismik als eine relativ flache Überschiebungszone innerhalb des Muschelkalks.



WAHRSCHEINLICHSTE STÖRUNGSRICHTUNG (=RICHTUNG DES MAXIMALEN EL. WIDERSTANDES)
 - - - - 7 ÜBERSCHIEBUNGSZONE AUS REFLEXIONSSEISMIK. DIE NUMMER ENTSPRICHT DER NUMMIERUNG IN FIG. 5.4

Fig. 5.13: Vergleich der aus den VLF-Messungen ermittelten Störungsrichtungen im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung mit den tektonischen Elementen aus der Reflexionsseismik im Gebiet Hausen (NEFF 1984)

Eine detaillierte VLF-Vermessung in der Ebene von Hausen hätte noch eine wertvolle Bestätigung der gewonnenen Erkenntnisse gebracht. Infolge der sehr niedrigen Widerstände in Oberflächennähe konnten aber die gewünschten Eindringtiefen nicht erreicht werden.

6. BOHRUNGEN, PUMPVERSUCHE UND BOHRLOCHGEOPHYSIK

H. L. Gorhan [1] und J. C. Griesser [2, 3], L. Rybach [2]

6.1 Einleitung

Im Laufe der beiden NEFF-Projekte (1980, 1984) wurden die folgenden fünf Bohrungen in der Region Baden-Schinz nach zur Ausführung gebracht (Lageplan Figur 2.1):

Die Festlegung der Bohrstandorte erfolgte hauptsächlich nach geologisch-hydrogeologischen Kriterien; bei der Wahl der Bohrstelle in Hausen (HH1) wurden speziell die Ergebnisse aus der Reflexionsseismik mitberücksichtigt. Von allen fünf NEFF-Bohrungen sind die Bohrungen S2, HH1 und BT2 heute noch zugänglich.

Im Aaretal bei Schinz wurden 20 Seichtbohrungen entlang der das Tal überquerenden Jura-Hauptüberschiebungen ausgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus diesen Bohrungen wurde eine tiefere Bohrung auf dem Areal des Bades abgeteuft (S2, Figur 6.1).

Die in den Bohrungen zwischen Schinz und Birmenstorf durchgeführten *bohrlochgeophysikalischen* Messungen hatten generell die folgenden Ziele:

- Bestimmung der lithologischen Abfolge in den Bohrungen; zusammen mit den Analysen des Bohrkleins sollten die stratigraphischen Grenzen festgelegt werden
- qualitative und quantitative Bestimmung des Porositätsverlaufs
- Lokalisation von Klüftzonen
- Lokalisation von Wasserein- und austrittszonen

Tabelle 6.2. gibt eine Zusammenstellung der geophysikalischen Bohrlochmessungen, die in den einzelnen Bohrlöchern durchgeführt wurden.

Die Korrelation einzelner Logs zwischen verschiedenen Bohrlöchern gibt Aufschluss über die Mächtigkeits- und Faziesänderungen. Von besonderer Wichtigkeit sind in diesem Zusammenhang sogenannte Markerhorizonte, die in einem bestimmten Log über ein grösseres Gebiet einen charakteristischen Ausschlag zeigen. Sehr gute Marker sind z. B. die tonreichen Estherienschiefer in der Lettenkohle, die im Gamma-Log einen sehr starken «Peak» liefern. Dieser «Peak» wurde in allen Bohrungen des Untersuchungsgebietes angetroffen, aber z. B. auch in der Bohrung Böttstein (NAGRA 1985 b).

In den Bohrungen HH1 und BT4 wurde im Bereich des Oberen Muschelkalks eine *quantitative* Interpretation der einzelnen Logs zwecks Porositätsbestimmungen durchgeführt (Kapitel 6.3.3 und 6.6.3). Quantitative Auswertungen von Logs erlauben, gesuchte petrophysikalische Parameter direkt aus den registrierten Messwerten zu bestimmen, was aber kalibrierte Bohrlochsonden voraussetzt. Da nun für die verwendeten Sonden keine geeigneten Kalibrierungskurven existierten, erwies es sich als notwendig, für die Bestimmung der Porosität das Neutron-Neutron- und Gamma-Gamma-Log zu eichen, d. h., die Messwerte mit den gemessenen Porositäten und Dichten an

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

[2] Institut für Geophysik, ETH Zürich

[3] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

Tab. 6.1: Bohrlochdaten der fünf NEFF-Bohrungen (NEFF 1980; NEFF 1984)

Bohrung [Nr.]	Koordinaten [Figur]	OK Rohr [m ü. M.]	Tiefe [m]	Ausführungsdatum	Name der Bohrunternehmung
Schinz nach [S2]	256.500/654.730 [6.1]	ca. 342	135,7	16. 01. – 15. 07. 1980	Gebr. Meier AG, Brugg
Hausen [HH1]	256.939/657.836 [6.3]	380,21	408,0	31. 01. – 06. 04. 1983	Fehlmann Grundwasserbauten AG, Bern
Mülligen [BT2]	257.200/659.490 [6.7]	355,14	74,0	13. 11. – 29. 11. 1980	Gebr. Meier AG, Brugg
Birmenstorf [BT3]	257.650/660.100 [6.9]	346,08	72,0	30. 11. 1980 – 15. 01. 1981	Gebr. Meier AG, Brugg
Birmenstorf [BT4]	257.455/660.049 [6.11]	343,6	241,0	17. 02. – 11. 04. 1983	Gebr. Meier AG, Brugg

Tab. 6.2: Zusammenstellung der durchgeführten geophysikalischen Bohrlochmessungen in den mitteltiefen Bohrungen zwischen Schinznach und Birnenstorf (NEFF 1980; NEFF 1984)

Log	Anwendungen	S2 (136)	HH1 (408)	Bohrungen*		
				BT2 (74)	BT3 (72)	BT4 (241)
Widerstand ³	lithologische Korrelation; Widerstand des bohrlochnächsten Gesteinsbereiches		o			o
Eigenpotential (SP) ³	lithologische Korrelation		o			o
Natürliches Gamma ³	Tongehalt, Korrelation	x	x	x	x	x
Neutron-Neutron ³	totale gesättigte Porosität	x	x	x	x	x
Gamma-Gamma ³	Formationsdichte, Porosität	x	o	x	x	x
Sonic ³	Porositätsbestimmung, Lokalisation von Klüften		x			o
Kaliper ³	Messen des Bohrlochdurchmessers, Feststellen von Klüften	x	x	x	x	o
Temperatur ¹	Messen des Temperaturprofils, Lokalisation von Wasserein- und -austrittszonen	x	x	x	x	x
Flowmeter ³	Bestimmung der Fliessrichtung und der Wassereintrittsmenge	x		x	x	x
optische Fernscharaufnahme ²	Lokalisation von Klüften und Hohlräumen					x

Legende:

* in Klammern sind die Bohrtiefen in (m) angegeben

x auf der gesamten Bohrstrecke gemessen

o nur im Muschelkalk gemessen

¹ durch das Institut für Geophysik, ETH Zürich, gemessen

² durch Forces Motrices Neuchâtelaises SA, Corcelles/NE, gemessen

³ durch die Firma Geotest AG, Zollikofen, durchgeführt

Bohrkernen von den entsprechenden Tiefen zu vergleichen (GRIESSER 1985).

Aus dem Sonic-Log lässt sich nach der Formel von WYLLIE et al. (1956) bei bekannter Matrix- und Porenflüssigkeitgeschwindigkeit ebenfalls die Porosität bestimmen (sog. time average equation).

Das Sonic-Log liefert aber nur dann korrekte totale Porositäten, wenn regelmässig verteilte Poren existieren (z. B. primäre Porosität wie in Sandsteinen). Sekundäre Porositäten (Klüfte, Karsterscheinungen) werden vom Sonic-Log generell zu niedrig angegeben.

6.2 Die Bohrung S2 (Schinznach Bad)

Die Bohrung S2 befindet sich südlich der Rheumaklinik auf dem Areal des Bades Schinznach (Gemeinde Schinznach Bad, Figur 5.1) und wurde in den den Oberen Mu-

schelkalk überlagernden Gipskeuper südlich der Jura-Hauptüberschiebung in etwa 80 m Entfernung von der bestehenden Thermalquelle angesetzt. Damit konnte eine Beimischung von kaltem Oberflächenwasser vermieden werden. Der Ansatz der Bohrung erfolgte aufgrund der Erkenntnisse aus den im Kapitel 6.1 erwähnten Seichtbohrungen und der geophysikalischen Messkampagne im Auftrag der Bad Schinznach AG (ausgeführt durch Prakla Seismos; NEFF 1980).

Die totale Länge des erbohrten Profils beträgt 135,7 m, wobei von 126,0 bis 126,9 m ein Kern gezogen wurde. Der Rest wurde im Rotaryverfahren erbohrt (Figur 6.1).

In der Bohrung S2 wurden zwei Pumpversuche durchgeführt (Kapitel 6.2.2). Während der ganzen Bohr- und Pumpvorgänge wurden Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Trübung und Wasserstand im alten Quellschacht des Bades überwacht.

6.2.1 Geologische Aufnahme

Nach 8,50 m Schotter drang die Bohrung bereits in einen bunten Mergel mit hohem Kalkgehalt ein, mit nach unten immer häufigeren Gipsbeimengungen. Bei 36,5 m erreichte die Bohrung eine ca. 1,5 m mächtige Gipschicht, die zum Teil noch mergelig war. Von 49,0 m bis 67,5 m trat ein homogener Anhydrit auf. Aufgrund dieser Beobachtungen wird dieser Teil der Bohrung dem Gipskeuper zugeordnet (Figur 6.1).

Anschließend folgte ein schiefriger Dolomit mit einigen dunklen kalkigen Partien (Lettenkohle ca. 4,5 m mächtig). Die nächsten 30,5 m (72–102,5 m) zeigten eine Wechsellagerung im Meterbereich zwischen Dolomit, im oberen Teil zerklüftet, und dolomitischem Mergel. Dieser Abschnitt der Bohrung wird dem Trigonodusdolomit zugeordnet. Der folgende Plattenkalk, 102,5 m bis 125,5 m, ist durch eine Wechsellagerung von schwarzen Mergeln, dunkelbraunen Dolomiten und braunen Kalken charakterisiert. Ab 125,5 m traten trochitenführende Kalke auf (Trochitenkalk).

Die Bohrung S2 umfasst also ein vollständiges Profil vom Oberen Muschelkalk bis in den Gipskeuper. Da die Schichten in Schinz nach Bad steil gegen Süden einfallen (ca. 50°), befindet sich die Jura-Hauptüberschiebung mehrere Dutzend Meter unter dem Bohrende. Jedoch wurde wahrscheinlich am Bohrende eine NNW-SSE-verlaufende Störung erreicht. Das Ziel der Bohrung war, bei etwa 165 m die Anhydritgruppe zu erreichen und somit den ganzen Hauptmuschelkalk zu durchteufen. Ab etwa 72 m Tiefe wurde ein erster produktiver Horizont erbohrt; ein vermuteter zweiter an der Basis des Hauptmuschelkalks konnte leider nicht angetroffen werden.

6.2.2 Pumpversuche

Die Ergebnisse der Pumpversuche in der Bohrung Schinz nach S2 sind in Tabelle 6.3 übersichtlich zusammengestellt:

Bei dem ersten Versuch (Stufe 0 bis 5) war die Bohrstrecke von 70 bis 135 m unverrohrt, d. h., die Schotter nur teilweise durch das Standrohr abgedichtet.

Bei dem zweiten Pumpversuch (Stufen 1 bis 6) waren die Schotter bereits etwas besser abgedichtet, jedoch war während des Pumpversuchs trotzdem eine leichte Absenkung des Quartärgrundwasserspiegels beobachtbar. Eine endgültige Abdichtung wurde erst beim definitiven Ausbau erzielt.

Die hydrogeologische Situation präsentiert sich wie folgt:

- Die Deckschicht über der tiefen grundwasserführenden Formation besteht aus Mergel mit Gips und Anhydrit des Gipskeupers und ist praktisch undurchlässig.
- Der Grundwasserleiter setzt sich aus Kalken und Dolomiten des Hauptmuschelkalkes zusammen, wobei die

Durchlässigkeit sehr heterogen (einzelne offene bzw. verkarstete Trennflächen in kompakten Kalken), im allgemeinen mässig, von Kote 270 m ü. M. bis 256 m ü. M., jedoch hoch bis sehr hoch ist. Einzelne kurze Strecken erhöhter Durchlässigkeit wurden auf der ganzen Bohrlänge beobachtet. Wegen der sehr guten Durchlässigkeit an der obersten Grenze des Trigonodusdolomits (zwischen Kote 270 m ü. M. und 256 m ü. M.) kann angenommen werden, dass praktisch nur diese Strecke des Bohrlochs während des Pumpbetriebs produktiv war.

- Die Basis des Grundwasserleiters befindet sich vermutlich ca. 160 m unter OK Terrain, d. h., sie wird durch den Kontakt Anhydritdolomit/Sulfatzone in der Anhydritgruppe gebildet.
- Die Tiefe des Grundwasserspiegels im Hauptmuschelkalk (= gespanntes Grundwasser) wurde im Rohr wie folgt gemessen:
Kote 341,18 m ü. M. (04. 04. 1980)
Kote 341,04 m ü. M. (09. 09. 1980)

Laut Messung vom 09. 09. 1980 befand sich der freie Schottergrundwasserspiegel in einer in der Nähe gelegenen Seichtbohrung bei Kote 340,65 m ü. M.

6.2.3 Bohrlochgeophysik

Die geophysikalischen Bohrlochmessungen stehen im guten Einklang mit den geologischen Bohrlochdaten (Figur 6.1). Im obersten Muschelkalk konnten die wichtigsten Klüfte mit Wassereintritten mittels Flowmeter, Kaliper- und differentiellem Temperatur-Log nachgewiesen werden.

Das Temperatur-Log zeigt folgende Tendenz: Mit der Tiefe steigt die Temperatur im Keuper stark an und erreicht im obersten Trigonodusdolomit ein Maximum von 39,5°C (75–81 m; Figur 6.2). Anschließend sinkt sie wieder rapid und erreicht in einer Tiefe von 86 m eine Temperatur von 32°C. Diese Temperatur bleibt bis hinunter zu 135 m konstant. Über die mutmassliche Temperatur an der Basis des Muschelkalkes können anhand der bestehenden Daten jedoch keine Rückschlüsse gemacht werden.

6.3 Die Bohrung HH1 (Hausen)

Die Bohrung HH1 befindet sich zwischen den beiden Gemeinden Hausen und Habsburg in westlicher Richtung, ca. 500 m von der Hauptstrasse Windisch – Birrfeld entfernt. Die Bohrung liegt noch auf dem Gemeindegebiet von Hausen (Figur 2.1).

Die Bohrung HH1 wurde im normalen Rotary-Bohrverfahren mit direktem Spülungsumlauf abgeteuft. In drei verschiedenen Tiefen wurden je 3 m lange Kerne mit Doppelkernrohr gezogen. Die gesamte Bohrtiefe beträgt 408 m (Figur 6.3).

Tab. 6.3: Ergebnisse der Pumpversuche in der Bohrung Schinz nach S2 und die daraus berechneten hydraulischen Werte (Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwert; NEFF 1980)

Bezeichnung des Versuches, Datum und Zeit des Versuchsbeginns	Fördermenge (l/min)	Dauer der Pumpstufe (h, min)	Grundwasserspiegel vor Versuchsbeginn (m ab OK Terrain)	Absenkung (m)	Berücksichtigte Grundwassermächtigkeit (m)	Transmissivität T (10 ⁻² m ² /s)	Durchlässigkeitsbeiwert k (10 ⁻⁴ m/s)
1. Versuch					A B		A B
Stufe 0: 22. 02. 1980, 13.55	300–1300	1 h 10	1,20	*	67,5 (14)	0,31	0,46 (2,2)
Stufe 1: 22. 02. 1980, 16.00	410	62 h 47	1,34	1,10–2,09	67,5 (14)	0,69	1,0 (4,9)
Stufe 2: 25. 02. 1980, 14.10	920	44 h	1,22	ca. 4,25	67,5 (14)	0,77	1,1 (5,5)
Stufe 3: 28. 02. 1980, 11.23	240	5 h 20	1,16	ca. 0,65	67,5 (14)	2,1	3,1 (15,0)
Stufe 4: 28. 02. 1980, 18.00	600	49 h	1,21	ca. 1,80	67,5 (14)	0,75	1,1 (5,4)
Stufe 5: 02. 03. 1980, 09.45	200	ca. 24 h	1,16	ca. 0,50	67,5 (14)	–	–
2. Versuch							
Stufe 1: 30. 05. 1980, 08.00	110	7 h	1,3	0,20	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)
Stufe 2: 30. 05. 1980, 16.00	200	24 h	1,3	0,90	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)
Stufe 3: 31. 05. 1980, 20.00	245	24 h	1,3	1,10	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)
Stufe 4: 02. 06. 1980, 05.00	200	24 h	1,3	1,55	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)
Stufe 5: 03. 06. 1980, 08.00	350	24 h	1,3	2,00	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)
Stufe 6: 04. 06. 1980, 10.00	400	24 h	1,3	2,50	67,5 (14)	0,5**	0,74 (3,6)

* Grundwasserspiegel nicht stabilisiert

** durchschnittlicher Wert

– Transmissivität nach THEIS-Aufstiegsmethode

– Annahmen für Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes:

- Erste Annäherung. Die Durchlässigkeit des Hauptmuschelkalkes ist homogen von –67,5 m bis –135,0 (Grundwassermächtigkeit 67,5 m). Kolonne A
 - Zweite Annäherung. Die Durchlässigkeit des Hauptmuschelkalkes von –72,0 m bis –86,0 m ist homogen (Grundwassermächtigkeit 14 m), der Rest der Formation hat eine verhältnismäßig unbedeutende Durchlässigkeit. Kolonne B
- Grundwasserspiegel vor Versuchsbeginn: gespannte Verhältnisse, beeinflusst durch unvollständige Abdichtung des Standrohrs zwischen Schotter- und Muschelkalkgrundwasserleiter



Fig. 6.2: Temperaturverlauf in der Bohrung Schinznach S2 (NEFF 1980)

Am Schluss aller Bohrarbeiten wurde ein Zementschacht mit ebenerdigem Gussdeckel installiert. Die Bohrung ist mit ihrem Durchmesser von 149 mm im unverrohrten Hauptmuschelkalk für eventuelle zukünftige Messungen zugänglich.

6.3.1 Geologische Aufnahme

Da die Bohrung Hausen HH1 als Spülbohrung durchgeführt wurde, ergaben sich gewisse Schwierigkeiten bei der korrekten stratigraphischen Zuordnung des Bohrkleins. Für die Festlegung der stratigraphischen Grenzen gelangten daher auch bohrlochgeophysikalische Messungen zur Anwendung (Kapitel 6.3.3).

Nach ca. 20 m quartärem Lockergestein erreichte die Bohrung siltige Mergel mit eingelagerten kalkigen Bänken aus dem Lias (Figur 6.3). Die Grenze zum darunterfolgenden mittleren Keuper (obere bunte Mergel) wurde bei 62 m ab OK Terrain angetroffen, die Grenze zum unteren Keuper (Grenzdolomit) bei ca. 269 m ab OK Terrain.

Der Obere Muschelkalk (Trigonodusdolomit) setzt mit kalkigen Dolomiten bei einer Tiefe von ca. 281 m ein und reicht bis 380 m ab Terrain OK. Ab dieser Tiefe finden sich

Dolomite und dolomitische Kalke des mittleren Muschelkalkes (Anhydritdolomit). Bei ca. 397 m ab OK Terrain befindet sich eine Abscherzone, und es setzten hier erneut harte, mittelkörnige Kalke des Oberen Muschelkalkes ein. Die Bohrung wurde in einer Tiefe von 408 m ab OK Terrain abgebrochen.

6.3.2 Pumpversuche

In dieser Bohrung wurde der Aquifer des Muschelkalkes komplett durchbohrt, so dass hier von einem «vollkommenen» Brunnen gesprochen werden kann (im Hangenden finden sich die vorwiegend wasserundurchlässigen Schichten des Gipskeupers, im Liegenden die ebenfalls wasserundurchlässige Sulfatzone). Im Muschelkalk herrschen artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse, wobei der Ruhewasserspiegel bei Versuchsbeginn bei ca. Kote 356 m ü. M. angetroffen wurde (12.04.1983).

Während der Pumpversuche war die Pumpe 201 m unter Terrain-Oberkante installiert. Bei der Auswertung der Absenkdaten, d. h. der Bestimmung der Transmissivität des Muschelkalkes, wurde nach KRUSEMAN AND DE RIDDER (1979) sowie nach THIERY, VANDENBEUSCH UND VANBOURG (1983) vorgegangen. Die Ergebnisse sind wie folgt:

Transmissivität	$T = 7,04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Durchlässigkeit	$K = 5,68 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
Spezifische Ergiebigkeit	$Q/s = 2,20 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
(wobei Q = Ergiebigkeit bei einer Absenkung s)	

Im Laufe des Pumpversuches konnten die folgenden Veränderungen der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Thermalwassers festgestellt werden:

- Temperaturanstieg von ca. 19°C auf 29°C
- Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit von ca. 2300 $\mu\text{S cm}^{-1}$ auf 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$
- Abnahme des Tritiumgehalts von ca. 8 TU auf 1 TU

Nach einer bestimmten Förderzeit stellte sich ein Gleichgewicht der wichtigsten Parameter ein, d. h., das geförderte Wasser setzte sich dann praktisch ausschliesslich aus Thermalwasser zusammen (Figur 6.4). Letzteres ist charakterisiert durch einen sehr geringen Tritiumgehalt von ca. 1 TU. Andererseits steht die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit im Widerspruch zur Temperaturzunahme. Vermutlich rührt aber der beobachtete erhöhte Mineralisierungsgrad am Beginn des Pumpversuchs von Verunreinigungen durch die Bohrspülung her (Durchteufen des Gipskeupers?). Die Konzentration der vier wichtigsten Ionen (Na, Ca, Cl, SO_4) nehmen sehr rasch nach Beginn des Pumpversuchs ab, um dann während des Langzeitpumpversuchs stabil zu bleiben (Figur 6.5). Auf die gleiche Ursache dürfte auch die Abnahme des Tritiumgehalts während des Pumpversuchs zurückzuführen sein.

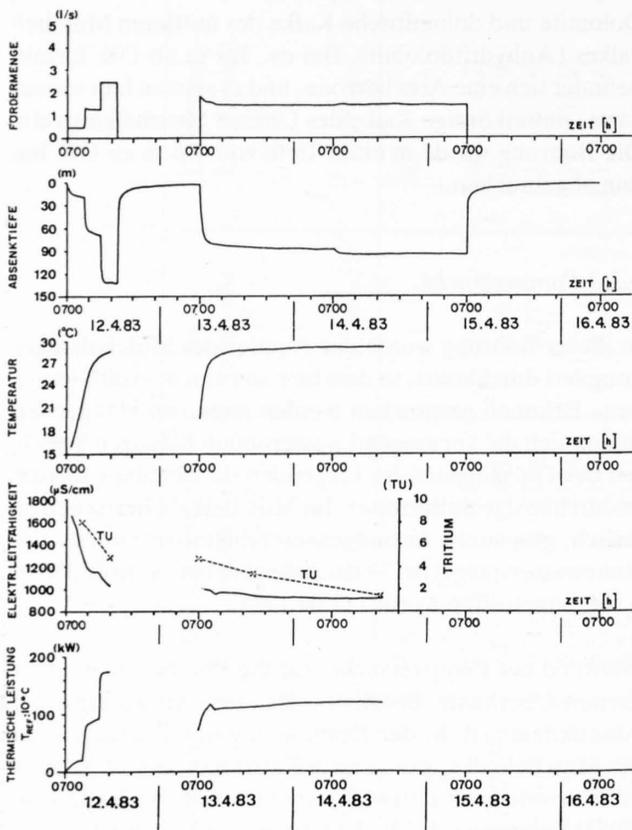


Fig. 6.4: Beziehungen zwischen Fördermenge bzw. Förderzeit und Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, Gehalt an Tritium (TU = Tritium Unit) sowie thermischer Leistung (Referenztemperatur 10°C) in der Bohrung HHI (NEFF 1984)

6.3.3 Bohrlochgeophysik

Das Gamma-Log zeigt eine stetige Zunahme der Gamma-Aktivität bis auf ca. 350 cps im Schilfsandstein (Figur 6.3). Ein solcher Verlauf lässt sich nur mit einer generellen Zunahme radioaktiver Minerale mit der Tiefe im Schilfsandstein erklären. In anderen Bohrungen aus der Region zeigte diese Zone ebenfalls einen markanten, aber sehr lokalen «Marker» im Gamma-Log. Eine gammaspektrome-

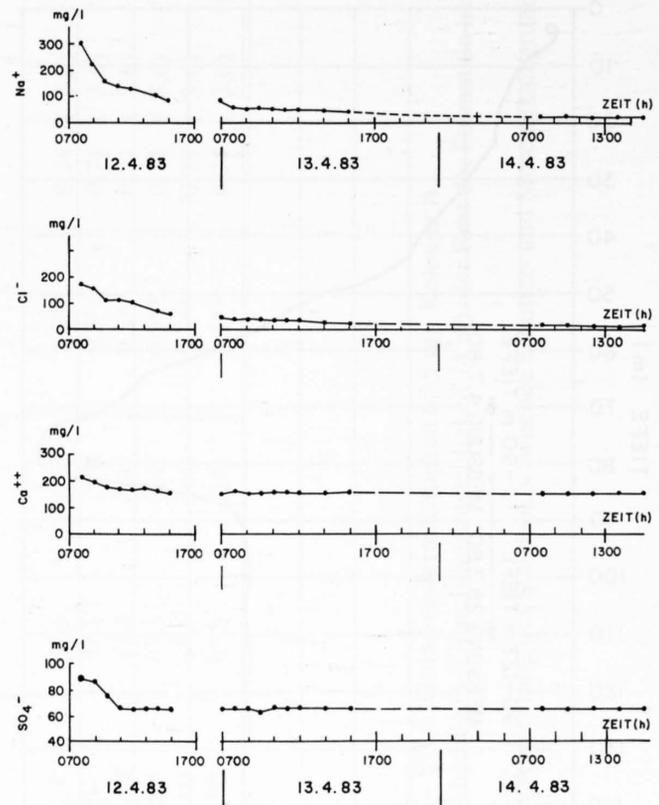


Fig. 6.5: Beziehungen zwischen Förderzeit und Ionenkonzentrationen in der Bohrung HHI (NEFF 1984)

trische Untersuchung dieses Horizonts in der Bohrung Beznau Nr. 7904 ergab einen hohen Uran- und Kaliumgehalt (bis 13 ppm U und 12,2% K; PETERS und MATTER 1981).

Der gesamte Gipskeuper zeigt eine intensive Wechsellagerung zwischen Mergeln mit Gips- und Anhydritzonen. Aufgrund der Gamma-Aktivität lassen sich fünf Zonen unterscheiden:

Tab. 6.4: Lithologische Interpretation des natürlichen Gamma-Logs der Bohrung Hausen HHI (NEFF 1984)

Zonen	Tiefe in m ab Terrain Oberkante	Gamma-Aktivität [cps]	Lithologische Interpretation
1	108–138	100–130	hoher Tongehalt
2	138–160	ca. 65	mittlerer Tongehalt
3	160–202	35–40	niedriger Tongehalt
4	202–250	80	mittlerer Tongehalt mit markanten dichten Anhydritlagen (≤ 3 m Mächtigkeit)
5	250–264	20–25	sehr niedriger Tongehalt, dichte Anhydritzone

Die Anhydritbänke zeigen eine geringe Gamma-Aktivität und eine niedrige Porosität (2–4%).

BOHRUNG HH1 (HAUSEN - HABSBURG)

HÖHENLAGE (OK TERRAIN) : 380.35 m.ü.M.

AUSFÜHRUNGSDATUM : 31.1.83 - 6. 4. 83

OK ROHR : 380.21 m.ü.M.

NEIGUNG : SENKRECHT

BOHRGERÄT : WIRTH B3A

KOORDINATEN : x 657836.21
y 256939.04

BOHRMEISTER : R. JUTZI

BOHRPROFIL MASSSTAB 1 : 800

GEOLOGISCHE AUFNAHME DURCH : M. OBRIST

Bohrart	Spülung	Verrohrung	Verrohrung Ausbau	Grundwasserspiegel	Tiefe m	Lithologie	Beschreibung des Bohrquers	Stratigraphie
ROTARY, ROLLENMEISSEL	BENTONITSPÜLUNG	Zementation	Zementation	ZEMENTSCHACHT, GUSSDECKEL	4	4	Kies, Sand, Silt und Ton in unterschiedlichen Mengenverhältnissen	QUARTÄR LOCKERGESTEIN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	SCHAUMSPÜLUNG	RINGRAUM ZEMENTIERT		ZEMENTSCHACHT, GUSSDECKEL	8	8	Mergel, kalkig, aschgrau, hart, leicht vermischt mit Lockergestein	QUARTÄR LOCKERGESTEIN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				12	12	Siltige Mergel, aschgrau, mit eingelagerten kalkigen Bänken	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				16	16	Mergel mit grauswarzen, harten Kalken	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				20	20	Mergel aschgrau	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				24	24	Mergel, aschgrau, stark tonige Mergel siltige Mergel	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				28	28	Mergel mit Dolomit/kalk, grauschwarz pyritführig	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				32	32	Mergel mit kalkigen, weich, d'grau und rötlich	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				36	36	Kalk, hellgrau, hart, dicht, Feinbrezie	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				40	40	Kalk, rot, teils detritus-haltig, kalkige Lagen	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				44	44	Mergel, rot und grün, kalkige Lagen	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				48	48	Sandige Mergel	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				52	52	Mergel mit kalkigen Lagen und Feinsand, z.t. tonig, grauschwarz, kalkig z.t. fein geschichtet, detritus-haltig, Glimmerbruchstücke	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				56	56	Mergel, leicht gipsaltig	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				60	60	Mergel, grauschwarz, ca. 10 % Gips	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				64	64	do. ca. 35 % gipsaltig	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				68	68	kalkiger Mergel, wenig gipsaltig	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				72	72	toniger Mergel, braunrot gipsaltig	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				76	76	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				80	80	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				84	84	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				88	88	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				92	92	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				96	96	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				100	100	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				104	104	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				108	108	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				112	112	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				116	116	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				120	120	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				124	124	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				128	128	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				132	132	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				136	136	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				140	140	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				144	144	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				148	148	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				152	152	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				156	156	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				160	160	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				164	164	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				168	168	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				172	172	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				176	176	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				180	180	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				184	184	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				188	188	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				192	192	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				196	196	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				200	200	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				204	204	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				208	208	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				212	212	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				216	216	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				220	220	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				224	224	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				228	228	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				232	232	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				236	236	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				240	240	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				244	244	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				248	248	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				252	252	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				256	256	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				260	260	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				264	264	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				268	268	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				272	272	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				276	276	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				280	280	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				284	284	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				288	288	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				292	292	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				296	296	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				300	300	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				304	304	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				308	308	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				312	312	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				316	316	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				320	320	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				324	324	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				328	328	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				332	332	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				336	336	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				340	340	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				344	344	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				348	348	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				352	352	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				356	356	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				360	360	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				364	364	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				368	368	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				372	372	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				376	376	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				380	380	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				384	384	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				388	388	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				392	392	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				396	396	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				400	400	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				404	404	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN
ROTARY, ROLLENMEISSEL	216 mm (8 1/2")				408	408	do.	LIAS PLEYDELLIA SCHICHTEN

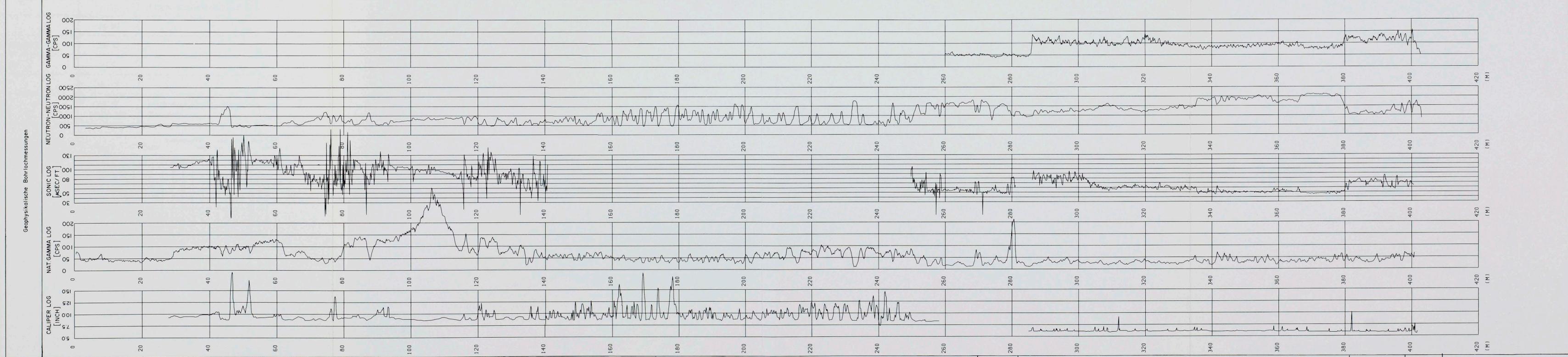


FIG. 6.3

Tab. 6.5: Bestimmung der totalen Porosität mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Bohrung Hausen HH1 (NEFF 1984)

Tiefe in m ab Terrain-Oberkante	Geologische Formation	Totale Porosität %	Bemerkungen
281–303	Trigonodusdolomit	> 15	lt. Neutron-Neutron-Log; das Kaliper-Log zeigt eine starke Zerklüftung an
303–310	Trigonodusdolomit	ca. 10	
310–335	Trigonodusdolomit/Plattenkalk	10–15	
335–358	Plattenkalk/Trochitenkalk	< 5	
358–380	Trochitenkalk	ca. 5	
380–408	Mittlerer Muschelkalk/ Abscherungszone	ca. 17 (max. 25)	markanter Anstieg der totalen Porosität

In der Bohrung HH1 lassen sich aus der quantitativen Interpretation der geophysikalischen Bohrlochmessungen folgende Porositätsbereiche unterscheiden:

Das Kaliper-Log zeigt in dieser Bohrung im gesamten Trigonodusdolomit eine beträchtliche Klüftung an. Eine geringere Klufthäufigkeit findet man im Plattenkalk und im unteren Trochitenkalk.

Die Temperaturlogs zeigen im gesamten oberen Muschelkalk einen sehr konstanten geothermischen Gradienten von 48,3°C/km (Figur 6.6). Auch das Temperaturlog, das kurz nach Bohrende gefahren wurde, zeigt praktisch keine Abweichung vom linearen Verlauf. In vier Zonen konnten lokal kleine Temperaturänderungen festgestellt werden: bei 317 m, 335 m, 380 m und zwischen 390 und 400 m. Nur an diesen Stellen konnte kühle Bohrflüssigkeit ins Gestein eindringen oder wärmeres Formationswasser austreten. Das Temperaturlog deutet also bereits auf schlecht durchlässige Verhältnisse im oberen Muschelkalk. Die durchgeführten Pumpversuche (maximale Pumpleistung 2,7 l/s) bestätigen diesen Befund (Kapitel 6.3.2).

Die während der Pumpversuche gemessene Fördertemperatur von 29,3°C zeigt, verglichen mit der Temperatur am Bohrlochende von 28,7°C, dass Wasser praktisch nur am Ende der Bohrung zutritt bzw. aus einer noch tieferen Zone gefördert wurde.

6.4 Die Bohrung BT2 (Mülligen)

Die Bohrung BT2 wurde an einer die Jura-Hauptüberschiebung begleitenden südlicheren Hauptmuschelkalkschuppe auf 70 m angesetzt (Figur 2.1). Die gesamte Bohrtiefe beträgt 74 m, wovon die letzten 4 m als Kernbohrung, der Rest im Rotaryverfahren mit Klarwasserspülung abgeteuft wurde (Figur 6.7). Die mittels Zementschacht und Gussdeckel geschützte Bohrung steht für zukünftige Messungen zur Verfügung.

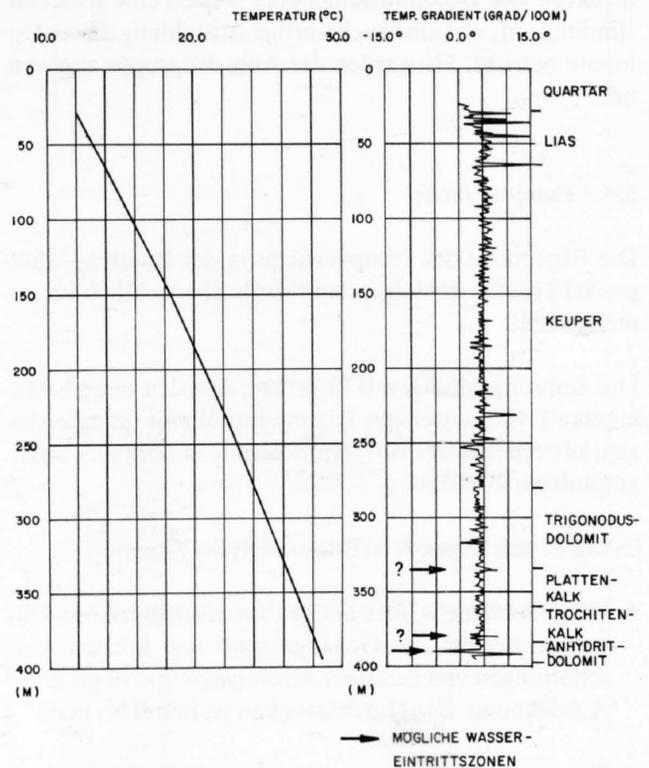


Fig. 6.6: Temperaturverlauf in der Bohrung Hausen HH1 (NEFF 1984)

6.4.1 Geologische Aufnahme

Nach 0,5 m Schotter drang man bereits in den anstehenden Fels, der vorerst (6 m) aus leicht kalkigen Dolomiten bestand, die dem Trigonodusdolomit zugeordnet werden können. Die folgenden Kalke und Dolomite, gegen unten zunehmend kalkiger und mit mergeligen Zwischenlagen versetzt, gehören dem Plattenkalk (24 m) an. Bei einer Schichtneigung von etwas über 50° ergibt dies eine wahre Mächtigkeit des Plattenkalks von 16 m, was den lokalen Verhältnissen sehr gut entspricht. Ebenso genau stimmen die 38 m Kalke, die anschliessend erbohrt wurden, mit der

Tab. 6.6: Ergebnisse des Pumpversuchs in der Bohrung Mülligen BT2 und die daraus berechneten hydraulischen Werte (Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwert; NEFF 1980)

Datum und Zeit des Versuchsbeginns	Fördermenge (l/min)	Dauer der Pumpstufe (min)	Grundwasserspiegel vor Versuchsbeginn (m ab OK) Terrain	Ab-senkung (m)	berücksichtigte Grundwassermächtigkeit z. Z. des Versuchsbeginns (m)	Transmissivität T ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)	Durchlässigkeitsbeiwert k (10^{-6} m/s)
12. 12. 1979, ca. 08.00	50* 176**	27 160	20,6 20,6	1,21 8,25	53 53)) 1,46)) 2,8

* erste Pumpstufe

** zweite Pumpstufe

Bestimmung der Transmissivität nach THEIS-Aufstiegsmethode

wahren Mächtigkeit von 24 m Trochitenkalk überein. Die untersten 4,5 m bestehen aus Dolomiten von feinkörniger Struktur. Die Dolomitrhomboeder weisen eine schlechte Bindung auf, was eine zuckerartige Ausbildung dieser Dolomite bewirkt. Sie werden der Anhydritgruppe zugeordnet.

6.4.2 Pumpversuche

Die Ergebnisse des Pumpversuchs in der Bohrung Mülligen BT2 sind in der folgenden Tabelle übersichtlich zusammengestellt.

Die Bohrung Mülligen BT2 erfasst also den oberen Muschelkalk vom untersten Trigonodusdolomit hinunter bis zum oberen Teil des Anhydritdolomits in normaler stratigraphischer Abfolge.

Es ergibt sich folgende hydrogeologische Situation:

- Die Deckschicht über der grundwasserführenden Formation besteht aus Gehängeschutt und lokalen Aufschüttungen von variabler Mächtigkeit und begrenzter Ausdehnung. Die Durchlässigkeit ist mittel bis hoch.
- Der Grundwasserleiter setzt sich aus Kalken und Dolomiten des Hauptmuschelkalks (inkl. Anhydritdolomit) zusammen. Die Durchlässigkeit ist sehr heterogen (einzelne offene bzw. verkarstete Trennflächen in kompakten Kalken), im allgemeinen eher mässig. Einzelne Zonen erhöhter Durchlässigkeit wurden im Trochitenkalk und im Anhydritdolomit beobachtet. Die durchlässigste Strecke der Bohrung dürfte die Basis des Trochitenkalkes und der Anhydritdolomit bilden (d. h. die untersten 10 m der Bohrung).

Ein Thermalwasserhorizont wurde mit der Bohrung nicht erreicht, jedoch weist der starke Temperaturanstieg im unteren Teil (ab Kote 300,12 m ü. M.) auf einen solchen hin. Wegen der starken Oberflächeneffekte, bedingt durch seitlich einströmendes Wasser, kann eine entsprechende Tiefe nicht gegeben werden.

Dazu wäre eine Bohrung bis unter das Niveau der Reussklus notwendig.

- Die Basis des Grundwasserleiters liegt vermutlich 200 m oder mehr unter Terrain-Oberkante (d. h. Kontakt Anhydritdolomit/Sulfatzone in der Anhydritgruppe der untersten Schuppen). Am 29. 11. 1979 wurde der freie Grundwasserspiegel bei Kote ca. 336 m ü. M. angetroffen.

6.4.3 Bohrlochgeophysik

Das bohrlochgeophysikalische Messprogramm in der Bohrung BT2 beinhaltet ein natürliches Gamma-Log, ein Neutron-Neutron-Log, ein Gamma-Gamma-Log sowie Kaliper, Temperatur- und Flowmetermessungen, wodurch Aussagen zur durchfahrenen Lithologie (Dichte, Tongehalt) und zur Porosität und zur Klüftung möglich waren (Figur 6.7).

Der mittlere Teil des Bohrlochs (oberer Trochitenkalk) weist mehrere stark verklüftete Strecken mit teilweise erheblichen Wasserbewegungen auf. Im Temperaturlog zeigt sich eine Aufteilung der durchbohrten Strecke in zwei unterschiedliche hydrogeologische Zonen (Figur 6.8):

- im oberen Teil (0–55 m) sind die Temperaturen erhöht; ein Einfluss von Tiefenwasser ist bereits leicht vorhanden, obwohl in diesem Bereich erhebliche saisonale Schwankungen, bedingt durch in Klüften zirkulierendes Oberflächenwasser, die Temperaturen weitgehend bestimmen. Ein Temperaturanstieg mit der Tiefe kann in diesem Abschnitt nicht festgestellt werden.
- im unteren Teil ist ein deutlich erhöhter Temperaturgradient vorhanden, obwohl er noch immer durch Wasserzirkulation gestört ist. Hier sind die saisonalen Effekte minim, da der Anteil an Oberflächenwasser, verglichen mit der Menge an aufsteigendem Tiefenwasser, gering ist. Der mittlere Gradient beträgt rund $53^\circ\text{C}/\text{km}$, was auf anomale geothermische Verhältnisse hindeutet.

BOHRUNG BT 2 (MÜLLINGEN)

HÖHENLAGE (OK TERRAIN) : 355.35 m ü.M. **AUSFÜHRUNGSDATUM : 13.II.-29.II.1980**
OK ROHR : 355.14 m ü.M. **BOHRGERÄT : WIRTH B1-A**
KOORDINATEN : 257.200/659.490 **BOHRMEISTER : W. KAESERMANN**
NEIGUNG : SENKRECHT **RICHTUNG : -**

BOHRPROFIL MASSSTAB 1 : 400 **GEOLOGISCHE AUFNAHME DURCH : DR. J.F. SCHNEIDER**

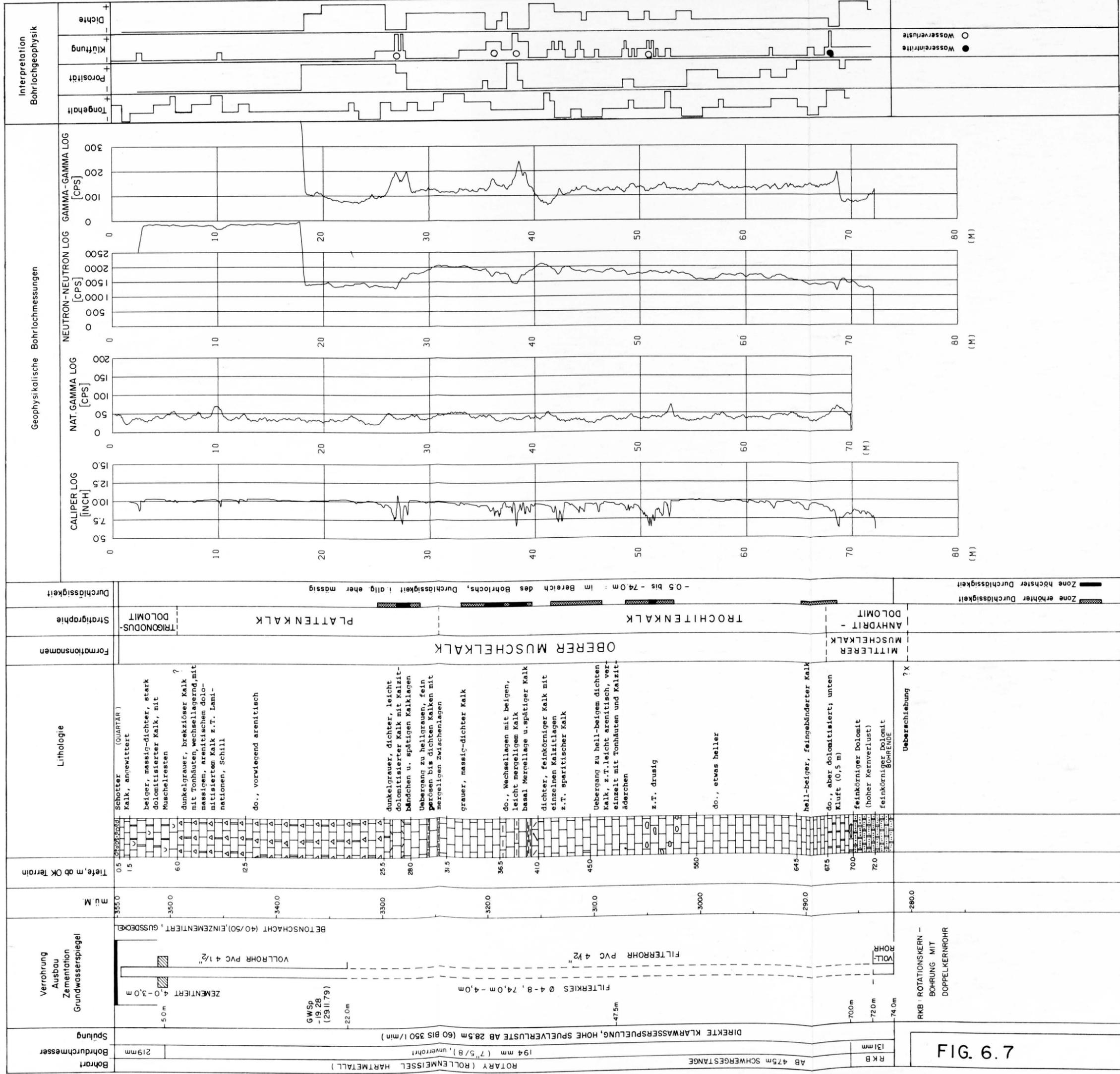
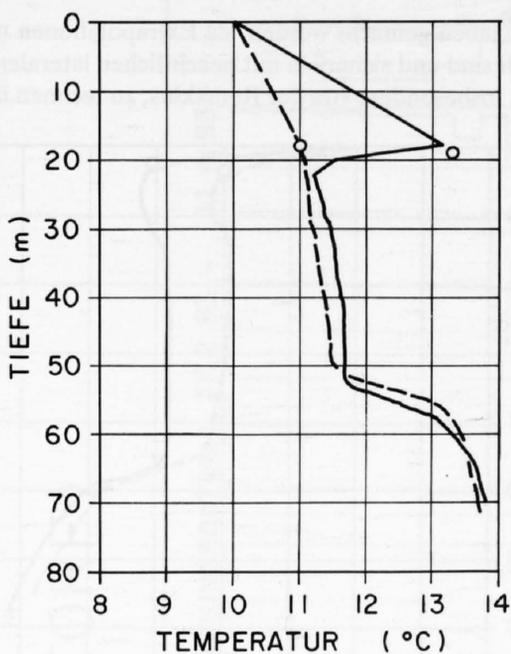


FIG. 6.7



--- TEMPERATURMESSUNG 9. JAN. 1980
 — TEMPERATURMESSUNG 4. JULI 1980
 ○ GRUNDWASSERSPIEGEL

Fig. 6.8: Temperaturverlauf in der Bohrung Mülligen BT2 (NEFF 1980)

6.5 Die Bohrung BT3 (Birmenstorf)

Die Bohrung BT3 wurde an der Jura-Hauptüberschiebung in den Oberen Muschelkalk abgebohrt. Die Bohrstelle befindet sich ca. 1 km nordwestlich von Birmenstorf (AG) auf der rechten Talseite der Reuss inmitten einer Kiesgrube (Figur 2.1). Die 72 m tiefe Bohrung erfolgte im

Rotaryverfahren, ausser den letzten 2 m, die gekernt wurden (Figur 6.9). Diese Bohrung ist heute nicht mehr zugänglich.

6.5.1 Geologische Aufnahme

Nach 2,5 m Kies stiess man bereits auf den anstehenden Fels. Die folgenden 6 m bestehen aus Dolomiten, die gegen unten kalkig werden (unterster Plattenkalk). Die anschliessenden 4,5 m mergeliger Lagen werden als oberste Schichten des Trochitenkalkes interpretiert. Dann förderte man 34 m Kalke, die teils dicht, teils feinkörnig ausgebildet waren. Dazu sind die unteren zwei Drittel dolomitisch entwickelt. Trochitenfunde erhärten die Zuordnung zum Trochitenkalk. Gesamthaft ergaben sich 38,5 m Trochitenkalk, was unter Berücksichtigung der ca. 50°-Schichtneigung den lokalen Verhältnissen der wahren Mächtigkeit von 24 m sehr gut entspricht. Die Grenze zur Anhydritgruppe ist als Scherzone ausgebildet. Wahrscheinlich ist die Dolomitzone deshalb auf mehr als die Hälfte reduziert (4 m). Der Rest der Bohrung umfasst 21 m, die der Sulfatzone angehören und aus Mergel und Gips, jedoch nicht aus Anhydrit bestehen (Figur 6.9).

Die Bohrung BT3 beginnt also mitten im oberen Muschelkalk (unterster Plattenkalk) und zeigt die normale, jedoch stark verkarstete stratigraphische Abfolge zur (obersten) Sulfatzone der Anhydritgruppe, die Gips führt. Die lithologische Ausbildung des Trochitenkalkes weicht etwas von derjenigen in Bohrung BT2 ab (Kapitel 6.4.1), vor allem was den Dolomitgehalt anbelangt.

6.5.2 Pumpversuche

Mittels Pumpversuche in der Bohrung Birmenstorf BT3 konnten folgende hydraulische Parameter bestimmt werden:

Tab. 6.7: Ergebnisse der Pumpversuche in der Bohrung Birmenstorf BT3 und die daraus berechneten hydraulischen Werte (Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwert; NEFF 1980)

Datum und Zeit des Versuchsbeginns	Fördermenge (l/min)	Dauer des Pumpversuchs (min)	Grundwasserspiegel vor Versuchsbeginn (m ab OK Terrain)	Ab-senkung (m)	Berücksichtigte Grundwassermächtigkeit z. Z. des Versuchsbeginns (m)	Transmissivität T (10 ⁻³ m ² /s)	Durchlässigkeitsbeiwert k (10 ⁻⁵ m/s)
Pumpversuch Nr. 1 05. 02. 1980, 08.42	180	120	1,16	ca. 0,4	38	2,44	6,4
Pumpversuch Nr. 2 01. 04. 1980, 09.46	175	120	2,14	ca. 0,4	38	2,44	6,4

Bestimmung der Transmissivität nach THEIS-Aufstiegsmethode

Aus hydrogeologischer Sicht ergibt sich folgende Situation:

- Über der grundwasserführenden Formation befinden sich durchlässige Schotter (Basis der Niederterrassenschotter), darunter folgen evtl. etwas undurchlässiges Moränenmaterial.
- Der Grundwasserleiter wird durch Kalke und Dolomite des Oberen Muschelkalkes (inkl. Anhydritdolomit) gebildet.

Die Durchlässigkeit ist sehr heterogen (einzelne offene bzw. verkarstete Trennflächen in kompakten Kalken), im allgemeinen mässig bis gut. Eine offene Kluft an der Grenze Trochitenkalk/Plattenkalk wurde während des Bohrvorganges zubetoniert. Die Zerklüftung bzw. Verkarstung des Gesteinsmassivs kann als lokal sehr gut entwickelt bezeichnet werden. Die Hohlräume sind jedoch meistens mit Ton gefüllt, so dass die Durchlässigkeit keine entsprechenden Werte erreicht.

Die durchlässigste Strecke der Bohrung dürfte die Basis des Trochitenkalkes und die darunterliegende Scherzone bilden; der Anhydritdolomit (Dolomitzone) ist abgeschert und daher nur noch teilweise erhalten. Die hohen Spülverluste im Dach des Trochitenkalkes vor der Zementierung lassen auch dort eine sehr grosse Durchlässigkeit des Gesteins vermuten.

In der impermeablen Anhydritgruppe im untersten Teil der Bohrung steigt die Temperatur stark an, wobei der Gradient Werte bis zu $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ erreicht. Ein Thermalwasserhorizont wurde jedoch nicht erreicht. Dazu wäre eine Tiefbohrung bis unter das Niveau der Reussklus nötig.

- Die Basis des Grundwasserleiters liegt bei 51 m unter Terrain-Oberkante (Kontakt Anhydritdolomit/Sulfatzone in der Anhydritgruppe).
- Ungespanntes Grundwasser wurde am 8. 1. 1980 auf Kote ca. 336 m ü. M. bzw. am 5. 12. 1980 auf Kote ca. 340 m ü. M. angetroffen.

6.5.3 Bohrlochgeophysik

Die angetroffenen Verhältnisse stimmen sehr gut mit denjenigen aus der Bohrung BT2 überein, insbesondere ist das Temperaturlog mit seiner Aufteilung in zwei unterschiedliche hydrogeologische Zonen sehr ähnlich, ausser dass der Gradient erheblich höher ist als in BT2 (Figuren 6.8 und 6.10). Dies kann durch einen kleineren Anteil von seitlich einströmendem Hangwasser aus dem Muschelkalk erklärt werden. Noch deutlicher als in der Bohrung BT2 steigen die Temperaturen im untersten undurchlässigen Teil sehr stark an ($60^{\circ}\text{C}/\text{km}$), was ohne Zweifel darauf hindeutet, dass der eigentliche Warmwasserträger noch nicht erreicht worden ist. Über die Temperatur und die Tiefe des warmen Tiefenwassers können jedoch keine eindeuti-

gen Angaben gemacht werden, da Extrapolationen nicht möglich sind und sicherlich mit beachtlichen lateralen Effekten, insbesondere von der Reussklus, zu rechnen ist.

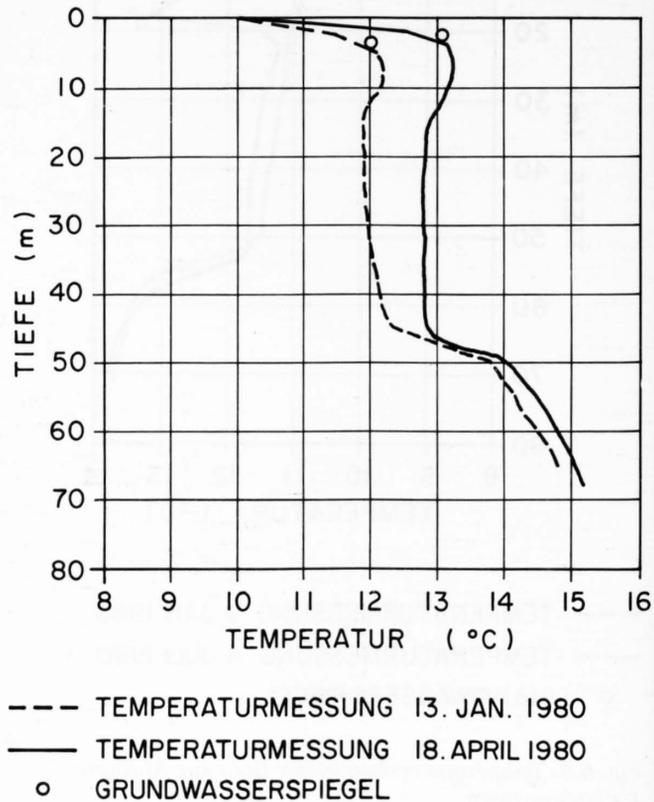


Fig. 6.10: Temperaturverlauf in der Bohrung Birmenstorf BT3 (NEFF 1980)

6.6 Die Bohrung BT4 (Birmenstorf)

Die Bohrung BT4 liegt in einer Kiesgrube, ca. 750 m NW des Dorfes Birmenstorf in der Nähe der Hauptstrasse Birmenstorf – Gebenstorf (Figur 2.1).

Es war vorgesehen, die gesamte Bohrung BT4 im Rotations-Kernverfahren abzuteufen. Wegen technischer Schwierigkeiten musste die Bohrunternehmung nach ca. 20 m für den Rest der Bohrung auf das Rotary-Bohrverfahren umstellen. In drei unterschiedlichen Tiefen wurden je 3 m lange Kerne mit Doppelkernrohr gezogen. Die maximale Bohrtiefe beträgt 241 m (Figur 6.11). Leider ist diese Bohrung heute nicht mehr zugänglich.

6.6.1 Geologische Aufnahme

Da es sich bei der Bohrung BT4 um eine Spülbohrung handelte, war das eindeutige Bestimmen des Bohrkleins sowie das stratigraphische Zuordnen der verschiedenen Schichten nicht immer einfach. Bei tonigmergeligen Proben mit wenig harten, kalkigen Bruchstücken war es oft unklar, ob der in den Proben enthaltene Tongehalt vom Sediment oder von der Bohrspülung stammte. In den harten, kalkigen sowie dolomitischen Schichten des oberen Muschelkalkes waren die Bruchstücke leider so klein, dass

BOHRUNG BT 4 (BIRMENSTORF)

HÖHENLAGE (OK TERRAIN): 343.71 m.ü.M.

AUSFÜHRUNGSDATUM: 17.2.83 - 11.4.83

OK ROHR : 343.61 m.ü.M.

BOHRGERÄT : WIRTH B - IA

NEIGUNG : SENKRECHT

BOHRMEISTER : W. KAESERMANN

COORDINATEN: x 660'049.42

BOHRPROFIL MASSSTAB 1 : 800

GEOLOGISCHE AUFNAHME DURCH : M. OBRIST

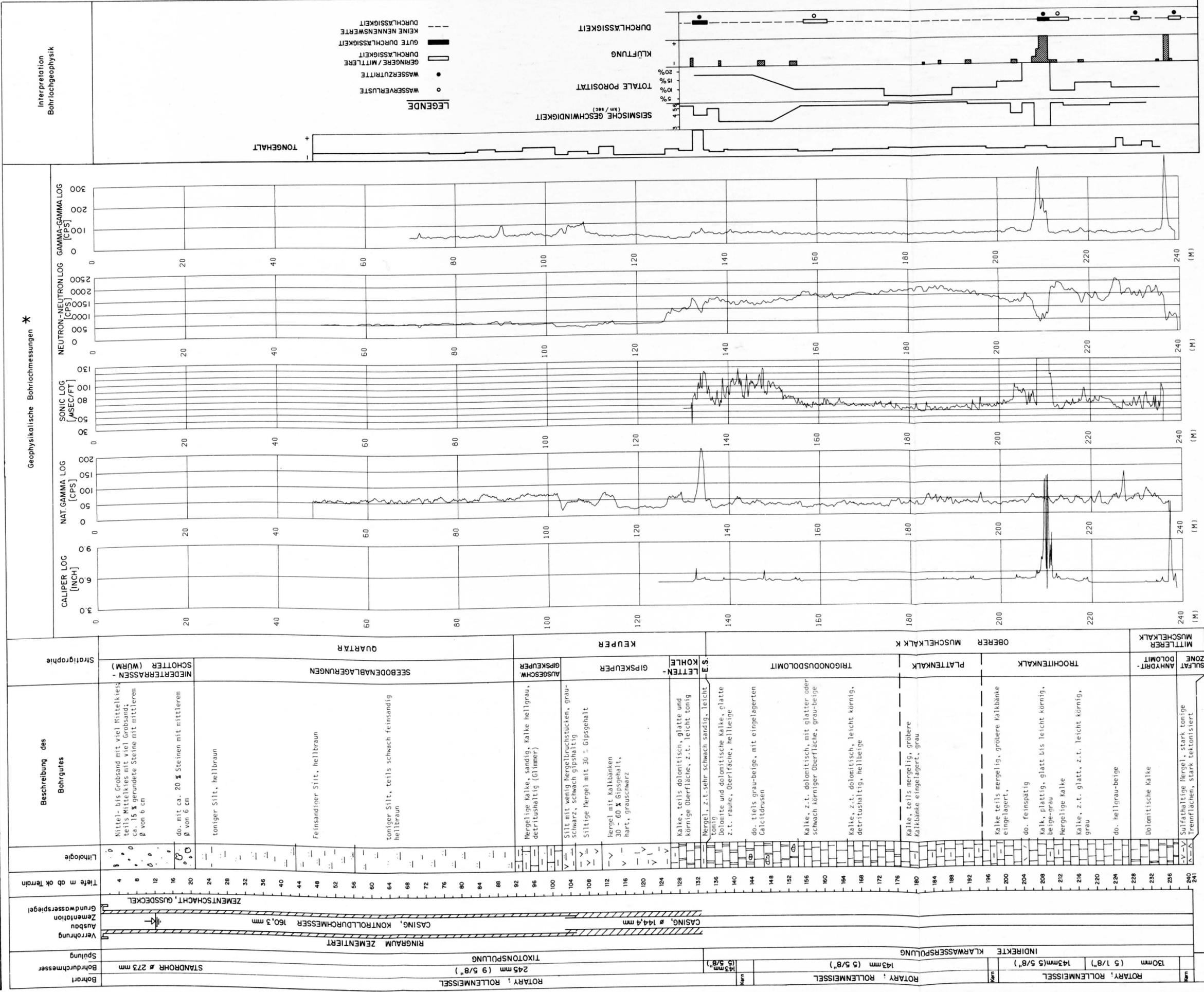


FIG. 6.11

* Bis 132 m Tiefe Messungen in Casing

eine eindeutige Bestimmung und Zuordnung der betreffenden Proben stark erschwert wurde. Für die Festlegung der stratigraphischen Grenzen wurden deshalb auch bohrlochphysikalische Messungen zur Hilfe genommen (Kapitel 6.6.3).

Die ersten 21 m der Bohrung erbrachten Sande und Kiese mit Steinen der Niederterrassenschotter (Würm; Figur 6.11). Darunter folgen tonig-siltige Seebodenablagerungen, bis bei ca. 92 m ab Terrainoberkante sandig-mergelige Kalke des mittleren Keuper (Gipskeuper) einsetzen. Die Grenze zum oberen Muschelkalk (Grenzdolomit) liegt bei 126 m ab OK Terrain. Ab ca. 228 m folgt der mittlere Muschelkalk (Anhydrit-Dolomit). Die Bohrung wurde bei 241 m ab Terrain-Oberkante, in stark tektonisiertem, sulfathaltigem Mergel der Sulfatzone abgebrochen.

6.6.2 Pumpversuche

In der Bohrung BT4 gelangte nach Abschluss der Bohrarbeiten ein Leistungspumpversuch in drei Stufen mit anschließendem Wiederanstieg sowie ein Langzeitversuch mit konstanter Fördermenge und abschließendem Wiederanstieg zur Durchführung (Figur 6.12).

Der Ruhewasserspiegel des Muschelkalkes wurde bei Kote ca. 332 m ü. M. angetroffen (19. 4. 1983). Die Verrohrung reicht bis 133 m unter OK Terrain, d. h. bis zum Dach des Muschelkalkes. Bei dem Pumpversuch mit variabler Fördermenge befand sich die Pumpe ca. 100 m unter OK Terrain, bei dem Dauerpumpversuch bei 24 m unter OK Terrain. Bei der Verarbeitung der Absenkdaten wurde nach KRUSEMAN und DE RIDDER (1979) sowie nach THIERY, VANDENBEUSCH und VANBOURG (1983) vorgegangen. Allerdings ergaben sich bei der Auswertung gewisse Schwierigkeiten, da in der Bohrung Birmenstorf vermutlich zwei oder drei verschiedene Kluftkörper untereinander kommunizieren. Die Ergebnisse der Pumpversuche sind wie folgt:

Transmissivität $T = 4,21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Durchlässigkeit $K = 3,89 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Spezifische Ergiebigkeit $Q/s = 8,98 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
(wobei Q = Ergiebigkeit bei einer Absenkung s)

Um Veränderungen der physikalisch-chemischen Parameter sowie des Isotopengehaltes des Thermalwassers näher zu untersuchen, wurden während des Pumpversuchs laufend Wasserproben entnommen und analysiert. Figur 6.12 zeigt den Einfluss der verschiedenen Pumpenleitungen auf die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit sowie auf den Gehalt von Tritium. Dabei wird eine geringe, mit zunehmender Pumpleistung sich verstärkende Vermischung (ca. 10%) der Thermalwasserkomponente mit weniger warmem, weniger mineralisiertem und jüngerem Wasser deutlich (d. h. jünger als die ersten Nukleartests in den fünfziger Jahren).

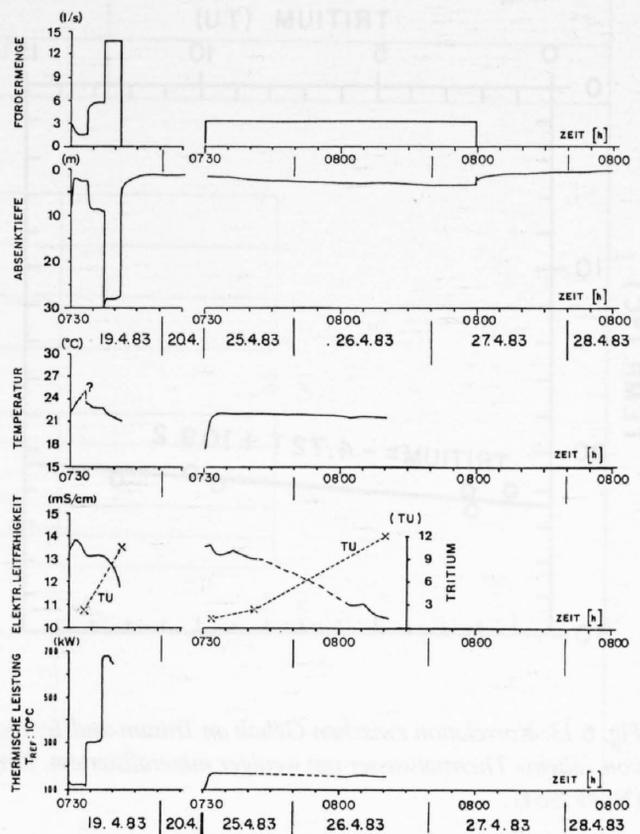


Fig. 6.12: Beziehungen zwischen Fördermenge bzw. Förderzeit und Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, Gehalt an Tritium (TU = Tritium Unit) sowie thermischer Leistung (Referenztemperatur 10°C) in der Bohrung Birmenstorf BT4 (NEFF 1984)

Im weiteren lassen die linearen negativen Korrelationen zwischen Tritiumgehalt und Temperatur bzw. elektrischer Leitfähigkeit darauf schließen, dass die unverdünnte Komponente von «altem» Thermalwasser (also noch nicht mit Tritium vermischt) sehr ähnliche Eigenschaften aufweist wie das ganz am Anfang des Pumpversuchs gewonnene Thermalwasser. Dies kann auch mittels einer graphischen Interpretation gezeigt werden, indem die negativen Korrelationsgeraden der beiden Diagramme in Figur 6.13 mit den entsprechenden Ordinaten zum Schnitt gebracht werden.

6.6.3 Bohrlochgeophysik

Die lithologische Interpretation erfolgte aufgrund einer qualitativen Analyse der Logs (natürliche Gamma-, Sonic-, Neutron-Neutron-Log) längs der gesamten Bohrstrecke sowie von Untersuchungen des Bohrkleins (Figur 6.11).

Die stratigraphische Gliederung des oberen Muschelkalkes erfolgte mangels geeigneter Kriterien in den geophysikalischen Bohrlochmessungen aufgrund der Mächtigkeitsangaben in MERKI (1961) unter Berücksichtigung der Schichtneigungen.

Die quantitative Interpretation der geophysikalischen Bohrlochmessungen lieferte folgende Porositätsverteilung im oberen Muschelkalk:

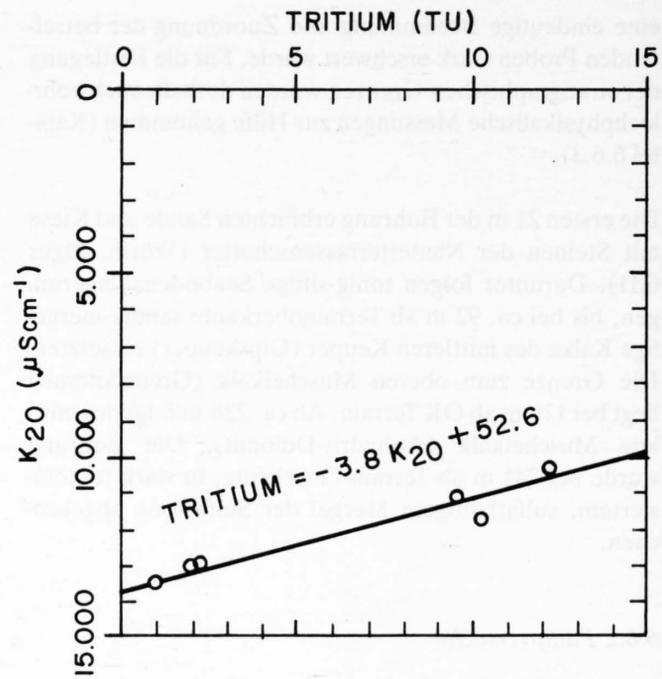
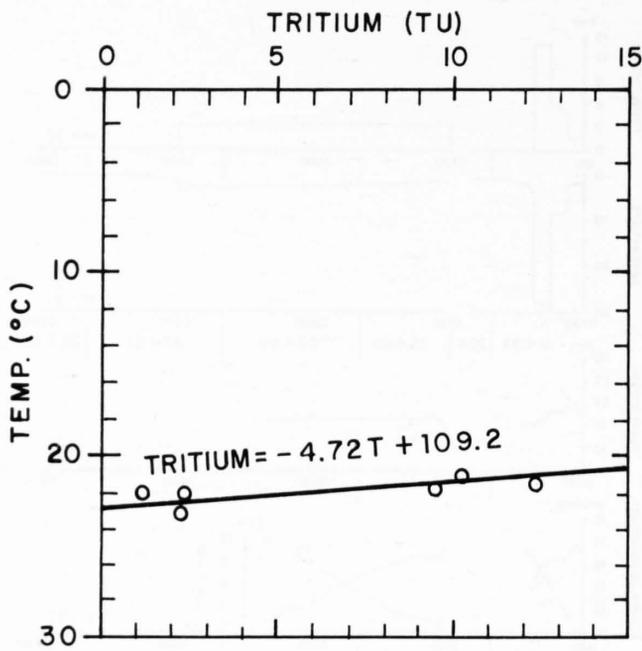


Fig. 6.13: Korrelation zwischen Gehalt an Tritium und Temperatur bzw. elektrischer Leitfähigkeit, die auf eine Vermischung von «altem» Thermalwasser mit weniger mineralisiertem, jüngerem Wasser in der Bohrung Birmenstorf BT4 schliessen lassen (NEFF 1984)

Tab. 6.8: Bestimmung der totalen Porosität mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Bohrung Birmenstorf BT4 (NEFF 1984)

Tiefe in m ab Terrain-Oberkante	Geologische Formation	Totale Porosität in %	Bemerkungen
134–150	Trigonodusdolomit	> 15	lt. Neutron-Neutron- und Sonic-Log, lt. Kaliper-Log starke Klüftung von 133–155 m
150–155	Trigonodusdolomit	> 10	
155–178	Trigonodusdolomit/Plattenkalk	5–10	
178–190	Plattenkalk	ca. 5	lt. Kaliper-Log schwache Klufthanzeichen zwischen 185–194 m
190–203	Plattenkalk/Trochitenkalk	ca. 10	kontinuierlicher Anstieg der Porosität
203–219	Oberer/mittlerer Trochitenkalk		lt. Kaliper-Log Zone mit starker Klüftung bzw. Auskesselung des Bohrloches
219–241	Trochitenkalk/mittlerer Muschelkalk	5–20	stark schwankende Porosität

Im Übergangsbereich zwischen Trochitenkalk und Anhydritdolomit sowie an dessen Basis treten nochmals vereinzelte Klüfte auf.

Der durchfahrene untere Gipskeuper ist durch eine sehr niedrige Gamma-Aktivität gekennzeichnet, was auf das Vorhandensein von z. T. dicht ausgebildetem Anhydrit hindeuten dürfte.

Zu Versuchszwecken wurde eine Fernsehinspektion des Oberen Muschelkalkes in der Bohrung BT4 durchgeführt (Figur 6.14).

Die Polaroidaufnahme zeigt eine Kluft in 195,10 m Tiefe (Trochitenkalk). Die Blickrichtung ist axial, d. h. in das Bohrloch hinunter gerichtet.

BOHRUNG BT 3 (BIRMENSTORF)

HÖHENLAGE (OK TERRAIN): 341.30 m ü.M. (URSPRÜNG. O.K. TERRAIN) AUSFÜHRUNGSDATUM: 30. 11. 80 - 15. 1. 81
 OK ROHR : 346.08 m ü.M. NEIGUNG : SENKRECHT BOHRGERÄT : WIRTH B1-A
 KOORDINATEN : 257.650/660.100 RICHTUNG : — BOHRMEISTER : W. KAESERMANN

BOHRPROFIL MASSSTAB 1 : 400

GEOLOGISCHE AUFNAHME DURCH: DR. J.F. SCHNEIDER

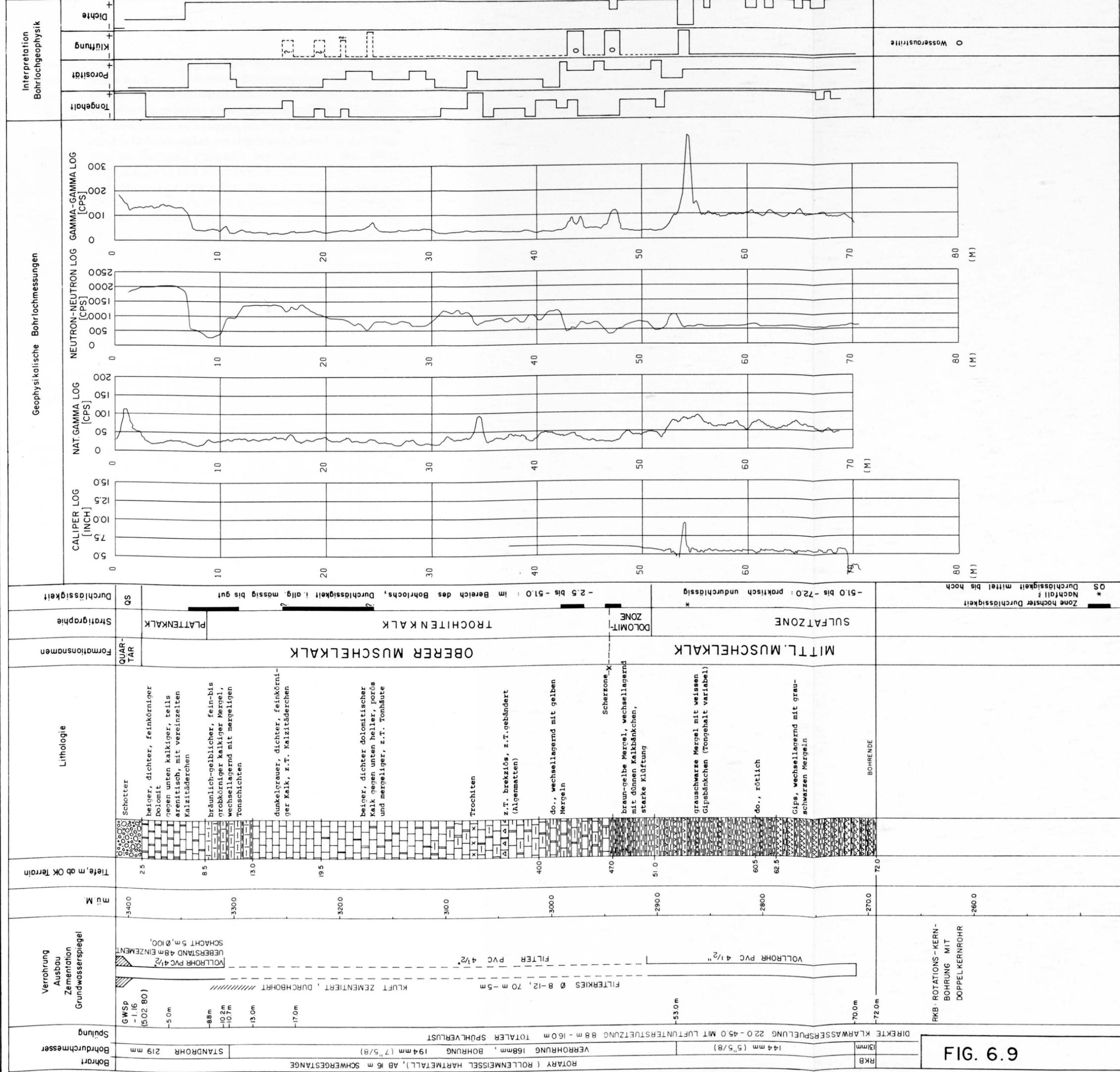


FIG. 6.9

Die Fernsehinspektion brachte gegenüber dem Kaliper-Log keine zusätzlichen Informationen über die Kluffverteilung im Oberen Muschelkalk. Der kleine Bildausschnitt sowie die teilweise Trübung der Bohrlochflüssigkeit erschwerte die Interpretation der TV-Aufnahmen.

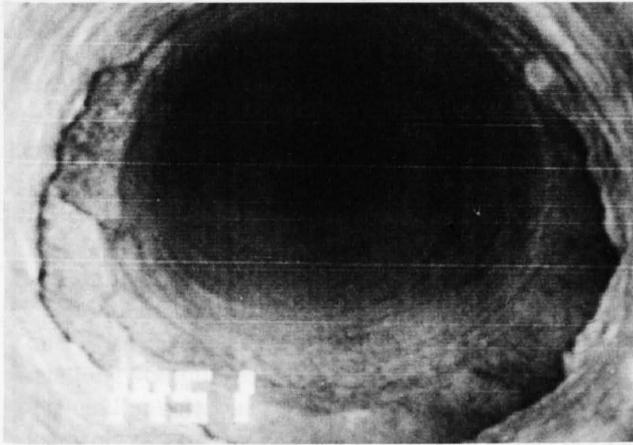


Fig. 6.14: Fernsehaufnahme einer Kluft im Trochitenkalk aus 195,10 m Tiefe in der Bohrung Birnenstorf BT4 (NEFF 1984)

Während eines Pumpversuchs (Pumpleistung 195 l/min) wurden Flowmetermessungen durchgeführt. Diese Messungen ergaben, dass 85–90% des Wassers zwischen 134 und 136 m zutritt. Das restliche Wasser stammt aus dem markanten Kluffbereich zwischen 208 und 212 m (mittlerer Trochitenkalk).

Wenig Wasser tritt auch in ca. 230 und 238 m Tiefe zu. Es verlässt aber das Bohrloch grösstenteils wieder bei ca. 215 m Tiefe, d. h., es gibt zwischen diesen beiden Niveaus eine bohrlochinterne Zirkulation.

Ein Temperatur-Log wurde 4 Tage nach Ende des Bohrens sowie nach ca. 1,5 Monaten Beruhigungszeit durchgeführt (Figur 6.15). Im Muschelkalkbereich beträgt die Temperaturdifferenz zwischen diesen Messungen über 1°C. Negative Temperaturänderungen als Folge des Eindringens der kühlen Bohrflüssigkeit ins durchlässige Gestein sind in der zweiten Messung entweder verschwunden (bei 160 m mögliche Zone von Wasserverlusten) oder sind zu positiven Anomalien geworden (bei 135 m und bei 208 m). Diese beiden Zonen wurden durch die Flowmetermessungen als wichtigste Wasserzutrittsstellen identifiziert. Bei 180 m hat sich eine lokale Temperaturerhöhung (im gestörten Log) zu einer Temperaturerniedrigung im beruhigten Zustand umgewandelt. Es könnte sich dabei um eine Stelle mit geringem kühlem Wasserzutritt handeln, der sich im Flowmeter-Log nicht bemerkbar machte.

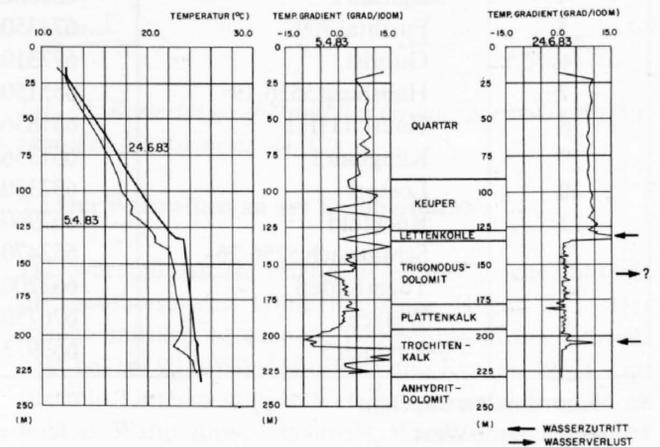


Fig. 6.15: Temperaturverlauf in der Bohrung Birnenstorf BT4 (NEFF 1984)

7. TEMPERATURGRADIENT UND WÄRMEFLUSS

J. C. Griesser [1, 2] und L. Rybach [1]

Tab. 7.1: Gradient und Wärmefluss in einigen ausgewählten Bohrungen (NEFF 1984)

Nr.	Bohrung	Koordinaten	Gradient (°C/km)	Wärmefluss (mW/m ²)
1	Beznau	659491/267242	42,8	106
2	BIRMO	660350/257700	51,0	155
3	Densbüren	646455/255055	50,0**	120**
4	Eglisau 2	680800/269875	29,0	102
5	Furthtal 709	674350/255890	34,0	95
6	Gubrist	677310/252775	40,0	135
7	Habsburg 5556.19	655150/256780	54,0	184
8	Hausen HH1	657836/256939	44,0	152
9	Klingnau 1	661356/271397	34,0	118
10	Lostorf	637330/249240	23,8	96
11	Ruckfeld	662960/266850*	40,0	90**
12	Schinznach 5256.26	652470/256730	36,0	90
13	Tegerfelden	663700/268700*	> 55,0	–
14	Weiach	676750/268620	43,0***	120
15	Zurzach 3	663973/271224	41,5	126

* Koordinaten ungenau

** geschätzter Wert

*** STIEFEL (1984)

Für die Nutzung der geothermischen Energie ist die Kenntnis des Temperaturverlaufs mit der Tiefe von ausschlaggebender Bedeutung. Da Wärme sehr effizient durch Wasser transportiert wird, stellt eine detaillierte Untersuchung des Temperaturfeldes zudem ein ausgezeichnetes Hilfsmittel dar, um über die Herkunft und die Fliessrichtung von Tiefengrundwasser Aufschluss zu erhalten. In einem konvektiv dominierten Gebiet (d. h. einem Gebiet mit einer ausgeprägten Grundwasserzirkulation), wie entlang der Jura-Hauptüberschiebung, werden die thermischen Verhältnisse im Untergrund hauptsächlich durch die topographischen Gegebenheiten, die Verteilung der Permeabilität in den einzelnen geologischen Einheiten und von der Zirkulationstiefe des Grundwassers bestimmt.

7.1 Datengrundlage

Im Rahmen des NEFF-Projektes aus dem Jahre 1984 konnten in mehr als 30 Bohrungen Temperaturmessungen durchgeführt werden (GRIESSER und RYBACH 1983). Die meisten dieser Bohrungen reichen bis 150 m unter Terrain Oberkante und liegen direkt an der Jura-Hauptüberschiebung. Die Messungen wurden in Tiefenabständen von 1 m

durchgeführt und besitzen eine Genauigkeit von ca. $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Die Temperaturmessungen des Tiefbohrprogramms der Nagra wurden, soweit diese veröffentlicht waren, mitverwendet. Die bereits bestehenden Gradienten- und Wärmeflusskarten (NEFF 1980; BODMER 1982) konnten durch die neuen Daten verfeinert werden. Diese neuen Karten erlauben eine genauere Angabe der Temperatur bis zur Basis des Mesozoikums. Andererseits liefern die Messungen z. T. detaillierte Informationen über das lokale oberflächennahe Temperaturfeld in der Region von Hausen – Birmenstorf und von Baden – Ennetbaden.

Für die regionalen Temperatur- und Wärmeflusskarten wurden ausschliesslich Bohrungen verwendet, die keine offensichtliche Beeinflussung durch oberflächennahe kühle Grundwässer zeigten (Tabelle 7.1).

Um den Einfluss der Topographie auf das gemessene Temperaturfeld zu eliminieren, wurde rechnerisch eine sogenannte Topographiekorrektur durchgeführt, wobei in diesem Gebiet die topographiekorrigierten Temperaturgradienten weniger als 5% von den unkorrigierten Werten abweichen (BODMER 1982). Auf die Durchführung einer Paläoklimakorrektur wurde verzichtet, da für das gesamte Gebiet eine identische paläoklimatische Geschichte angenommen werden kann und somit überall die gleiche Beeinflussung vorliegt (Figur 7.1).

[1] Institut für Geophysik, ETH Zürich

[2] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

Zur Berechnung des Wärmeflusses in einer Bohrung wurden die Wärmeleitfähigkeiten an den entsprechenden Bohrkernproben bestimmt. Falls keine solchen Proben zur Verfügung standen, wurden die Werte der entsprechenden Formation im Untersuchungsgebiet aus existierenden petrophysikalischen Datensammlungen entnommen.

Der Wärmefluss wurde nach der Methode von Bullard bestimmt (BULLARD 1939; in BODMER 1982). Die Isolinienkarten wurden mit Hilfe eines Programmpaketes von Dr. E. Klingele, Institut für Geophysik ETHZ, erstellt (Figur 7.2).

Die Bohrungen konzentrieren sich hauptsächlich auf das Gebiet entlang der Jura-Hauptüberschiebung und auf die Zone zwischen Beznau und dem Rhein. Die numerische Erstellung von interpolierten Isolinienkarten ist dementsprechend unsicher und kann sich mit jedem neuen Wert wieder etwas ändern. Besonders fraglich ist die Ausdehnung der Anomalie südlich der Jura-Hauptüberschiebung. Es ist durchaus möglich, und dies wird durch die thermohydraulischen Modellrechnungen unterstützt (Kapitel 8.2), dass die Anomalie gegen Süden rasch abklingt und der Wärmefluss bereits wenige Kilometer südlich der Jura-Hauptüberschiebung zu Werten um 90 mW/m^2 übergeht, die für das nördliche Schweizer Mittelland charakteristisch sind.

7.2 Die Verteilung des geothermischen Gradienten

In Gebieten mit konvektivem Wärmetransport ist der Temperaturgradient stark tiefenabhängig. Für die regionale Temperatur-Gradientenkarte wurden deshalb nur diejenigen Messungen verwendet, die eine angenähert lineare Temperaturzunahme mit der Tiefe aufwiesen (Figur 7.1). Dadurch konnten diejenigen Messungen eliminiert werden, die eine offensichtliche Beeinflussung der Temperatur durch lokale Wasserzirkulation aufwiesen. Bis in welche Tiefen die errechneten Temperaturgradienten ihre Gültigkeit besitzen, ist ungewiss, da nur wenige Messungen bis in grosse Tiefen zur Verfügung standen. Der mittlere geothermische Gradient im schweizerischen Mittelland liegt zwischen 30 und 35°C/km , wobei gegen die Alpen hin eine Abnahme auf ca. 25°C/km erfolgt (Bundesamt für Energiewirtschaft, 1981).

Die hohen Gradienten entlang der Jura-Hauptüberschiebung im Untersuchungsgebiet sind eine Folge des Aufstiegs warmer Tiefenwässer entlang dieser Störungszone (Figur 7.1). Das Gebiet mit einem Gradienten von mehr als 40°C/km bildet eine NE-SW-verlaufende Zone mit dem unteren Aaretal als Zentrum. Die neuesten Messungen der Nagra deuten darauf hin, dass sich die Wärmeanomalie bedeutend weiter nach Westen erstreckt als bisher angenommen worden ist.

Besonders erwähnenswert ist die Bohrung Tegerfelden (Figur 2.1), wo man nach einem mehrstündigen Bohrstillstand bei 430 m Tiefe (Trochitenkalk) eine Spülungstem-

peratur von 40°C gemessen hat (GRIESSER 1985). Zusammen mit den etwas nördlicher gelegenen Thermalwasserbohrungen in Zurzach zeigt diese Messung, dass auch in Gebieten am nördlichen Permkarbon-Trogrand lokal mit Warmwasserzirkulationen gerechnet werden kann, die aber durch etwas weiträumigere Messungen noch nicht genügend erfasst sind.

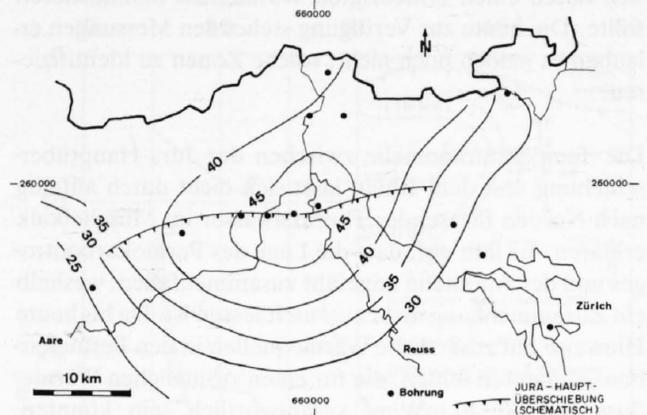


Fig. 7.1: Karte des geothermischen Gradienten im Gebiet der zentralen Nordschweiz (in $^\circ\text{C/km}$)

7.3 Der Wärmefluss an der Erdoberfläche

Die Wärmeflusskarte zeigt generell das gleiche Bild wie die geothermische Gradientenkarte (Figur 7.2). Der durchschnittlich berechnete Wärmefluss in der Schweiz liegt bei ca. 90 mW/m^2 (BODMER und RYBACH 1984). Das gesamte Untersuchungsgebiet hat demzufolge einen erhöhten Wärmefluss. Maximale Wärmeflüsse von über 150 mW/m^2 wurden in den Bohrungen zwischen Schinznach und Baden gemessen. Ausgehend von diesem Zentrum scheint gegen Westen entlang der Jura-Hauptüberschiebung eine Abnahme des Wärmeflusses einzutreten. Die Bohrungen Beznau, Klingnau und Ruckfeld zeigen mit Werten um 90 – 118 mW/m^2 ebenfalls nur noch leicht erhöhte Wärmeflusswerte (Figur 2.1). Im Gebiet zwischen Beznau und der Jura-Hauptüberschiebung existieren noch keine zugänglichen Temperaturmessungen. Solche Daten sind aber von ausschlaggebender Bedeutung, um die nördliche Ausdehnung der Anomalie genauer abzugrenzen.

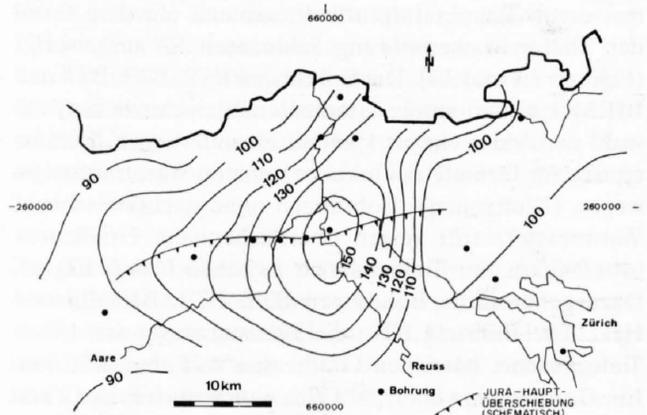


Fig. 7.2: Karte des Oberflächenwärmeflusses im Gebiet der zentralen Nordschweiz (in mW/m^2)

Eine ebenfalls abnehmende Tendenz des Wärmeflusses nach Osten zeigen die entsprechenden Werte in und um Zürich. Der erhöhte Wärmefluss im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung lässt sich durch die Thermalwasser-aufstösse entlang dieser Störungszone erklären. Die in diesem Gebiet zusätzlich austretende Wärmeenergie muss in der Infiltrationszone des Thermalwassers fehlen, was sich durch einen erniedrigten Wärmefluss manifestieren sollte. Die heute zur Verfügung stehenden Messungen erlauben es jedoch noch nicht, solche Zonen zu identifizieren.

Die Temperaturanomalie zwischen der Jura-Hauptüberschiebung und dem Rhein lässt sich nicht durch allfällig nach Norden fließendes Thermalwasser im Muschelkalk erklären. Es fällt auf, dass die Lage des Permokarbondrogens und der Anomalie ungefähr zusammenfallen, weshalb ein Zusammenhang nicht auszuschliessen ist. Da bis heute Hinweise auf zusätzliche Wärmequellen in den Permokarbonsedimenten fehlen, die für einen zusätzlichen Wärmefluss von 30–40 mW/m² verantwortlich sein könnten, muss angenommen werden, dass tiefgreifende Wasserzirkulationen den Wärmetransport verursachen. Bei den vorhandenen Temperaturgradienten würden bereits vertikale Wasserbewegungen von ca. 0,5–1 cm/Jahr genügen, um den zusätzlich benötigten Wärmefluss zu erzeugen (GRIESER 1985).

7.4 Das lokale, oberflächennahe Temperaturfeld

Der grösste Teil der durchgeführten Temperaturmessungen liegt in den Gebieten Schinznach – Birmenstorf und in Ennetbaden. Diese Messungen erlaubten detailliertere Untersuchungen des oberflächennahen Temperaturfeldes. Die verwendeten Bohrungen liegen fast ausschliesslich südlich der Jura-Hauptüberschiebung im Keuper und oberen Muschelkalk, weshalb alle Temperaturmessungen von der Thermalwasserzirkulation in diesen Aquifern beeinflusst sind.

7.4.1 Die Region Schinznach – Hausen – Birmenstorf

In fünf Bohrungen zwischen Hausen und Birmenstorf wurden deren Temperaturprofile zusammen mit dem Profil der Thermalwasserbohrung Schinznach S2 ausgewertet (Figuren 2.1 und 7.3). Die Bohrungen BT2, BT3, BT4 und BIRMO weisen starke Gradientenunterschiede auf, obwohl sie nicht mehr als 1 km auseinanderliegen. Dies ist typisch für Gebiete mit lokal begrenzten Wasseraufstiegswegen (Kluftzonen). Bohrungen ohne nachgewiesenem Warmwasserzutritt zeigen oberflächennahe Gradienten bis 60°C/km (im Tiefenbereich zwischen 0 und 100 m). Dazu gehören die Bohrungen BT2, BT3, BIRMO und HH1. Die Bohrung BT4, die Thermalwasser aus 130 m Tiefe lieferte, hat einen Gradienten von über 80°C/km. Ein Gradienten von über 100°C/km wurde auch in der Thermalwasserbohrung S2 Schinznach angetroffen (NEFF 1980); das Temperaturprofil gibt Hinweise auf mögliche laterale Thermalwasserströmungen im Aquifer (Figur 7.3).

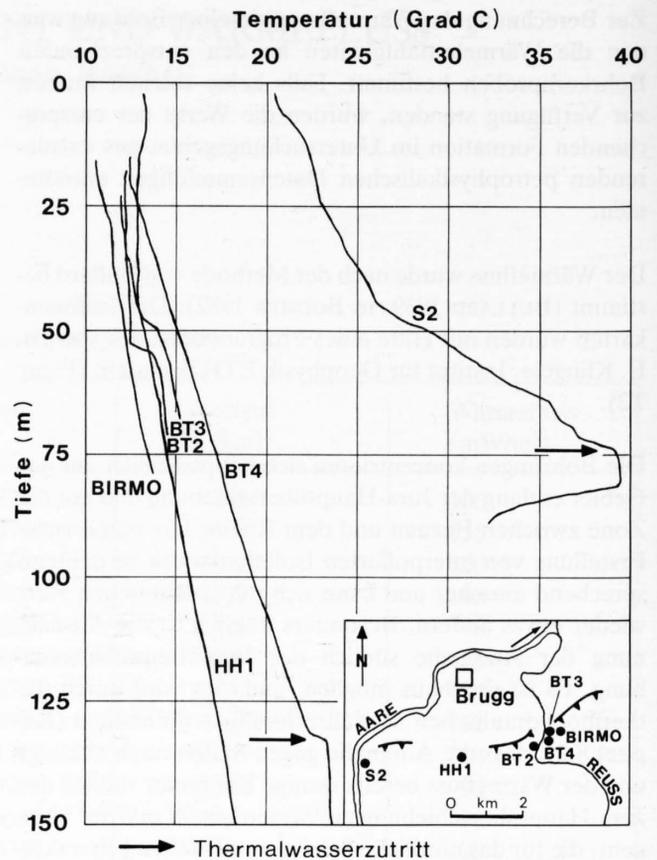


Fig. 7.3: Oberflächennahe Temperaturverlauf in Bohrungen zwischen Schinznach und Birmenstorf (NEFF 1984)

Zur Abschätzung der Thermalwasserflussmenge in einer Störungszone, die eine bestimmte Temperaturanomalie verursacht, stehen verschiedene Lösungsansätze zur Verfügung. In einem vereinfachten Modell kann angenommen werden, der Wasseraufstieg erfolge entlang einer geneigten, ebenen und engen aber unendlich ausgedehnten Kluft. Steigt Wasser entlang dieser Kluft auf, so wirkt es als Wärmequelle für das darüberliegende Gestein. Wird diese Wärme, ausser im Aquifer, nur durch Wärmeleitung übertragen, so erfolgt eine charakteristische Beeinflussung des Temperaturgradienten. Nach einer genügend langen Zeitspanne stellt sich ein Temperaturgleichgewicht ein, wobei ein hoher Gradient über und ein niedriger Gradient unter der Kluftzone angetroffen wird.

Die Durchflussmenge kann aus diesen beiden Gradienten und aus der Neigung des Aquifers abgeschätzt werden (LEWIS und BECK 1977):

$$f = |q_o - q_u| / c_f \cdot G \cdot \sin \alpha$$

f = Durchflussmenge pro Meter Aquifer (kg/s*m)

q_o = Wärmefluss oberhalb des Aquifers (W/m²)

q_u = Wärmefluss unterhalb des Aquifers (W/m²)

c_f = Wärmekapazität des Wassers (J/kg °C)

G = Ungestörter Temperaturgradient (°C/m)

α = Fallwinkel des Aquifers

Die Bohrung Birnenstorf BT4 zeigt über der Hauptwassereintrittsstelle einen hohen Gradienten (80°C/km) und darunter einen niedrigen Gradienten von ca. 20°C/km (Figuren 6.15 und 7.3). Die Wärmeleitfähigkeit wird als 3,0 W/m °C angenommen. Dies ergibt eine Wärmeflussdifferenz von 180 mW/m². Bei einer Neigung des Aquifers von 45° und einem ungestörten Gradienten von 35°C/km lässt sich eine Durchflussmenge von ca. 1,5 × 10⁻³ kg/s pro Meter Jura-Hauptüberschiebung errechnen. Bei einer Intersektionslänge von 1 km zwischen der Jura-Hauptüberschiebung und der Klus westlich von Birnenstorf würden somit dort ca. 1,5 kg Thermalwasser pro Sekunde natürlich in die Schotter austreten. Bei einer Austrittstemperatur von 25°C und einer Abkühlung von 15°C entspricht dies aber lediglich einer thermischen Leistung von 0,1 MW.

7.4.2 Die Region Baden-Ennetbaden

In Ennetbaden wurden im Rahmen der Vorabklärungen für den Bau eines Umfahrungstunnels unter der Leitung des geologischen Büros Dr. von MOOS AG 14 Flachbohrungen abgeteuft (DR. VON MOOS AG 1983, Figur 7.4). Diese Bohrungen liegen sowohl südlich als auch nördlich der Jura-Hauptüberschiebung und reichen immer mindestens 5 m ins Mesozoikum. Die Bohrtiefen schwanken zwischen 15 m und 51 m. Die Bohrungen südlich der Jura-Hauptüberschiebung liegen meist im ausgelaugten Gipskeuper. Diejenigen nördlich der Überschiebung dagegen im oberen Keuper oder im Opalinuston. Die Mächtigkeit des Hangschutts und des Quartärs beträgt 4 m bis 21 m.

Diese Bohrungen erlaubten, das Temperaturfeld im Nahbereich der Jura-Hauptüberschiebung im Detail zu studieren (Figur 7.4). Obwohl nicht weit auseinandergelegen, weisen sie z. T. stark unterschiedliche aber stets erhöhte Gradienten auf (Figur 7.4). Das Maximum beträgt 150°C/km in der Bohrung F. Auch die weiter entfernten Bohrungen zeigen noch Gradienten, die über dem regionalen Wert von ca. 40°C/km liegen. Die grosse Heterogenität der Gradienten deutet auf lokal begrenzte Wasserzirkulationen, auch innerhalb des Gipskeupers, hin. Dies wird dadurch bestätigt, dass der Gipskeuper meist ausgelaugt angetroffen wurde und auch der Chemiesmus der Wässer sehr unterschiedlich ist.

Die Fassungsstiefe der Quellen in Baden liegt auf Kote 342,8 m bis 353,2 m ü. M. In Ennetbaden werden die «Allgemeine Quelle» und die «Adler-Quelle» auf Kote 341,6 m bis 341,7 m ü. M. gefasst, die «Schwanen-Quelle» auf 332,2 m ü. M. Extrapoliert man die Temperatur der Bohrung F, die nahe der «Adler-Quelle» liegt, erreicht man 40°C auf Kote 340 m ü. M. Die Bohrungen B und C 50 m östlich von Bohrung F würden 40°C erst auf Kote ca. 330 m ü. M. erreichen.

Von besonderem Interesse ist die 51,5 m tiefe Bohrung E (Figur 7.4). Sie ist die östlichste Bohrung und reicht bis auf eine Kote von 338 m ü. M. In 49,5 m Tiefe wurde eine Temperatur von 45,7°C gemessen. Dies ist leicht niedriger

als die Austrittstemperaturen in der «Allgemeinen Quelle» und der «Adler-Quelle» (46,2 – 46,7°C). Im ausgelaugten Gipskeuper registrierte man in der Bohrung E einen Gradienten von 85°C/km, im gesunden Gipskeuper 100°C/m und im untersten Teil, wo völlig aufgeweichtes Bohrgut gefunden wurde, einen solchen von 54°C/km.

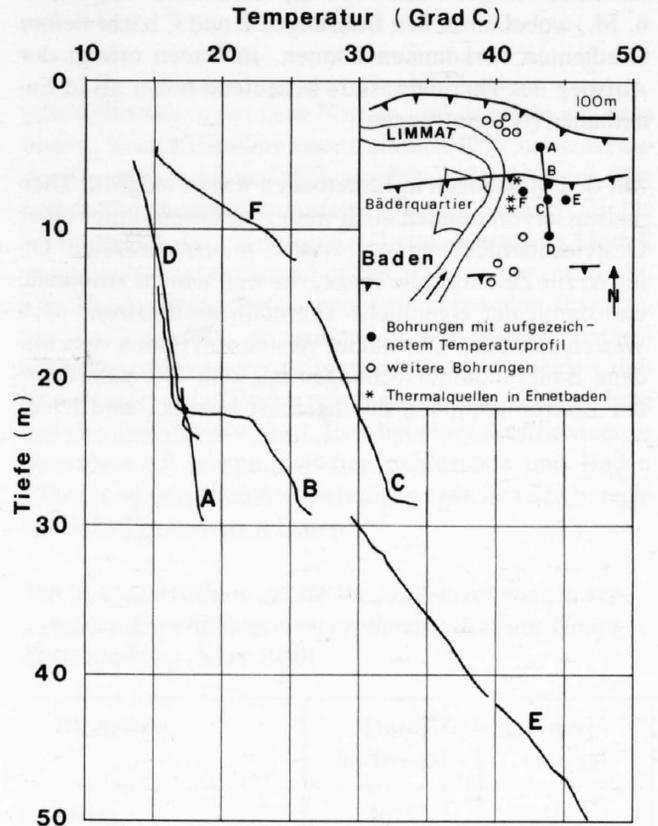


Fig. 7.4: Temperaturverlauf in ausgewählten Bohrungen in Ennetbaden

Diese Messungen lassen den Schluss zu, dass Wasser von über 40°C in Ennetbaden nur lokal bis zur Kote 340 m ü. M. aufsteigt, nämlich im Bereich der bekannten Quellen und der Bohrung E. Dazwischen fließen zum Teil kalte Wässer im Gipskeuper, wie dies der Temperatursprung in der Bohrung B im Grenzbereich zwischen ausgelaugtem und gesundem Gipskeuper beweist. Wiederholte Temperaturmessungen im Zeitraum von einigen Monaten haben gezeigt, dass Temperaturschwankungen von über 1°C im Gipskeuper vorkommen können. Dies lässt sich durch eine jahreszeitlich bedingte Beimischung von Oberflächenwässern an die Wasserzirkulation im Gipskeuper erklären. Dieses System überlagert den eigentlichen Thermalwasserhorizont im Grenzbereich Gipskeuper/oberer Muschelkalk.

Aufgrund der bestehenden Daten wurde der Temperaturverlauf in einem Profil senkrecht und parallel zur Hauptüberschiebung dargestellt (Figur 7.5). Das N-S-Profil zeigt eine maximale Erwärmung im Bereich der Bohrungen C und D südlich der in SCHINDLER (1977) eingezeichneten Ausbisslinie der Jura-Hauptüberschiebung. Die leichte Asymmetrie der Isolinien lässt sich mit dem Südfallen (ca. 45°) des Aquifers erklären.

Im E-W-Profil, das ca. 50 m südlich der Jura-Hauptüberschiebung liegt, sind zusätzlich zu den drei Bohrungen die Fassungenstiefen der Thermalquellen und deren Austrittstemperaturen eingezeichnet (Figur 7.5). In diesem Profil folgen die Isothermen generell dem Verlauf der Topographie. Die 46°C-Isotherme (= Thermalwasserhorizont) verläuft in Ennetbaden zwischen Kote 330 m und 340 m ü. M., wobei unter den Bohrungen F und C leicht tiefere Gradienten vorkommen können. In Baden erfolgt der Aufstieg des Thermalwassers bedeutend höher als in Ennetbaden (N-S-Störungen).

Mit den Messungen in Ennetbaden war es möglich, Thermalwasservorkommen auch weiter im Osten, unter einer Gesteinsüberdeckung von bis zu 45 m, nachzuweisen. Offen ist zur Zeit noch die Frage, wie weit sich die Anomalie und damit der eigentliche Thermalwasserhorizont nach Westen erstreckt. Obwohl im Westen von Baden verschiedene Baugrunduntersuchungen mit zum Teil ausgedehnten Bohrprogrammen durchgeführt wurden, sind leider

keine dieser Bohrungen mehr für Temperaturmessungen zugänglich.

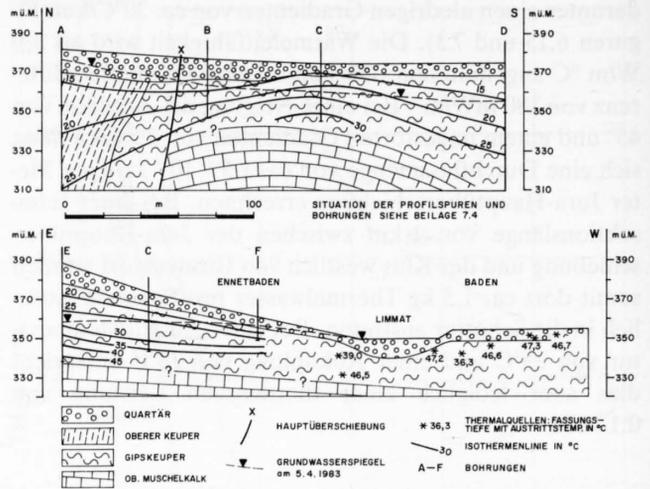


Fig. 7.5: Temperaturprofile durch Ennetbaden (Geologie vereinfacht nach SCHINDLER 1977)

8. THERMOHYDRAULISCHE MODELLRECHNUNGEN

J. D. Favrod [1] und J. C. Griesser [2, 3]

In den beiden geothermischen NEFF-Projekten (NEFF 1980; NEFF 1984) wurden numerische thermohydraulische Modellierungen mit dem Ziel durchgeführt, Hinweise über die Herkunft der Thermalwässer an der Jura-Hauptüberschiebung und generell Informationen über die regionalen Strömungssysteme im Untergrund zu erhalten. Abschätzungen über das geothermische Potential der Region sowie die Simulation des Einflusses von Pumpversuchen auf das thermische und hydraulische Verhalten im Untergrund bildeten ebenfalls Gegenstand dieser Untersuchungen.

8.1 Zweidimensionale numerische Modellrechnungen

Im NEFF-Projekt 1980 erfolgten numerische, thermohydraulische Berechnungen anhand eines zweidimensionalen N-S-verlaufenden Profils vom Tödi bis zum Schwarzwald. Dabei wurde ein Gebiet von 135 km Länge bis in eine Tiefe von 9000 m u. M. berücksichtigt. Die grosse Ausdehnung des Modells sollte es erlauben, zumindest in zwei Dimensionen Auskunft über das regionale Fliessverhalten der bei Baden auftretenden Thermalwässer zu erhalten. Die Berechnungen erfolgten mittels der Methode der finiten Elemente.

Jedem dieser Elemente wurden die benötigten petrophysikalischen Parameter der entsprechenden Schicht zugeordnet. Diese entstammten für die Anfangsphase der Modellrechnungen der Literatur. Sie wurden dann aber innerhalb vernünftiger Grenzen variiert, bis die numerischen Berechnungen die vorhandenen thermischen und hydraulischen Felddaten befriedigend wiedergaben (= «Validierung» des Modells). Die Durchlässigkeiten der einzelnen Formationen stellen für die thermohydraulischen Berechnungen den kritischsten Parameter dar. Für die beste Anpassung der Berechnungen an die gemessenen thermischen und hydraulischen Daten wurden für die tieferen, im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung relevanten Formationen die in Tabelle 8.1 dargestellten Durchlässigkeiten verwendet.

Extrapoliert auf den gesamten Bereich zwischen Schinznach und Baden treten nach diesem thermohydraulischen Modell entlang der Jura-Hauptüberschiebung auf einer Länge von 12 km ca. 1,8 m³/min Thermalwasser natürlich aus, bestehend aus 71% Muschelkalk- und 29% Kristallinwasser. Nach diesem Modell entstammen 77% des Mu-

schelkalkwassers aus dem Norden und der Rest aus dem Süden. Beim Kristallinwasser stammen 42% aus dem Norden (Schwarzwald) und 58% aus dem Süden (Alpen). Die errechnete Austrittstemperatur beträgt lediglich 21 bis 26°C, da sich das aufsteigende Thermalwasser im Modell vor dem Austritt noch mit kühlem Malmwasser vermischt. Die Thermalwasserkomponente allein hat eine Temperatur von 45 bis 50°C. Auch eine Verdoppelung der natürlichen Thermalwasseraustrittsmenge aus den beiden tiefsten Aquiferen bei Baden würde immer noch im Einklang mit den Felddaten stehen. Erst bei einer Austrittsmenge von über 4,0 m³/min zwischen Schinznach und Baden käme es zu grösseren Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Daten.

Tab. 8.1: Darstellung der für die Modellrechnungen verwendeten Durchlässigkeiten im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung (NEFF 1980)

Formation	Durchlässigkeit [m/s]	
	horizontal	vertikal
Malm	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
Mergelige Serien (Trias – Jura)	2 · 10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻¹⁰
Oberer Muschelkalk	2 · 10 ⁻⁶	2 · 10 ⁻⁶
Untere Trias	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
Durchlässige obere Granitzone	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
Mittlerer Granit	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
Unterer Granit	2 · 10 ⁻¹²	2 · 10 ⁻¹²

Ausgehend vom Modell, das die Felddaten am besten wiedergab, wurden zwei Wasserentnahmeszenarien durch Bohrungen simuliert, wobei eine Entnahme aus dem Muschelkalk und eine aus dem oberen Kristallin erfolgte. Beide Bohrungen wurden 1–2 km südlich der Jura-Hauptüberschiebung plaziert und förderten mit einer Leistung von 3 m³/min. In beiden Fällen wurde davon ausgegangen, dass keine Reinjektion des geförderten Wassers zurück in den Aquifer stattfindet.

Die Simulationsrechnungen ergaben folgenden Temperaturverlauf des geförderten Wassers als Funktion der Zeit: das Muschelkalkwasser, welches aus einer Tiefe von 710 m

[1] Institut d'Economic et Aménagements énergétiques, EPF Lausanne
 [2] Institut für Geophysik, ETH Zürich
 [3] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

stammt, hatte zu Beginn der Entnahme eine Temperatur von 43,1°C. Bei konstanter Förderung erniedrigte sich die Temperatur nach 100 Jahren um 1,2°C. Die Temperatur des Kristallinwassers (Fördertiefe 1170 m) erniedrigte sich innerhalb von 100 Jahren lediglich um 0,15°C, wobei es dann eine Temperatur von 55,3°C aufwies. Da die Simulationen an einem zweidimensionalen Modell durchgeführt wurden, führten diese Entnahmeszenarien zu einer starken Reduktion der natürlichen Austrittsmenge von Thermalwasser an der Jura-Hauptüberschiebung.

8.2 Dreidimensionale numerische Modellrechnungen

Im NEFF-Projekt 1984 wurde ein kleinräumiges, dreidimensionales Modell erstellt, um den lokalen geologischen und topographischen Verhältnissen in der Region von Baden besser Rechnung zu tragen und ein besseres Verständnis der hydrogeologischen und thermischen Verhältnisse des Quellgebietes zu erhalten, was Grundbedingung für eine realistische Nutzung der geothermischen Ressourcen ist. Das Modell hat eine Länge von 10600 m, eine Breite von 3850 m, reicht bis auf Kote 2000 m ü. M. und weist 188 Elemente bzw. 1226 Knoten auf. Die Berechnungen des hydraulischen und thermischen Feldes erfolgten ungekoppelt je durch ein separates Finite-Element-Programm, wobei ein äquivalent-poröses Medium angenommen wurde.

Zur Definition der hydraulischen und thermischen Randbedingungen wurden im dreidimensionalen Modell von Baden die Resultate vom regionalen zweidimensionalen Modell verwendet, unter der Annahme einer undurchlässigen bzw. thermisch isolierten Abgrenzung des Modells im Westen und Osten (NEFF 1980).

Auf die Einführung von E-W-gerichteten Zuflüssen im Muschelkalk wurde verzichtet, da solche in dieser Gegend noch durch keine Feldmessungen bestätigt werden konnten. An der Basis des Modells wurde ein konstanter Wärmefluss von 100 mW/m² angesetzt.

Die Validierung des Modells erfolgte durch Variationen der Geometrie der Elemente, des hydraulischen Potentials und der Permeabilität der einzelnen Formationen, bis die berechneten Wasseraustritte und -temperaturen mit den gemessenen übereinstimmten.

Folgende Anpassungen mussten durchgeführt werden:

- Der Durchlässigkeitsbeiwert des Muschelkalkaquifers musste gegenüber dem regionalen Modell um einen Faktor 5 auf $5 \cdot 10^{-5}$ m/s angehoben werden.
- An der Basis des Modells mussten den Formationen höhere Durchlässigkeitsbeiwerte zugeordnet werden, als von den Felddaten her bekannt waren (oberes Kristallin $5 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Diese Anpassungen tragen somit einer regionalen Formationsdurchlässigkeit Rechnung, die durch die Existenz von Störungszonen beeinflusst wird.

Wegen des Fehlens einer Bohrung im simulierten Gebiet war es nicht möglich, direkt gemessene thermische Werte dem Modell zuzuordnen. Als einziger Anhaltspunkt diente daher die Temperatur der Thermalquellen von Baden von ungefähr 46°C.

Als Ergebnis der Simulation wurde für das Quellgebiet von Baden mit einer Breite von 7,7 km eine Ergiebigkeit von 2,6 m³/min bei einer Temperatur in der Größenordnung von 44°C erhalten. Als Austrittstemperatur der Thermen von Baden wurde die Temperatur in einer, wenig unter Baden gelegenen, simulierten Störung angenommen, wobei ein rascher, praktisch ohne Wärmeverlust erfolgender Aufstieg des Wassers in dieser Störung postuliert wurde.

Basierend auf diesem Modell des natürlichen stationären Thermalwasseraustritts entlang der Jura-Hauptüberschiebung wurden auch verschiedene Warmwasserentnahmeszenarien simuliert, welche zeigten, dass vor allem Entnahmen aus dem Muschelkalk und aus Störungszonen eine beträchtliche Beeinflussung des natürlich austretenden Thermalwassers an der Jura-Hauptüberschiebung haben können. Da die Simulationsrechnungen stationär, d. h. zeitunabhängig durchgeführt wurden, lassen sie keine Aussage zu, wie die zeitliche Entwicklung dieser Beeinflussung vor sich geht.

8.3 Weitere Modellrechnungen

Zur Charakterisierung der Grundwasserflussverhältnisse im Kristallin wurden von der Nagra zwei hydrogeologische Modelle unterschiedlicher Grössenordnung erstellt (KIMMEIER et al. 1985): ein regionales Modell, das von den Alpen bis in den Schwarzwald reicht (Fläche: 23000 km²) und ein lokales Modell der Nordschweiz, das eine detailliertere Diskretisation der komplexen geologischen/tektonischen Verhältnisse in diesem Gebiet erlaubt (Fläche: 900 km²). Die Diskretisation der geologischen Formationen erfolgte dreidimensional unter Einbezug des Permo-karbondrogenes. Es handelte sich um eine reine hydraulische Modellierung mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente. Trotzdem die Modelle mangels genügender Felddaten noch nicht endgültig validiert sind, lassen sich einige Schlüsse über die Fliessrichtung der Wässer im Kristallin ziehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil des Wassers, das in den Alpen infiltriert, gegen Norden fliesst und in der Region des tiefsten hydraulischen Potentials am Rhein bei Säkingen und Albbruck exfiltriert. An der gleichen Stelle erfolgt auch eine Exfiltration des Wassers, welches südwärts fliessend aus dem Schwarzwald stammt. Je nach Permeabilität der Jura-Hauptüberschiebung, welche in den Modellen eine hydraulische Verbindung von der Erdoberfläche bis ins Kristallin ermöglicht, erfolgte eine teilweise Entwässerung des südlich und südöstlich der Überschiebung liegenden Kristallins an dieser Störungzone. Kristallinwasser aus dem Schwarzwald tritt entlang der Jura-Hauptüberschiebung in allen Modellen jedoch nicht aus. Die errechneten Druckverteilungen im oberen Muschelkalk zeigen entlang der Jura-Hauptüber-

schiebung meistens die grössten Druckgradienten in W-E-Richtung, was für die Muschelkalkkomponente des Thermalwassers eher für eine Herkunft aus den benachbarten Jurahängeln spricht. Wieviel Muschelkalkwasser aus den Alpen stammt, hängt von den Permeabilitäten des oberen Muschelkalkes unter der Molasse ab. Die Durchlässigkeit des Muschelkalk-Aquifers dürfte dabei von der Region der Jura-Hauptüberschiebung gegen Süden sukzessiv abnehmen.

Bei der Muschelkalkkomponente sprechen die Modellrechnungen für eine Herkunft aus dem Jura, wobei untergeordnet eine Komponente aus den Alpen vorhanden sein kann. Weitere Felddaten sind aber notwendig, um diese Aussagen zu untermauern und vor allem auch, um die numerischen Modelle zu validieren und ihnen damit einen höheren Grad an Zuverlässigkeit zu verleihen.

Parallel zu rein hydraulischen Berechnungen der Nagra (KIMMEIER et al. 1985) hat GRIESSER (1985) den Einfluss verschiedener Fliessrichtungen im Kristallin auf das Temperaturfeld im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung und des unteren Aaretals studiert. Die Berechnungen wurden bei einer vollständigen Kopplung des thermischen und hydraulischen Feldes anhand von zweidimensionalen, N-S-verlaufenden Modellen durchgeführt. Die Existenz eines hydraulisch schlecht durchlässigen, ca. 3 km mächtigen Permokarbondrogens wurde vorausgesetzt. Die Berechnungen zeigten, dass die Herkunft einer Kristallinkomponente des Thermalwassers in Schinznach und Baden aus dem Schwarzwald zu einer unrealistisch starken Abkühlung des nördlichen Trograndes führen müsste, da das Kristallinwasser unter den Trog durchfliessen muss. Zudem verlangt eine Herkunft des Kristallinwassers aus dem Norden einen gut durchlässigen Bereich im Kristallin unter

dem Trog oder in einer tieferen Partie des Troges selbst, was nicht unbedingt der Fall sein muss.

Bei einer Herkunft des Kristallinwassers aus dem Süden liessen sich die Temperaturdaten im Bereich zwischen der Jura-Hauptüberschiebung und dem Rhein gut erklären, wobei das Kristallinwasser aus dem Süden praktisch vollständig an der Jura-Hauptüberschiebung entwässert. Der Permokarbondrog würde in diesem Fall als eine schlecht durchlässige Barriere für das Kristallinwasser aus dem Süden wirken. Dieses Konzept wird auch von den hydrochemischen Untersuchungen der Nagra unterstützt (SCHMASSMANN et al. 1984); diese Daten deuten darauf hin, dass nördlich und südlich des Troges im Kristallin chemisch unterschiedliche Wässer vorhanden sind, während im Permokarbondrog ein sehr altes, hochsalines, praktisch stagnierendes Wasser gefunden wurde.

Neueste publizierte Resultate von Modellrechnungen lassen den Schluss zu, dass im Kristallin unter dem Trog mit vertikalen Darcy-Geschwindigkeiten von bis zu 20 mm/Jahr gerechnet werden muss. Als Konsequenz lässt sich aus den Modellrechnungen schliessen, dass vertikale Durchlässigkeiten in der Grössenordnung von bis zu 10^{-9} m/s bis in grössere Tiefen vorhanden sein müssen, falls man die Herkunft der geothermischen Anomalie des unteren Aaretals Tiefengrundwasserströmungen zuschreibt (RYBACH et al. 1987).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die neuen Daten der Nagra und zusätzliche Modellrechnungen die im NEFF-Projekt 1980 und NEFF-Projekt 1984 postulierte Herkunftshypothese wieder in Frage gestellt haben. Für die Kristallinkomponente des Thermalwassers an der Jura-Hauptüberschiebung dürfte heute ausschliesslich eine Herkunft aus dem Süden (Alpen) in Frage kommen.

9. NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN UND WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE

Ch. Bélaz und Z. Cicic [1]

9.1 Nutzung der neuen Produktionsbohrung in Schinznach Bad

Die Bohrung S2 wurde unmittelbar nach deren Ausbau mit Hagusta-Rohren provisorisch an das Thermalwassernetz angeschlossen. Eine Pumpe mit 520 l/min maximaler Förderleistung wurde provisorisch installiert und durch Schieber bei ständigem Betrieb der Pumpe eine minimale Förderung von 80 l/min aufrechterhalten, bei Bedarfsspitzen werden aber bis zu 440 l/min gefördert. Ein definitiver Anschluss mit Pumpenhaus und evtl. Reservoir an das Thermalwassernetz ist vorgesehen. Schon heute werden durch die Neubohrung wesentliche finanzielle Einsparungen im Badebetrieb erzielt: Durch die Fördertemperatur von etwa 35°C muss das Wasser nicht mehr für die Therapie aufgeheizt werden. Die entsprechende Einsparung an Primärenergie liegt – je nach Heizölpreis – bei bis zu 100000 Fr.

9.2 Wärmenutzung aus den beiden mitteltiefen Explorationsbohrungen HH1 in Hausen und BT4 in Birmenstorf

Basierend auf den Ergebnissen der beiden mitteltiefen Explorationsbohrungen BT4 in Birmenstorf (Thermalwassermenge 800 l/min bzw. Thermalwassertemperatur ca. 25°C) und HH1 Hausen (Thermalwassermenge 120 l/min bzw. Thermalwassertemperatur ca. 30°C), wurden insgesamt 7 Varianten (davon 3 in Birmenstorf und 4 in Hausen) einer Nutzung des Thermalwassers zu Heizzwecken untersucht. Dabei wurden konkrete Abklärungen bezüglich der technischen Möglichkeiten und die dafür erforderlichen Investitionen durchgeführt. Die spezifischen Wärmegestehungskosten beim Verbraucher liegen für die untersuchten Varianten ohne Kosten der Bohrungen in Birmenstorf zwischen 150 und 170 Fr./MWh und in Hausen zwischen 125 und 141 Fr./MWh.

Bei allen Varianten hat es sich gezeigt, dass trotz vorhandener Bohrungen die spezifischen Gestehungskosten der Fernwärmeversorgung mit Thermalwasser höher liegen als diejenigen einer konventionellen eigenen Wärmeversorgung mittels Heizöl. Die Energiekosten liegen zwar bei einer Wärmeversorgung mit Thermalwasser tiefer als diejenigen mittels Heizöl (Preisstand 1984), reichen jedoch nicht aus, um die höheren Kapitalkosten auszugleichen.

Diese hohen spezifischen Gestehungskosten einer Wärmenutzung des Thermalwassers in Hausen und in Birmenstorf sind vor allem durch folgende Gegebenheiten verursacht:

- sehr grosser Investitionsaufwand (Thermalwasserleitung, Wärmepumpe und elektrischer Anschluss)
- ungünstige Wärmenutzungsmöglichkeiten (vor allem in Birmenstorf), insbesondere deswegen, weil ausserhalb der Heizperiode keine Wärme benötigt wird, das heisst, dass die jährlich abgegebene Wärmemenge (MWh/a) niedrig ist

Wenn die Kosten für die Bohrungen hinzukommen (inkl. Risiko, dass nicht die erhofften Wassermengen bzw. -temperaturen gefunden werden), ist eine Nutzung von Thermalwasser für Heizzwecke für solche verhältnismässig kleinen Anlageneinheiten im allgemeinen nicht wirtschaftlich. Diese Ergebnisse stimmen mit denen der Studie Nr. 20 des Bundesamtes für Energiewirtschaft (1981) überein.

9.3 Wärmenutzung einer eventuellen Produktionsbohrung im Bäderquartier von Baden

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Untersuchungen in Hausen und in Birmenstorf (hohe Investitions- und Energiekosten für die Wärmepumpe) und der Möglichkeit, eine Produktionsbohrung im Bäderquartier in Baden zu plazieren, wurde die Wärmenutzung von Thermalwasser mit z. B. ca. 60°C Temperatur zu Heizzwecken der Bäderhotels untersucht. Dabei wurde eine direkte Nutzung (ohne Wärmepumpe) mittels Wärmetauscher des Thermalwassers angestrebt, um die hohen Investitions- und Energiekosten (Stromkosten) für die Wärmepumpe zu sparen. Für die Versorgung der 8 berücksichtigten Hotels wären max. 1340 l/min Thermalwasser notwendig.

Die Wärmegestehungskosten, ohne die Kosten für die Bohrung, betragen bei den zwei untersuchten Varianten ca. 54 bzw. 51 Fr./MWh. Unter Berücksichtigung eines Kostenaufwandes von 0,4 Mio Fr. für die Thermalwasserbohrung betragen die Wärmegestehungskosten der entsprechenden Varianten ca. 60 bzw. 57 Fr./MWh.

Eine Nutzung von Thermalwasser von 60°C im Bäderquartier könnte also auch unter Berücksichtigung der Kosten für eine Bohrung wirtschaftlich sein und jährlich wären Heizöleinsparungen von ca. 840 t möglich.

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

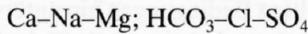
10. ANALYSE DER UMWELTASPEKTE

Ch. Zimmermann [1]

10.1 Chemische Klassifizierung

Grundsätzlich wird ein Wasser als Thermal- oder Mineralwasser bezeichnet, wenn seine Temperatur $\geq 20^\circ\text{C}$ und sein Mineralgehalt ≥ 1000 mg/l betragen.

Schmassmann (in HöGL 1980) schlägt für die Thermalwässer der Schweiz eine Klassifizierung vor, die auf den repräsentativen Ionen beruht, d. h. denjenigen Ionen, die mehr als 20% der Summe der Kationen resp. Anionen (in mg/l) ausmachen. Die Untersuchungen von Vuataz an 19 Thermalwasservorkommen der Schweiz (total 42 Quellen und Brunnen) zeigen, dass stets nur drei Kationen oder Anionen repräsentativ sind, nie aber alle der sechs folgenden Hauptionen (VUATAZ 1982):



Bei den untersuchten Thermalwässern lassen sich chemisch die 3 Hauptgruppen (1) Sulfat- (z. B. Schinznach und Zurzach), (2) Bicarbonat- und (3) Chlorid-Thermalwässer (z. B. Baden) unterscheiden. Tabelle 10.1 zeigt die Charakterisierung der untersuchten Thermalwässer des Projektgebietes nach dieser Einteilung. Zum Vergleich werden die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Wässer der Bohrungen Hausen HH1 und Birmenstorf BT4 miteinbezogen.

Tab. 10.1: Charakterisierung der untersuchten Thermalwässer aufgrund der Ionendominanz (NEFF 1984)

Quelle bzw. Thermalwasserbohrung	Ionendominanz $\geq 20\%$ der Anionen- oder Kationenkonzentration
Schinznach	Ca > Na; SO ₄ > Cl
Baden	Na > Ca; Cl > SO ₄
Zurzach	Na; SO ₄ > HCO ₃ > Cl
Birmenstorf	
BT4	Na > Ca; Cl > SO ₄
Hausen HH1	Ca > Mg; SO ₄ > HCO ₃

Diese Einteilung erlaubt hingegen nicht, die Vorkommen nach ihrem Ursprung zu unterscheiden. Dieser Anforderung wird von Vuataz in einer weiteren Klassifizierung der schweizerischen Thermalwasservorkommen Rechnung getragen (VUATAZ 1979). Sie beruht auf dem vorherrschenden Kation oder Anion resp. im Falle ähnlicher Konzentrationen auf den zwei vorherrschenden Anionen und/

oder Kationen. Gemäss dieser Einteilung gehören die Thermalwasservorkommen des Untersuchungsgebietes den folgenden Gruppen an (Fig. 10.1):

- **Schinznach und Baden** zur CaNa-SO₄Cl-Gruppe, mit Sedimenten (Oberer Muschelkalk) als Ursprungsgestein, erhöhter Mineralisation (> 2000 mg/l TDS*) und mittlerer bis erhöhter Temperatur ($> 30^\circ\text{C}$). Diese Thermalwässer sind durch hohe TDS-Gehalte gekennzeichnet. Auch das neu erbohrte Thermalvorkommen von Birmenstorf ist dieser Gruppe zuzuordnen, allerdings mit einer Temperatur um 25°C .
- **Zurzach** zur Na-SO₄-Gruppe, mit kristallinem Ursprungsgestein, niedrigem bis mittlerem Mineralgehalt (< 2000 mg/l TDS) und mittlerer bis erhöhter Temperatur ($> 30^\circ\text{C}$). Die Thermalwässer dieser Gruppe zeichnen sich durch einen geringeren Magnesium- und einen hohen SiO₂-Gehalt aus.

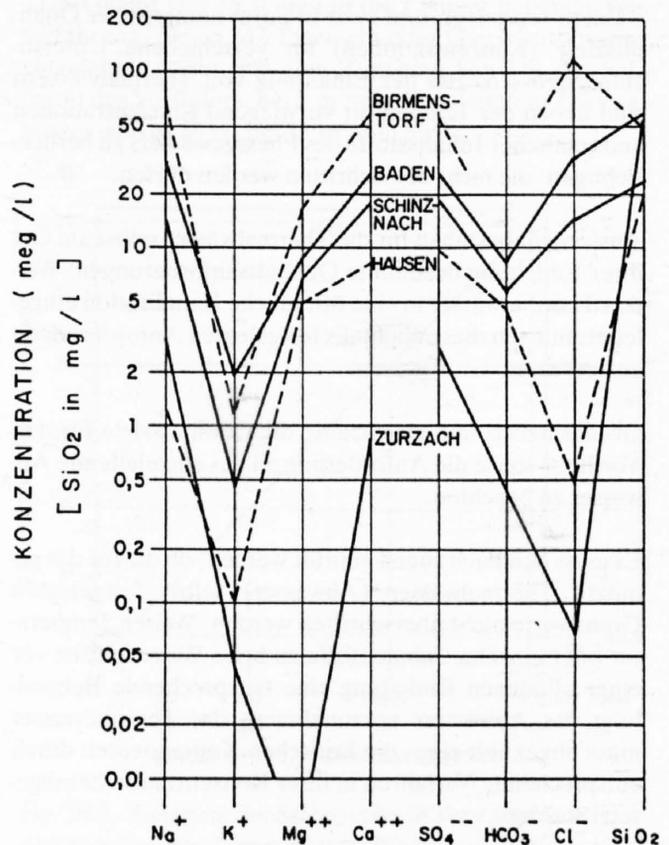


Fig. 10.1: Konzentration der hauptsächlichsten Kationen und Anionen sowie von SiO₂ in Thermalwässern im weiteren Untersuchungsgebiet (VUATAZ 1982; NEFF 1984)

* TDS = Totale Menge gelöster Stoffe

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

- **Hausen** ist der Ca-SO₄-Gruppe zuzuordnen, mit Sedimenten (Oberer Muschelkalk) als Ursprungsgestein und einer mittleren bis erhöhten Mineralisation – was mit einem TDS <1000 mg/l für Hausen allerdings nicht eindeutig zutrifft.

Des Weiteren ist es interessant festzustellen, dass die Wässer der Bohrung Birnenstorf BT4 einen im Vergleich zum schweizerischen Mittel sehr hohen Salzgehalt aufweisen (Kapitel 6.6.2). Im einzelnen sind die Konzentrationen von Na, Mg, Ca, SO₄ und Cl zum Teil beträchtlich höher als das schweizerische Maximum.

Die Bohrung Hausen HH1 andererseits weist einen eher geringen Salzgehalt auf (Kapitel 6.3.2).

10.2 Kriterien für die Beurteilung von Thermalwassereinleitungen in Oberflächengewässer

Gemäss der Verordnung über Abwassereinleitungen ist genutztes Thermalwasser als Abwasser zu betrachten – im Gegensatz zu natürlichen in Vorfluter entwässernde Thermalquellen (SCHWEIZ. BUNDESRAT 1975). Bei der Einleitung in ein Oberflächengewässer dürfen sich somit keine negativen Auswirkungen auf dessen Aussehen, Geruch und Geschmack sowie dessen Biologie und Ökologie ergeben. In der Verordnung sind aber auch detaillierte Anforderungen an die chemische Beschaffenheit von Fliessgewässern festgelegt, und zwar in Form numerischer Qualitätsziele (Konzentrationen) für verschiedene Untersuchungsgrössen. Bei der Einleitung von Thermalwässern sind neben der Temperatur vorwiegend Konzentrationen anorganischer Inhaltsstoffe des Fliessgewässers zu berücksichtigen, die nicht überschritten werden dürfen.

Ausserdem bestehen für die Thermalwässer selbst am Ort ihrer Einleitung bestimmte Qualitätsanforderungen. Werden Thermalwässer in eine öffentliche Kanalisation eingeleitet, müssen diese ebenfalls festgelegten Anforderungen entsprechen.

Grundsätzlich sind gleichzeitig die Qualitätsziele für den Vorfluter sowie die Anforderung an das einzuleitende Abwasser zu beachten.

Es muss demnach zuerst geprüft werden, ob die für das genutzte Thermalwasser (Abwasser) selbst festgelegten Grenzwerte nicht überschritten werden. Weisen Temperatur oder einzelne Inhaltsstoffe zu hohe Werte auf, ist vor einer allfälligen Einleitung eine entsprechende Behandlung des Abwassers vorzunehmen: das Thermalwasser muss abgekühlt resp. die kritischen Komponenten durch entsprechende Verfahren in ihrer Konzentration herabgesetzt werden.

Sind die Anforderungen an die Einleitung in ein Gewässer gegeben, muss weiter beurteilt werden, ob nach der Einleitung die Qualitätsziele für Fliessgewässer nicht tangiert werden: Bei Thermalwasser handelt es sich um punktförmige Abwassereinleitungen von mehr oder weniger kon-

stanter Fracht und Abwärme. Damit spielt das Verhältnis Abwasser-/Abflussmenge eine entscheidende Rolle. Die Inhaltsstoffe des Abwassers werden je nach Wassermenge des Vorfluters mehr oder weniger stark verdünnt, so dass sich nur bei niedriger Wasserführung kritische Konzentrationen ergeben können; es ist dabei die Grundlast des Fliessgewässers selbst mit zu berücksichtigen. Die in der Verordnung aufgestellten Grenzwerte gelten für eine Wasserführung, die während 347 Tagen des Jahres vorhanden ist oder überschritten wird (Q₃₄₇); bei extremen Niedrigwasserbedingungen brauchen die Grenzwerte demnach nicht eingehalten zu werden.

Da bei Thermalwassereinleitungen eine hohe Belastung aus konstanter Fracht stammt und die fast ausschließlich anorganischen Stoffe durch biologische, biochemische oder chemische Prozesse in ihrer Menge kaum verändert werden, besteht ein guter Zusammenhang zwischen eingebrachter Stoffkonzentration und Abflussmenge des Vorfluters. Der Einfluss eingeleiteter Thermalwässer auf die Wasserqualität des Vorfluters kann demnach für die einzelnen Inhaltsstoffe abgeschätzt werden.

Werden die Konzentrationsbereiche schweizerischer Mineral- und Thermalwässer auf die durch den Gewässerschutz aufgestellten Bedingungen hin untersucht, kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Anforderungen an die Einleitung in einen Vorfluter (Qualität des Abwassers) in bezug auf den Gesamtsalzgehalt (TDS) und die Inhaltsstoffe Eisen, Sulfat, Chlorid und Fluorid sowie den pH-Wert in bestimmten Fällen nicht erfüllt werden.

Beim Vergleich der mittleren Konzentrationen mit den Grenzwerten lassen sich im einzelnen für die Thermalwässer der Schweiz folgende Schlüsse ziehen (Verordnung über Abwassereinleitungen, SCHWEIZ. BUNDESRAT 1975):

- Der mittlere und maximale Salzgehalt würde bei grossen Einleitungen die Wasserqualität ober- und unterirdischer Gewässer beeinträchtigen. Dies betrifft vor allem die Thermalwässer der Gruppen CaNa-SO₄Cl und Na-Cl mit einem TDS > 2000 mg/l, zu denen z. B. Birnenstorf gehört.
- Fe-Konzentrationen über der Einleitbedingung von 2 mg Fe⁺⁺/l finden sich vor allem bei der Gruppe der Ca-SO₄-Thermalwässer.
- Für Konzentrationen der Anionen SO₄⁻⁻ und Cl⁻ müsste gemäss Abwasserverordnung vor allem der Kanton Grenzkonzentrationen festlegen. Mit Ausnahme der Ca(Na)-HCO₃-Gruppe weisen Thermalwässer generell hohe Sulfat- und Chloridgehalte auf. Auch die Anforderungen für eine Einleitung in eine öffentliche Kanalisation, welche bei ≤ 300 mg SO₄⁻⁻/l liegt, wäre nur bei oben genannter Gruppe gegeben.
- Die maximalen Fluorid-Konzentrationen würden eine Einleitung ebenfalls ausschliessen.

- Der maximale pH-Wert wäre gerade über dem für Gewässer mit grosser Wasserführung zugelassenen Wert von 9,0. Bei einigen Quellen der Na-SO₄-Gruppe finden sich pH-Werte > 9,0.

Die Konzentrationen kritischer Inhaltsstoffe sind in Figur 10.2 dargestellt.

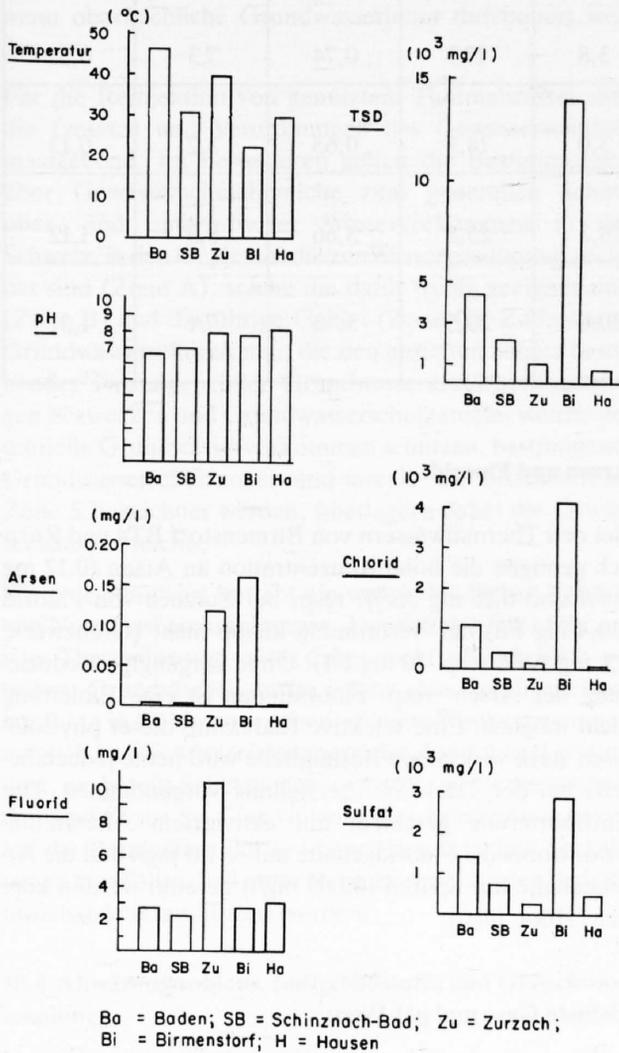


Fig. 10.2: Konzentrationen kritischer Inhaltsstoffe der untersuchten Thermalwässer (NEFF 1984)

Im folgenden sollen diese Wässer auf ihre Einleitfähigkeit hin diskutiert werden.

TDS, Chlorid und Sulfat:

In bezug auf die Abwasserqualität bestehen für TDS (Salzgehalt), Chlorid und Sulfat laut Verordnung keine Konzentrationsgrenzwerte. Die Konzentrationen sind generell niedrig zu halten.

Im Vorfluter selbst (Qualitätsziel nach der Einleitung) darf der TDS ober- und unterirdische Gewässer nicht beeinträchtigen, und die Konzentrationen von Chlorid und Sulfat sollen bei Q₃₄₇ (Wasserführung, die während 347 Ta-

gen des Jahres vorhanden ist oder überschritten wird) 100 mg/l nicht übersteigen.

In der folgenden Tabelle werden die mittleren Gehalte von TDS, Sulfat und Chlorid der Thermalwässer des Projektgebietes dargestellt. Es zeigt sich, dass Birnenstorf bei allen drei Parametern die höchsten Konzentrationen aufweist (Tabelle 10.2).

Tab. 10.2: Mittlere TDS-, Sulfat- und Chloridgehalte der Thermalwässer des Projektgebietes (VUATAZ 1982; NEFF 1984)

Vorkommen	Anzahl Proben	TDS mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l
Baden	33	4500	1360	1130
Schinznach	25	2230	810	390
Zurzach	18	980	235	130
Birnenstorf	1	ca. 14500	2800	4100
Hausen	1	760	470	20

Am Beispiel des Thermalwassers von Baden wird aufgrund einer idealen Verdünnung aufgezeigt, wie sich der totale Salzgehalt der Limmat mit zunehmender Einleitmenge verändern würde (Figur 10.3).

Werden pro Minute 0,5 m³ Thermalwasser mit einem TDS-Gehalt von 4500 mg/l in die Limmat bei einer Wasserführung, die an 347 Tagen gilt oder überschritten wird, eingeleitet, ergibt sich eine Zunahme von 1% der Salzfracht des Vorfluters, bei 5 m³/min eingeleitetem Thermalwasser sind es 10%, bei 15 m³/min 30%.

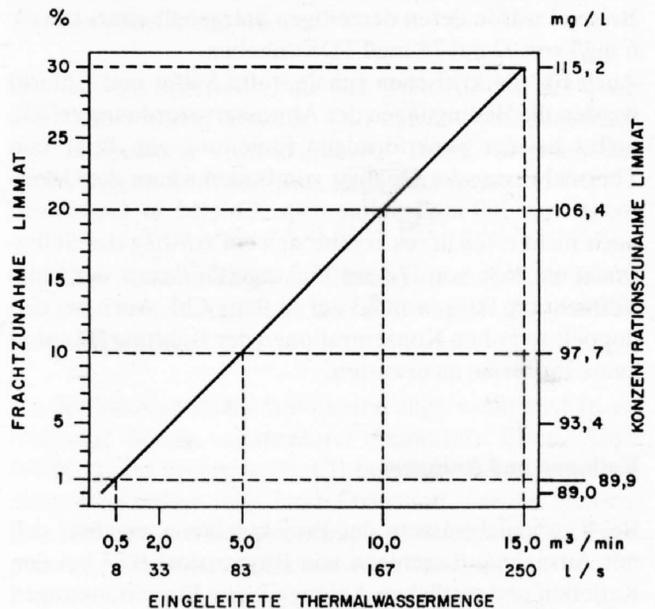


Fig. 10.3: Zunahme des Salzgehaltes in der Limmat in Abhängigkeit der Thermalwasser-Einleitmenge (NEFF 1984)

Wird angenommen, dass pro Einleitstelle nicht mehr als 2 m³/min anfallen, so würde der TDS zum Beispiel in der Limmat theoretisch um 3,5 mg/l von 89 auf 92,5 mg/l zunehmen.

Tab. 10.3: Natürliche TDS-, Sulfat- und Chloridkonzentrationen in der Limmat, Reuss, Aare und des Rheins (NEFF 1984)

Probenahme- stelle	Abfluss		Salzgehalt TDS		Sulfat		Chlorid	
	Q m ³ /s	Q ₃₄₇ m ³ /s	Konz. mg/l	Fracht kg/s	Konz. mg/l	Fracht kg/s	Konz. mg/l	Fracht kg/s
Limmat Baden	101	43	89,0	3,8	17,3	0,74	7,3	0,31
Reuss Mellingen	139	42	72,0	3,0	14,9	0,63	3,2	0,13
Aare Brugg	308	142	115,0	16,3	25,8	3,66	8,3	1,12
Rhein Rekingen	438	185	108,0	20,0	29,5	5,46	7,4	1,37

Es kann somit gefolgert werden, dass sich gemäss der Abwasserverordnung für den Salzgehalt keine Beeinträchtigung ober- und unterirdischer Gewässer ergibt, liegen doch die natürlichen Unterschiede der Konzentrationen der vier Flüsse Limmat, Reuss, Aare und Rhein selbst um einiges höher (Tabelle 10.3); der Unterschied des TDS zwischen Limmat – Aare zum Beispiel beträgt 26 mg/l. Damit würde auch die Einleitung von 1 m³/min Thermalwasser mit einem fast dreifach so hohen TDS-Gehalt wie in Baden den Salzgehalt der fraglichen Vorfluter nicht beeinträchtigen. Die Einleitung des Thermalwassers der Bohrung BT4 von ca. 14500 mg/l TDS in die Reuss zum Beispiel würde deren derzeitigen Salzgehalt «nur» um ca. 6 mg/l von 72 auf 78 mg/l TDS anheben.

Auch für die kritischen Inhaltsstoffe Sulfat und Chlorid werden die Bedingungen der Abwasserverordnung erfüllt. Selbst bei der punktförmigen Einleitung von 15 m³/min Thermalwasser der Qualität von Baden wären die Grenzwerte von 100 mg/l Sulfat resp. Chlorid in Gewässern noch nicht erreicht: es ergäbe sich ein Anstieg der Sulfatfracht um 46 % von 17,3 auf 25,2 mg SO₄²⁻/l resp. der Chloridfracht um 90 %, von 7,3 auf 13,9 mg Cl/l. Auch bei den doppelt so hohen Konzentrationen der Bohrung BT4 sind keine Probleme zu erwarten.

Kationen und Anionen:

Bei Thermalabwässern des Projektgebietes ergeben sich mit Ausnahme derjenigen von Birnenstorf BT4 bei den Kationen und restlichen Anionen keine Einschränkungen für die Einleitung. Auch die Qualitätsziele für die Fliessgewässer werden eingehalten, denn es kann grundsätzlich von einer grossen Verdünnung des Abwassers ausgegangen werden. Bei einer Einleitung von beispielsweise 15 m³/min Thermalwasser in die Reuss mit der kleinsten Wasserführung der vier Flüsse des Projektgebietes kann mit einer rund 170fachen Verdünnung bei Q₃₄₇ gerechnet werden (Tabelle 10.3).

Arsen und Fluorid:

Bei den Thermalwässern von Birnenstorf BT4 und Zurzach genügen die hohe Konzentration an Arsen (0,12 mg As⁵/l und 0,16 mg As⁵/l) resp. bei Zurzach von Fluorid (10,4 mg F/l) der Verordnung knapp nicht (Grenzwerte 0,1 mg As⁵/l resp. 10 mg F/l). Ohne vorgängige Reduzierung der Arsen- resp. Fluoridionen ist eine Einleitung nicht möglich. Eine selektive Reduktion dieser physiologisch stark wirksamen Bestandteile wird heute jedoch bereits bei der Tafelwasserherstellung vorgenommen. Die Entfluorierung geschieht mit aktiviertem Aluminiumoxid, wobei die Fluoridgehalte auf < 1,0 mg/l und die Arsengehalte auf Spuren (0,009 mg/l) gesenkt werden können (HÖGL 1980).

Gelöste Gase und pH-Wert:

Die Thermalwässer des Projektgebietes müssten in der Regel vor der Einleitung in die Vorfluter belüftet werden, damit der gelöste Schwefelwasserstoff (z. B. Thermalwasser Baden rund 50 mg H₂S/l bei der Entnahmestelle) ausgast und sich das Wasser hinreichend mit Sauerstoff anreichert; nach der Abwasserverordnung muss bei der Einleitung ein Gehalt von 6 mg O₂/l gegeben sein. Es ist anzunehmen, dass bereits bei der Thermalwassernutzung eine Belüftung stattfindet, so dass ein geeignetes Einlaufbauwerk (Überfall) noch das übrige tun dürfte. Dem Problem von Geruchsimmissionen muss jedoch die nötige Beachtung geschenkt werden (Kapitel 10.4).

10.3 Grundwasserschutz bei der Reinjektion genutzter Thermalwässer

Werden bei der Einleitung von Thermalwässern die Qualitätsziele für Oberflächengewässer erfüllt, kann angenommen werden, dass auch das Flussinfiltrat keine Qualitäts-

einbussen erleidet, das später im Grundwasserstrom zu Trinkwasserzwecken wieder gefasst wird.

Vorsicht ist allerdings bei der Reinjektion von genutztem unverdünntem Thermalwasser geboten, da je nach Beschaffenheit des Untergrundes eine Vermischung mit Grundwasser stattfinden könnte. Es sind demnach entsprechende technische Schutzmassnahmen zu treffen, wenn oberflächliche Grundwasserleiter durchquert werden.

Für die Reinjektion von genutztem Thermalwasser sind die Gesetze und Verordnungen des Gewässerschutzes massgebend. Im besonderen gelten die Bestimmungen über Gewässerschutzbereiche zum generellen Schutz ober- und unterirdischer Wasservorkommen in der Schweiz, in den Gebieten, die zur Wassergewinnung geeignet sind (Zone A), solche die dafür wenig geeignet sind (Zone B) und das übrige Gebiet (Zone C). Zudem sind Grundwasserschutzzonen, die den gezielten Schutz bestehender Fassungen oder Grundwasseranreicherungsanlagen bezwecken und Grundwasserschutzareale, welche potentielle Grundwasservorkommen schützen, bestimmend. Grundwasserschutzzonen und -areale, die zusammen als Zone S bezeichnet werden, überlagern dabei die Gewässerschutzbereiche.

Für jede Schutzart besteht ein unterschiedlicher Katalog von Nutzungsbeschränkungen. Der Fall der Rückführung von Thermalwasser wird dabei nicht ausdrücklich erwähnt. Grundsätzlich dürfte gelten, dass sich Interessenkonflikte in Gebieten ergeben, wo eine Wassergewinnung möglich ist (Gewässerschutzbereiche Zone A und B) und dort, wo bereits Schutzzonen und/oder -areale ausgeschieden sind (Zone S). Eine Nutzungsbeschränkung in bezug auf die Reinjektion dürfte je nach den örtlichen Verhältnissen von Fall zu Fall unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit modifiziert werden.

10.4 Abwärmeproblem, Luftschadstoffe und Geruchsmissionen

Da die genutzten Thermalwässer nur noch eine geringe Restwärme aufweisen und mengenmässig kaum ins Gewicht fallen, werden die thermischen Grenzwerte der Verordnung über Abwassereinleitungen (Aufwärmung $\leq 3^{\circ}\text{C}$, Gewässertemperatur $\leq 25^{\circ}\text{C}$) mit Sicherheit nicht tangiert (SCHWEIZ. BUNDESRAT 1975). Es ist höchstens denkbar, dass sich während der Wintermonate lokal eng begrenzte Auswirkungen am Einleitungsort ergeben (Verschlammung, Anlockung von Fischen).

Es kann ebenfalls ausgeschlossen werden, dass bei den Thermalwasservorkommen des Projektgebietes Luftschadstoffe in kritischen Konzentrationen auftreten. Im Vordergrund steht bei gewissen Vorkommen gelöster Schwefelwasserstoff (H_2S), der dort ausgast, wo das Thermalwasser erstmals mit Luft in Berührung kommt. Dabei können Geruchsmissionen auftreten. Bei höheren H_2S -Konzentrationen wäre eine Belüftung des Thermalwassers und Abführung des gasförmigen H_2S resp. Eliminierung desselben durch Verbrennen vor der Nutzung angezeigt (Claus-Reaktion).

10.5 Betonaggressivität und chemische Ausfällungen

Es zeigt sich, dass in bezug auf die kalkaggressive Kohlensäure nur das Thermalwasser von Baden deutlich kritische Werte aufweist. Sulfat hingegen, das sich mit einigen Kalzium- und Aluminiumverbindungen des Zementsteins zu Kalziumaluminatsulfat oder Gips umsetzt und das «Treiben» von Beton hervorruft, ist bei allen Thermalwässern des Projektgebietes in Konzentrationen vorhanden, die deutliche Aggressivität bewirken (DEUTSCHE INDUSTRIENORMEN 1969).

Ausserdem sind die Gehalte an Magnesium, mit Ausnahme des Thermalwassers von Zurzach, hoch bis sehr hoch ($64\text{--}192\text{ Mg}^2\text{ mg/l}$), wobei Birnenstorf BT4 die höchsten Konzentrationen aufweist. Magnesiumsalze, z. B. Magnesiumsulfat und -chlorid, lösen Kalziumhydroxid aus dem Zementstein, wobei sich u. a. Magnesiumhydroxid als weiche, gallertartige Masse bildet (DEUTSCHE INDUSTRIENORM 1969). Auch wirken die hohen Schwefelwasserstoffgehalte der Schwefeltherme von Schinznach aggressiv auf den Beton (H_2S ist eine schwache Säure). H_2S kann auch gasförmig in trockenen Beton eindringen oder sich im Wasserfilm auf feuchtem Boden lösen und bei Luftzutritt Schwefelsäure und Sulfate bilden. Die Thermalquelle von Zurzach weist kein H_2S auf, während in Baden nur geringe Konzentrationen gemessen werden.

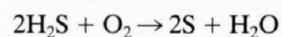
Die Art der zu erwartenden chemischen Ausfällungen hängt von der Natur der Inhaltsstoffe ab. Bei den Thermalwässern des Projektgebietes sind vor allem elementarer Schwefel, Kalziumkarbonat (Kalk) und Silikat (SiO_2) als wichtigste Ausfällungen zu erwarten. MÜNZEL (1947) beschreibt ausführlich die chemischen Ausfällungen des Thermalwassers von Baden.

Die meisten Sedimente, die sich nach Austritt des Thermalwassers bilden können, sind auf das Vorhandensein von Karbonaten zurückzuführen. Beim Ausgasen der freien Kohlensäure fällt Kalk nach der Formel



aus. Das Kalziumkarbonat (Sinter) ist zuerst als feiner Schlamm vorhanden, kann sich aber mit der Zeit zu Tuffstein verfestigen.

An der Bildung dieses Sinters sind aber, wenn auch in geringerem Masse, elementarer Schwefel, Eisen, Gips (CaSO_4) und Steinsalz (NaCl) beteiligt. Diese Ausscheidungen entstehen teils durch Oxidation, wie der elementare Schwefel, wo sich gasförmiges H_2S , das aus dem Thermalwasser austritt, mit Luftsauerstoff verbindet:



oder beim Eisen, das durch Sauerstoff vom zweiwertigen, gelösten Zustand als dreiwertiges Eisensalz ausfällt. Gips und Steinsalz andererseits entstehen durch Sublimation der im Wasser gelösten Bestandteile, Silikate aus der undissoziierten Kieselsäure, die zum Teil in beträchtlichen Mengen vorhanden sein kann, wie z. B. in Baden mit $56,6\text{ mg/l}$.

11. DAS JURISTISCHE VORGEHEN BEI DER PROSPEKTIERUNG UND NUTZUNG VON HEILQUELLEN UND THERMALWÄSSER

H. B. Diriwächter [1]

Die Nutzung von Heilquellen und Thermalwässer erfolgt aufgrund einer Konzession auf den Namen einer natürlichen oder juristischen Person auf die Dauer von 10–60 Jahren. Die Konzession wäre nach Auffassung des Baudepartements etwa vergleichbar mit derjenigen von Kernkraftwerken für die Benützung von öffentlichen Gewässern zu Kühlzwecken, welche für die Dauer von 20 Jahren erteilt wird. Verleihungsbehörde ist gemäss § 12 der Vollziehungsverordnung zum Gewässerschutzgesetz der Regierungsrat; einzureichen ist das Bewilligungsgesuch beim Baudepartement.

Vor dem Gesuch um Erteilung der vorgenannten Konzession sind noch verschiedene Polizeibewilligungen einzuholen.

Gemäss § 7 Ziff. 1 des Gewässerschutzgesetzes in Verbindung mit § 15 der Vollziehungsverordnung zum Gewässerschutzgesetz ist beim Baudepartement eine Erlaubnis für Sondierungen und Grabungen einzuholen.

Gemäss § 1 des Dekretes über die Sicherung der öffentlichen Heilquellen und das Graben nach solchen in Baden und Ennetbaden vom 12. Januar 1869 ist beim Bezirksamt Baden ein Gesuch um Erteilung einer Erlaubnis für das Suchen und Bohren nach Thermalwasser einzuholen. Das Bezirksamt stellt aufgrund einer Untersuchung Antrag an den Regierungsrat.

Nach § 2 des genannten Dekretes dürfen ohne Bewilligung des Regierungsrates keine Arbeiten in Grund und Boden vorgenommen werden, «wodurch irgendwie Heilwasser zu Tage gefördert werden könnte».

Gemäss § 150 ff. des Baugesetzes des Kantons Aargau vom 2. Februar 1971 bedürfen alle Bauten der Bewilligung durch den Gemeinderat. Bauten im Sinne dieses Gesetzes sind gemäss § 10 unter anderem auch alle künstlich hergestellten und mit dem Boden fest verbundenen Objekte. Zur Erstellung der notwendigen Installationen für die Probebohrungen ist demnach auch eine Bewilligung einzuholen.

11.1 Die Rechtsmittel für die Durchsetzung der notwendigen Bewilligungen

Zunächst stellt sich die Frage der Erzwingbarkeit einer Sondernutzungskonzession.

Die neuere Rechtsprechung betrachtet die Konzession als einem durch Vertrag begründeten Rechtsverhältnis vergleichbar. Danach weist die Konzession sowohl einen vertraglichen als auch einen Verfügungsmässigen Inhalt auf (IMBODEN und RHINOW 1976). Sie stellt demnach keinen Verwaltungsakt dar und ist daher auch nicht als ein solcher anfechtbar. Dies zeigt sich auch in den Rechtsschutzbestimmungen des Gewässerschutzgesetzes (§ 48) und des Gesetzes über die Verwaltungsrechtspflege (§ 52 Ziff. 6 und 7). Danach sind Gegenstand von Rechtsmittelverfahren nur «Anstände zwischen einem Beliehenen und der Verleihungsbehörde, wegen der aus dem Verleihungsverhältnis entspringenden Rechte und Pflichten» (§ 48 Baugesetz) oder wegen der «Pflicht zur Einholung einer Bewilligung oder Verleihung» oder wegen «Entzug oder Beschränkung einer Verleihung» (Ziff. 6 und 7 des Gesetzes über die Verwaltungsrechtspflege). Der Bestand der Konzession wird demnach immer vorausgesetzt, und die Nichterteilung einer solchen kann in der Regel nicht angefochten werden.

Gemäss § 7 Ziff. 1 des Gewässerschutzgesetzes in Verbindung mit § 15 der Vollziehungsverordnung zum Gewässerschutzgesetz muss für Sondierungen und Grabungen nach öffentlichen Gewässern beim Baudepartement um eine Erlaubnis nachgesucht werden.

Der Entscheid des Baudepartements kann gemäss § 46 Abs. 2 lit. a des Gesetzes über die Verwaltungsrechtspflege mit Beschwerde an den Regierungsrat weitergezogen werden.

Der Entscheid des Regierungsrates ist schliesslich gemäss § 52 lit. 18 des Gesetzes über die Verwaltungspflege mit Verwaltungsgerichtsbeschwerde an das Verwaltungsgericht weiterziehbar.

Der Entscheid des Regierungsrates gemäss § 2 des Dekretes über die Sicherung der öffentlichen Heilquellen und das Graben nach solchen in Baden und Ennetbaden kann gemäss § 52 Ziff. 6 des Gesetzes über die Verwaltungsrechtspflege mit Verwaltungsgerichtsbeschwerde beim Verwaltungsgericht angefochten werden.

Der Entscheid des Gemeinderates gemäss § 150 des Baugesetzes kann zunächst mit Einsprache beim Gemeinderat selbst angefochten werden (§ 4 Baugesetz). Gemäss § 5 Baugesetz können Verfügungen des Gemeinderates mit Beschwerde an den Regierungsrat bzw. das Baudepartement weitergezogen werden.

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

Der letztinstanzliche Entscheid der Verwaltungsbehörde ist gemäss § 6 Baugesetz wiederum mit Verwaltungsgerichtsbeschwerde an das Verwaltungsgericht weiterziehbar.

11.2 Beurteilung der Durchsetzbarkeit der notwendigen Bewilligungen

Die erforderliche Konzession kann somit auf dem Rechtsweg nicht erzwungen werden.

Gegen eine Verweigerung der erforderlichen Polizeibewilligungen stehen die genannten Rechtsmittel zu Gebote. Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Gefahr der Beeinträchtigung bestehender Quellen durch Probebohrungen als schwerwiegend beurteilt wird. Den zuständigen Behörden wird eine Verweigerung der Bewilligung, gestützt auf allgemeine polizeiliche Interessen, demnach naheliegen.

12. OPTIMIERUNG DES STANDORTES FÜR DIE ERSTELLUNG EINER PILOTANLAGE

J. C. Griesser [1, 3] und H. L. Gorhan [2]

12.1 Einleitung

Im Kapitel 9 wurde die technische Seite der Anwendungsmöglichkeiten von Thermalwasser betrachtet:

- einerseits aus den mitteltiefen Explorationsbohrungen in Hausen und Birnenstorf unter Berücksichtigung des Einsatzes von Wärmepumpen
- andererseits aus einer Produktionsbohrung im Bäderquartier in Baden unter der Annahme, dass Thermalwasser mit einer Temperatur von ca. 60°C zur Verfügung stehen würde, so dass eine direkte Nutzung (ohne Wärmepumpen) für Heizzwecke möglich wäre.

In diesem Kapitel soll nun unter Berücksichtigung der technisch-ökonomischen Aspekte einerseits und des errechneten geothermischen Potentials jedes einzelnen untersuchten Gebietes andererseits eine Optimierung bezüglich des günstigsten Standortes für einen Versuchsbrunnen, kombiniert mit einer Pilotanlage, durchgeführt werden.

12.2 Abschätzung des geothermischen Potentials

Zur Berechnung des Wärmepotentials eines Gebietes wird das förderbare Wasservolumen pro Zeiteinheit (Q) sowie die nutzbare Temperaturdifferenz (ΔT) benötigt. Die thermische Leistung L des Systems berechnet sich nach der Formel:

$$L = C \cdot Q \cdot \Delta T$$

L: Thermische Leistung (W_{th})

C: Spezifische Wärmekapazität des Wassers ($J/m^3 \cdot ^\circ C$)

Q: Fördermenge (m^3/s)

ΔT : genutzte Temperaturdifferenz ($^\circ C$)

Die Abschätzung der förderbaren Wassermenge erfolgt entweder durch hydrogeologische Überlegungen, wobei das nutzbare Porenvolumen, die Durchlässigkeit und das hydraulische Potential verwendet werden oder durch mathematische Modellrechnungen. In zerklüfteten Zonen, wie entlang der Jura-Hauptüberschiebung, ist dies aller-

dings mit grossen Unsicherheiten behaftet, da die Wasserwegsamkeit sehr heterogen und das nutzbare Kluftvolumen nur schwer abschätzbar ist.

Eine erste Potentialabschätzung wurde in der geothermischen Studie der Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG durchgeführt (MOTOR-COLUMBUS 1976). Sie erbrachte zwischen Schinznach und Baden mittels einer hydrogeologischen Abschätzung einen natürlichen Wasseraustritt von 30 bis 300 m^3/min . Diese Werte sind allerdings sehr optimistisch, da den Berechnungen eine Aquiferdurchlässigkeit von 10^{-3} bis 10^{-4} m/s zugrunde gelegt wurde. Die jetzt zur Verfügung stehenden Daten zeigen jedoch, dass für den Muschelkalkaquifer und das oberste Kristallin mit wesentlich niedrigeren Werten gerechnet werden muss (10^{-5} bis 10^{-8} m/s).

Für das gesamte Untersuchungsgebiet wurde in der NEFF-Studie 1980 eine weitere Potentialabschätzung vorgenommen. Danach treten maximal ca. 800 m^3 Wasser mit 48°C pro Meter Jura-Hauptüberschiebung und pro Jahr aus (= 0,025 kg/s · m). Die daraus resultierenden Wärmepotentiale für die einzelnen Gebiete sind in Tabelle 12.1 aufgeführt.

Aufgrund der gemachten Beobachtungen in den Bohrungen Hausen HH1 und Birnenstorf BT4 muss deshalb angenommen werden, dass tatsächlich nur ein Bruchteil dieses Potentials natürlich austritt.

Das in Kapitel 8.2 beschriebene dreidimensionale Modell liefert als Ergebnis eine natürliche regenerierbare, geothermische Leistung für die Region von Baden (4 km O-W-Erstreckung) von ca. 3,2 MW_{th} , was ca. der doppelten thermischen Leistung der bekannten Thermalquellen von Baden entspricht. Die Differenz zur Abschätzung im NEFF-Projekt 1980 rührt daher, dass das dreidimensionale Modell bessere geologische und hydrogeologische Annahmen verwenden konnte. Die bis anhin besprochenen Potentialabschätzungen basieren auf den natürlichen Warmwasseraustritten und stehen demzufolge in thermischem Gleichgewicht mit dem Wirtgestein.

Eine bedeutend grössere Wärmemenge kann aber gewonnen werden, wenn durch die Nutzung das Gestein selbst abekühlt wird (sog. «Wärmemining»). Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung der maximal förderbaren Wärmemenge aus einem Aquifer liefert REED (1983). Für die Region von Habsburg bis Ennetbaden wurde eine solche Abschätzung unter folgenden Annahmen durchgeführt: Das beeinflusste Gesteinsvolumen hat eine Breite

[1] Institut für Geophysik, ETH Zürich

[2] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

[3] jetzt bei Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich

Tab. 12.1: Geothermische Potentiale der einzelnen Untersuchungsgebiete

		Baden	Birmenstorf	Hausen
Länge der Region entlang der Jura-Hauptüberschiebung (km)		4	2	2,5
max. nutzbare Temperaturdifferenz ΔT (°C)		40	20	20
natürliche Warmwasseraustrittsmenge, 2D-Modell nach NEFF (1980)	(m ³ /s)	0,1	0,050	0,063
natürliche Warmwasseraustrittsmenge, 3D-Modell nach NEFF (1984)	(m ³ /s)	0,022	0,011*	0,014*
Potentialabschätzung nach NEFF (1980)	(MW _{th})	16,4	4,1	5,2
Potentialabschätzung nach NEFF (1984)	(MW _{th})	3,2	ca. 1,0*	ca. 1,0*
Abschätzung des thermischen Potentials nach REED (1983) unter Einbezug der Gesteinswärme bei einer Produktionsperiode von 30 Jahren	(MW _{th})	13	3,0	4,0

* extrapoliert aus den Berechnungen der Region Baden

von 3 km entlang der Jura-Hauptüberschiebung. Die Mächtigkeit des Aquifers beträgt 100 m (Oberer Muschelkalk). Es wird angenommen, es handle sich um ein äquivalent-poröses Gestein, was bei den vorgegebenen Dimensionen gerechtfertigt ist. Die durchschnittliche nutzbare Temperaturdifferenz wird als 25°C angenommen. Innerhalb von 30 Jahren können bis 10% der im Gestein gespeicherten Wärme extrahiert werden. In REED (1983) schwankt dieser «recovery factor» zwischen 25% für sehr kleine Reservoirs und 0,1% für grosse Sedimentbecken. Für das gesamte Gebiet von Habsburg bis Ennetbaden (12 km Länge) beträgt die so extrahierbare thermische Leistung 20 MW_{th}. In Tabelle 12.1 wurde weiter eine Aufteilung auf die einzelnen Gebiete vorgenommen. Diese Werte stellen sicherlich obere Grenzen der nutzbaren geothermischen Leistung dar, während die Abschätzungen durch das dreidimensionale thermohydraulische Modell auf natürliche Warmwasseraustritte beruhen und somit eine untere Limite bilden.

12.3 Optimierungskriterien

Zwecks Optimierung der Auswahl eines Standortes für eine Pilotbohrung bzw. -anlage können, nach Prioritäten geordnet, die folgenden Kriterien aufgestellt werden:

- die Grösse des geothermischen Potentials
- die geochemische Beschaffenheit der Thermalwässer
- der Bedarf potentieller Verbraucher
- Wärmegestehungskosten unter Berücksichtigung von Fernwärmeversorgungen
- Durchsetzbarkeit der notwendigen Bewilligungen

In den nun folgenden Kapiteln wird versucht, die obengenannten Kriterien für die einzelnen Untersuchungsgebiete in Anwendung zu bringen.

12.3.1 Region Hausen

Obwohl die geochemischen Eigenschaften des Thermalwassers aus der Bohrung HH1 in Hausen (Kapitel 4 und 10) wesentlich günstiger als diejenigen von Birmenstorf zu beurteilen sind, bleibt das geothermische Potential dieses Gebietes doch etwas unter den gesetzten Erwartungen. Als potentielle Wärmeabnehmer wurden die Liegenschaften einer Hoch- und Tiefbauunternehmung bzw. die Gewächshäuser eines Gartenbau- und Blumengeschäftes identifiziert.

Leider zeigte es sich bei den beiden oben genannten Unternehmungen in Hausen, dass eine Nutzung von Thermalwasser für Heizzwecke von verhältnismässig kleinen Anlageneinheiten nicht wirtschaftlich ist (Kapitel 9.2). Weiter konnte mittels einer Sensitivitätsanalyse (NEFF 1984) festgestellt werden, dass selbst bei einer höheren Thermalwassertemperatur bzw. -menge eine Fernwärmeversorgung unwirtschaftlich wäre.

12.3.2 Region Birmenstorf

Das geothermische Potential sowie die geochemischen Eigenschaften des Thermalwassers sind hier wesentlich ungünstiger zu beurteilen als im Falle von Hausen oder von Baden.

Leider zeigte es sich weiter, dass die geothermische Nutzung selbst für eine in der Nähe der Bohrung BT4 gelegene Grossgärtnerei (für Saisongemüse) nicht wirtschaft-

lich ist. Hauptursachen dafür sind der grosse Investitionsaufwand bzw. ungünstige Wärmenutzungsmöglichkeiten, weil ausserhalb der Heizperiode keine Wärme benötigt wird (NEFF 1984).

12.3.3 Region Baden

Laut den Ergebnissen des Kapitels 12.2 besitzt das Gebiet Baden eindeutig das grösste geothermische Potential. Weiter sind die geochemischen Eigenschaften (Kapitel 10) des Thermalwassers von Baden von einer derartigen Beschaffenheit, dass bei einer Einleitung in Oberflächengewässer praktisch keine Umweltbelastungen zu erwarten sind.

Im Kapitel 9.3 konnte gezeigt werden, dass im Falle von Baden eine direkte Nutzung mittels Wärmetauscher (also ohne Wärmepumpe) zwecks Heizung aller Bäderhotels durchaus durchführbar und wirtschaftlich wäre, selbst unter der Berücksichtigung des Investitionsaufwandes für eine mitteltiefe Thermalwasserbohrung (NEFF 1984). Neben den Bäderhotels stünden noch weitere potentielle Wärmeabnehmer zur Verfügung (Bürogebäude der BBC, NOK, MC etc.).

Als grosse Unbekannte bleibt dagegen die Durchsetzbarkeit der notwendigen Bewilligungen bzw. die Haftung im Zusammenhang mit eventuellen Einflüssen in bezug auf die verfügbare Wassermenge der bestehenden Thermalquellen durch eine Pilotbohrung. Wie in Kapitel 11 festgehalten, wäre die Bewilligung des Regierungsrates unerlässlich, um eine derartige Bohrung durchzuführen.

12.4 Standortempfehlung für die Erstellung einer Pilotbohrung in Baden

Als möglicher Standort für eine mitteltiefe Pilotbohrung käme der Kurpark in der Nähe des Bäderquartiers in Baden in Frage (Figur 12.1). Generell besteht zwar wenig Bedarf an zusätzlichem Thermalwasser zwecks therapeutischer Verwendung, interessant wäre aber die Nutzung geothermischer Energie für Heizzwecke in den Bäderhotels (oder Bürogebäuden, Kapitel 12.3.3), um die oft beträchtlichen Heizölkosten zu reduzieren.

Drei Hauptbedingungen gilt es bei der Festlegung der Bohrstelle zu berücksichtigen:

Erstens sollte das zukünftige Wärmeverteilnetz aus erdverlegten Rohren eine Gesamtlänge von ca. 200 m nicht überschreiten. Zweitens sollten aus Sicherheitsgründen die undurchlässigen Überlagerungsschichten des Muschelkalkes an der Bohrstelle mächtiger als 100 m sein.

Wie bereits im Kapitel 3.4 erwähnt, erwiesen sich diese Überlagerungsschichten, d. h. in erster Linie die Ablagerungen des Gipskeupers, bei den Probebohrungen für den Umfahrungstunnel Ennetbaden lokal als ziemlich porös

und aufgelöst. Bei einer zu geringen Mächtigkeit bestünde damit theoretisch die Gefahr, dass beim Anbohren von artesisch gespanntem Thermalwasser letzteres zwischen Verrohrung und Gestein aufsteigen könnte, d. h. ein unkontrollierter Thermalwasserausbruch zu befürchten wäre. Bei dem nun vorgeschlagenen Bohrstandort betragen die Schichten des Gipskeupers ca. 140 m, womit die Dichtigkeit der Kontaktflächen zwischen Verrohrung und umgebendes Gestein garantiert wäre.

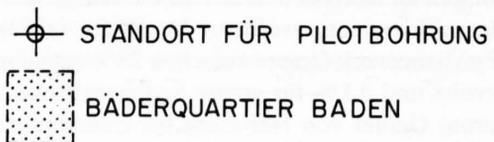
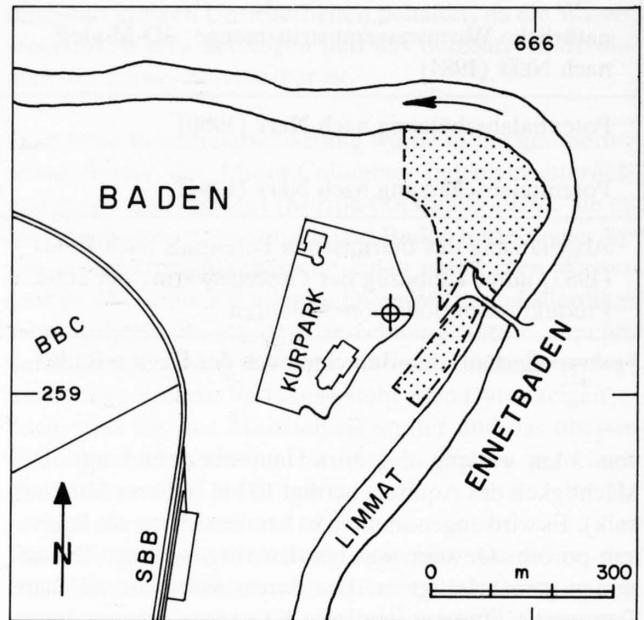


Fig. 12.1: Standort für eine Pilotbohrung in der Nähe des Bäderquartiers in Baden

Die Kosten für eine maximal abgesicherte (d. h. gegen den Gipskeuper abgedichtete) Thermalwasserbohrung von ca. 250 m Tiefe inklusive Erstellung einer zentralen Pilotanlage (direkte Nutzung mittels Wärmetauscher) würden sich wie folgt zusammensetzen (Preisbasis 1984):

- Erstellung einer Produktionsbohrung inkl. div. Versuchen im Bohrloch plus Schadensversicherungen	Fr. 400 000.—
- Thermalwassertransporteinrichtungen (Pumpen, Leitungen, Bauarbeiten etc.)	Fr. 200 000.—
- Heizzentrale (inkl. Plattenwärmetauscher)	Fr. 600 000.—
- Wärmeverteilnetz	Fr. 200 000.—
Total	Fr. 1 400 000.—

Unter Berücksichtigung eines Kostenaufwandes von 0,4 Mio Fr. für die Thermalwasserbohrung betragen die Wärmegestehungskosten ca. 60 Fr./MWh.

So bleibt als drittes Hauptkriterium bei der Festlegung des Bohrstandortes bzw. einer zentralen Fassung von Ther-

malwasser im Bäderquartier – wovon übrigens schon seit mehr als 100 Jahren die Rede ist (MÜNDEL 1947) – die Durchsetzbarkeit der notwendigen Bewilligungen (Kapitel 11). Dies ist aber letztlich ein politischer Entscheid, der in erster Linie vom Konsensus aller Thermalquellenbesitzer beeinflusst wird.

13. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

H. L. Gorhan [1]

Die beiden NEFF-Studien (NEFF 1980, 1984) haben bestätigt, dass eine Nutzung von geothermischen Ressourcen in ausgewählten Gebieten, d. h. in Zonen mit geothermischen Anomalien, auch in der Schweiz durchaus wirtschaftlich interessant sein kann. Da diese Anomalien aber in erster Linie an Thermalwasseraufstößen in Störungszonen bzw. Klüftungszonen in grösserer Tiefe gebunden sind, bedingt dies eine gezielte, multidisziplinäre Explorationsstrategie, bestehend aus hydrogeologischen, geochemischen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden zwecks Reduktion der Bohrrisiken. Bei den oben erwähnten NEFF-Studien haben sich hierbei die reflexionsseismischen Messungen sowie geochemische Isotopenbestimmungen bei der Erforschung der thermalen Tiefenwässer als besonders wirkungsvoll erwiesen.

In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, dass auch der Bund die Nutzung der umweltfreundlichen Erdwärme fördern möchte. In der Wintersession 1986 hat nämlich das eidgenössische Parlament einen auf 10 Jahre beschränkten Verpflichtungskredit von Fr. 15 Mio zur Finanzierung des Risikos von Geothermiebohrungen bewilligt. Damit kann der Bund bei unterstützungswürdigen Projekten eine *Risikogarantie* von bis zu 80% der Bohrkosten übernehmen.

In der Schweiz hat eine Delegation der Eidgenössischen Fachkommission für die Nutzung geothermischer Energie und die unterirdische Wärmespeicherung (KGS) bereits mit etwa 20 günstig gelegenen Gemeinden Kontakt aufgenommen und auch erste Vorabklärungen durchgeführt. Durch die Risikogarantie des Bundes ist es nun möglich, zumindest einen Teil dieser Projekte zu verwirklichen, was eine grosse Signalwirkung auf die Weiterentwicklung der geothermischen Energienutzung in der Schweiz haben wird.

Aufgrund sämtlicher nun im Raume Bad Schinznach – Baden zur Verfügung stehender Daten wird empfohlen, eine ca. 250 m tiefe Produktionsbohrung im Gebiet des Kurparks von Baden abzuteufen bzw. eine Pilotanlage zu erstellen. Die gesamten Baukosten werden auf ca. 1,4 Mio Fr. geschätzt (Kapitel 12.4). Bei einer Temperatur von ca. 60°C und einer Fördermenge von ca. 1340 l/min Thermalwasser könnten 8 Hotels beheizt werden, wobei eine direkte Nutzung (ohne Wärmepumpe) mittels Wärmetauscher des Thermalwassers vorgesehen ist.

Allerdings muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass bei einer diesbezüglichen Nutzung der geothermischen Ressourcen eine gute Kooperationsbereitschaft bzw. ein starkes Interesse der an einem solchen Projekt beteiligten Körperschaften, wie kantonale Behörden, Gemeinden und Quellenbesitzer, Grundvoraussetzung ist.

Vorgängig einer zukünftigen geothermischen Exploration im *weiteren* Bereich des Untersuchungsgebietes wird ferner empfohlen, eine sorgfältige Zusammenstellung und Auswertung aller geothermischen Daten von den Nagra-Tiefbohrungen durchzuführen. Das gilt im besonderen für das geochemische Datenmaterial, um mit Hilfe von detaillierten Analysen der Isotopen die Wiederanreicherung bzw. Erneuerung (= «Recharge-Mechanismus») der Thermalwässer sowie deren tiefe, regionale Zirkulationsbahnen besser in den Griff zu bekommen. In diesem Zusammenhang wären auch während der Wintermonate thermographische Messungen von Flüssen, kombiniert mit Eichmessungen, zwecks Erkennung von Warmwasseraufstößen empfehlenswert.

[1] Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

LITERATURVERZEICHNIS

- BACHMANN, M. (1983): Geophysikalische Methoden für die geothermische Prospektion. Diplomarbeit, Institut für Geophysik ETH Zürich.
- BODMER, PH. (1982): Beiträge zur Geothermie der Schweiz. Dissertation Nr. 7034, ETH Zürich.
- BULLARD, E. C. (1939): Heat flow in South Africa. Proc. R. Soc. London, Ser. A., 173, 474–502.
- BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (1981): Geothermische Datensynthese der Schweiz. BEW-Schriftreihe Nr. 26, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (1977): Wegleitung zur Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen, Grundwasserschutzzonen und Grundwasserschutzarealen. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- BUNDESGESETZ ÜBER DEN SCHUTZ DER GEWÄSSER GEGEN VERUNREINIGUNGEN (GEWÄSSERSCHUTZGESETZ VOM 8. OKTOBER 1971).
- CADISCH, J. (1931): Zur Geologie der Schweizer Mineral- und Thermalquellen. Verh. natf. Ges. Basel, XLII.
- CADISCH, J. (1936): Geologische Charakteristik der Schweizer Mineral- und Heilquellen. Mitt. Gebiet Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, XXVII/4 und 5.
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Geologie, Chemicus, Genese. Wissenschaftl. Verlagsges., Stuttgart.
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (CGG) (1979): MINI-SOSIE, a new tool for shallow seismic exploration. Unveröffentlichter Bericht der CGG, Paris.
- CRAIG, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133/3465, 1702–1703.
- DAETWYLER, M. (1966): Ausgewählte Fragen zur rechtlichen Behandlung des Grundwassers in der Schweiz. Dissertation Universität Zürich.
- DEUTSCHE INDUSTRIE-NORMEN (1969): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. DIN 4030.
- DR. VON MOOS AG (1983): Umfahrungstunnel Ennetbaden. Ergebnisse der Sondierungen 1983. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Baudepartements des Kantons Aargau, Zürich.
- DUBOIS, J.-D. & FLÜCK, J. (1984): Geochemie, Interner Bericht Nr. 032, NEFF-Projekt Nr. 165.
- EIDG. DEPT. DES INNEREN (1982): Empfehlungen über die Untersuchungen der schweizerischen Oberflächengewässer (Stand 1982).
- ELLIS, A. J. (1979): Chemical geothermometry in geothermal systems. Chemical Geology, 25, 219–226.
- FISCHER, G., LE QUANG, B. V. & MÜLLER, I. (1983): VLF Ground Surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 31, 977–991.
- FOURNIER, R. O. & POTTER, R. W. (1979): Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. Geochim. Cosmochim. Acta, 43, 1543–1550.
- FRTZ, P. & FONTES, J. CH. (1980): Handbook of environmental isotope geochemistry. Vol. 1A, The terrestrial environment, Elsevier, Amsterdam.
- GRIESSER, J.-C. & RYBACH, L. (1983): Zusammenstellung der Temperaturmessungen im Untersuchungsgebiet Raum Baden. Interner Bericht Nr. 007, NEFF-Projekt Nr. 165.
- GRIESSER, J.-C. (1985): Geothermische Prospektion zwischen Baden und Schinznach, Geophysikalische Prospektion und thermohydraulische Modellrechnungen. Dissertation Nr. 7845, ETH Zürich.
- HALDIMANN, P., NAEF, H. & SCHMASSMANN, H. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. NAGRA, Technischer Bericht 84–16, Baden.
- HARTMANN, A. (1943): Natur und Entstehung der Therme von Baden. Annal. Schw. Ges. Baln. Klimat., 36, 72.
- HEIM, A. (1878): Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe. Benno Schwabe, Verlagsbuchhandlung, Basel.
- HEIM, A. (1919): Geologie der Schweiz. 1. Bd., Leipzig.
- HÖGL, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart.
- IMBODEN & RHINOW (1976): Schweizerische Verwaltungsrechtsprechung. 5. Auflage, Band II: Besonderer Teil, Nr. 132. – Helbing & Lichtenhahn Verlag AG, Basel.
- KIMMEIER, F., ANDREWS, R., PERROCHET, P. & KIRALY, L. (1985): Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire: Partie A: Modèle regional; Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse). NAGRA, Technischer Bericht 84–50, Baden.
- KRUSEMAN, G. & DE RIDDER, N. (1979): Analysis and evaluation of pumping test data. International institute for land reclamation and improvement (ILRI), Wageningen.
- LAUBSCHER, H. P. (1961): Die Fernschubhypothese der Juraufaltung. Ecloga geol. Helv., 54/1, 221–282.
- LEWIS, T. J. & BECK, A. E. (1977): Analysis of heat flow data – detailed observations in many holes in a small area. Tectonophysics, 41, 41–59.
- LOOSLI, H. H. & ÖSCHGER, H. (1978): ³⁹Ar, ¹⁴C and ⁸⁵Kr measurements in groundwater samples. In: Int. Symp. on Isotope Hydrology (IAEA), Neuherberg, BRD, 1–22.
- MAZOR, E. UND WASSERBURG, G. J. (1965): Helium, Neon, Argon, Krypton and Xenon in gas emanations from Yellowstone and Lassen Volcanic National Parks. Geochim. and Cosmochim. Acta, 29, 443–454.

- MAZOR, E., VUATAZ, F. D. UND JAFFÉ, F. C. (1985): Tracing groundwater components by chemical, isotopic and physical parameters. Example: Schinznach, Switzerland. *Journ. of Hydrology*, 76, 233–246.
- MAZOR, E., JAFFÉ, F. C., FLÜCK, J. UND DUBOIS, J.-D. (1986): Tritium corrected ^{14}C and atmospheric noble gas corrected ^4He applied to deduce ages of mixed groundwaters: Examples from the Baden region, Switzerland. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, 50, 1611–1618.
- MAZOR, E., DUBOIS, J.-D., FLÜCK, J. UND JAFFÉ, F. C. (1987): Geothermal gas and water components in warm springs, indicated by noble gases and isotopic composition: Baden, Switzerland. In Druck (in *Isotope geoscience*).
- MERKI, P. (1961): Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. *Eclogae geol. Helv.*, 54/1, 137–219.
- MOTOR-COLUMBUS INGENIEURUNTERNEHMUNG AG (1976): Geothermische Studie der Warmwasserzone Zurzach – Lostorf – Baden. *Schriftreihe der Eidg. Kommission für die Gesamtenergie-Konzeption*, Studie Nr. 14, Bern.
- MÜLLER, I. (1982): Role de la prospection electro-magnétique VLF (very low frequency) pour la mise en valeur et la protection des aquifères calcaires. *Actes 3e Coll. Hydrogéologie en pays calcaire*, Neuchâtel, 7.–10. Oct. 1982, *Ann. Sci. Univ. Besançon, Geol. Mem.*, 1, 219–226.
- MÜLLER, I. (1983): Anisotropic properties of rocks detected with electromagnetic VLF (very low frequency) measurements. In: *Proc. of the Int. Symposium of Field Measurements in Geomechanics*, Zürich, 5.–8. Sept. 1983, Vol. 1, 273–282.
- MÜLLER, W. H., HUBER, M., ISLER, A. & KLEBOTH, P. (1984): Erläuterungen zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz, 1–100000. NAGRA, Technischer Bericht NTB 84–25, Baden.
- MÜNZEL, U. (1947): Die Thermen von Baden. Eine balneologische Monographie. Selbstverlag, Baden.
- NAGRA (1984 a): Die Kernbohrung Beznau. NAGRA, Technischer Bericht NTB 84–34. *Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser.*, Lieferung 66, Schweizerische Geotechnische Kommission.
- NAGRA (1984 b): Erläuterungen zur «Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz, 1–100000». NTB 84–25.
- NAGRA (1985 a): Projekt Gewähr 1985. Endlager für hochradioaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. NGB 85–04, Baden.
- NAGRA (1985 b): Sondierbohrung Böttstein, Untersuchungsbericht, Textband, Beilagenbände A und B. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.*, Lieferung 67, Schweizerische Geotechnische Kommission.
- NEFF (1980): Geothermische Prospektion im Raum Koblenz – Wildeggen – Dielsdorf. *Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds*, Basel.
- NEFF (1984): Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung. *Schlussbericht. Nationaler Energie-Forschungs-Fonds*, Basel.
- PETERS, T. & MATTER, A. (1981): Sedimentologische, mineralogische und geochemische Untersuchungen an Bohrkernen der Bohrung Nr. 7904 der NOK beim KKW Beznau. NAGRA, Interner Bericht Nr. 59, Baden.
- PRAKLA – SEISMOS (1979 a): Reflexions- und Refraktionsseismik Bad Schinznach, Bericht Nr. 781014 (unpubl., im Auftrag der Bad Schinznach AG).
- PRAKLA – SEISMOS (1979 b): Geoelektrische Widerstandsmessungen Bad Schinznach, Bericht Nr. 781703 (unpubl., im Auftrag der Bad Schinznach AG).
- REED, M. (1983): Assessment of Low-Temperature. Geothermal Resources of the United States. US Geological Survey, Circular 892.
- RYBACH, L. (1962): Refraktionsseismische Untersuchungen im Raum Aare-, Limmat- und Surbtal. *Beitr. Geol. Schweiz, Geophysik Nr. 15*, Kümmerly & Frey, Bern.
- RYBACH, L., EUGSTER, W., GRIESSER, J.-C. (1987): Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz. *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 80, Nr. 2, p. 521–534.
- SAUER, K. (1969): Die Wiedergewinnung der durch Kraftwerksbaumaassnahmen versiegten Natrium-Chlorid-Thermen von Säckingen (Hochrhein), Baden-Württemberg. *Heilbad und Kurort*, 21/H2, 2–12.
- SCHINDLER, C. (1977): Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. *Beitr. Geol. Schweiz. kleinere Mitt.*, 67, 109–160.
- SCHINDLER, C. (1982): Geotechnische Untersuchung II; Habsburgtunnel: Nationalstrasse N3 Basel – Zürich, Sektion N3/07, Bözbergtunnel Südportal N1 Birrfeld. Bericht für das Tiefbauamt des Kt. Aargau. Bericht Nr. 3477/4, Büro Dr. von Moos AG, Zürich, 19. August 1982 (unpubl.).
- SCHMASSMANN, H. (1977): Die Mineral- und Thermalwässer von Bad Lostorf. *Mitt. natf. Ges. Solothurn*, 27, 150–290.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W. & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. NAGRA, Technischer Bericht NTB 84–21, Baden.
- SCHMASSMANN, H., NAEF, H. UND HALDIMANN, P. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. NAGRA, Technischer Bericht 84–16, Baden.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (1975): Verordnung über Abwassereinleitungen vom 8. Dezember 1975.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (1981): Verordnung über den Schutz der Gewässer von wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF), vom September 1981.
- STIEFEL, A. (1984): Beiträge zur geothermischen Kartierung der Nordschweiz. Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH Zürich.
- THIERY, D., VANDENBEUSCH, M. & VANBOURG, P. (1983): Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. *Documents du BRGM*, N8 57, Orléans.
- TÓTH, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, 68, 4795–4812.
- VUATAZ, F. D. (1979): Géochimie des eaux thermales de Suisse et de quelques régions limitrophes. Rapport intermédiaire pour la Comm. féd. d'énergie géothermique, Bern, non publié.

VUATAZ, F. D. (1982): Hydrologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limithrophes. *Matér. Geol. Suisse, Sér. Hydrol.*, 29, Kümmerly und Frey, Bern.

WILDI, W. (1975): Die Mettaufer Überschiebung im Aargauischen Tafeljura (Nordschweiz), *Eclogae geol. Helv.*, 68/3, 483-489.

WYLLIE, M. R. J., GREGORY, A. R. & GARDNER, L. W. (1956): Electric wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21/1, 41-70.

ZORN, A. & JAFFÉ, F. C. (1983): Les variations du débit des sources de Baden (canton d'Argovie, Suisse). *Eclogae Geol. Helv.*, 76/2, 451-463.