Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft

Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft

Band: 31 (1986)

Artikel: Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz : Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer

Autor: Diebold, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-172783

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 02.10.2025

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

Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer

von PETER DIEBOLD, Nagra, Baden

mit 13 Textfiguren und 6 Tabellen

Zusammenfassung

Die seit 1981 in der Region Nordschweiz laufenden erdwissenschaftlichen Untersuchungen der Nagra bezwecken die Erarbeitung einer Datenbasis, wie sie zur Beurteilung der prinzipiellen Machbarkeit und Sicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle erforderlich ist.

Das Untersuchungsprogramm umfaßt das ganze Spektrum erdwissenschaftlicher Arbeiten: Zur Abklärung der Tektonik des Gebietes wurden geophysikalische Vermessungen, Gravimetrie, Aeromagnetik und Seismik ausgeführt. Diese werden ergänzt durch geologische Kartierungen und Daten aus den bisher abgeteuften Sondierbohrungen. Letztere haben neue Daten zur Stratigraphie/Petrographie der Nordschweiz geliefert und auch wesentliche neue Erkenntnisse zur Hydrogeologie und Hydrochemie der Region beigetragen. Das neotektonische Arbeitsprogramm bezweckt die Erfassung geologisch junger und rezenter Erdkrustenbewegungen.

Im Rahmen der Untersuchungen nehmen die hydrogeologischen und hydrochemischen Arbeiten eine zentrale Stellung ein. Die Strömungsverhältnisse des Tiefengrundwassers in der Region Nordschweiz wurden mit Hilfe zweier hydrodynamischer Modelle dreidimensional simuliert. Das regionale Modell umfaßt ein Gebiet, das die Infiltrationsgebiete im Grundgebirge des Schwarzwaldes und des Aarmassives mit einschließt; es dient der großräumigen Modellierung regionaler Grundwassersysteme. Das lokale Modell wurde so ausgelegt, daß auch Details von komplizierteren Strukturen sowie lokale Grundwassersysteme genauer erfaßt werden konnten. Es wurde möglich, z. B. den Einfluß von größeren Verwerfungszonen auf die Wasserzirkulation im Grundgebirge zu simulieren.

Die Resultate systematischer Untersuchungen der physikalischen, chemischen und isotopischen Beschaffenheit an den aus Quellen, Thermen und in Sondierbohrungen der Region gewonnenen Wasserproben ermöglicht es, Grundwässer verschiedener Herkunft zu typisieren. So können auch Verbindungen (Mischungen) zwischen Grundwässern aus Aquiferen verschiedener Formationen erkannt werden und es scheint heute möglich, das komplizierte Muster der nach Regionen und Aquiferen verschiedenartigen Grundwassertypen wenigstens in Ansätzen zu enträtseln. Daraus ergeben sich für die Validierung der hydrodynamischen Modelle wichtige Hinweise.

Der vorliegende Text lehnt sich weitgehend an die Darstellung an, die im *Nagra-Projekt-Bericht, Gewähr 1985,* die erdwissenschaftlichen Untersuchungsresultate zusammenfaßt. Er wurde ergänzt mit neuesten Meßresultaten.

1 Einleitung

Im Rahmen der langfristigen Zielsetzung der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) soll in der seit 1981 laufenden ersten Phase

ein erdwissenschaftliches Untersuchungsprogramm diejenigen Daten liefern, die für die Beurteilung der prinzipiellen Machbarkeit und der Sicherheit von Endlagerprojekten für hochradioaktive Abfälle in der Nordschweiz notwendig sind.

Zudem wurde das Programm dieser ersten Phase so ausgelegt, daß innerhalb der ursprünglich als günstig erscheinenden Region der Nordschweiz die geologischen Verhältnisse soweit abgeklärt werden, als sie notwendig sind für die Auswahl sowohl eines günstigen Wirtgesteins zum Bau eines sicheren Endlagers als auch zur Definition jener Teilgebiete, die in einer späteren Phase im Detail auf ihre Eignung als potentielle Standorte weiter zu untersuchen sein werden (THURY, 1980, s. *NTB 80-07*).

Bei den Untersuchungen der Nagra steht die Frage der Endlagersicherheit zentral. Für die Erdwissenschaften treten dabei zwei Aspekte in den Vordergrund:

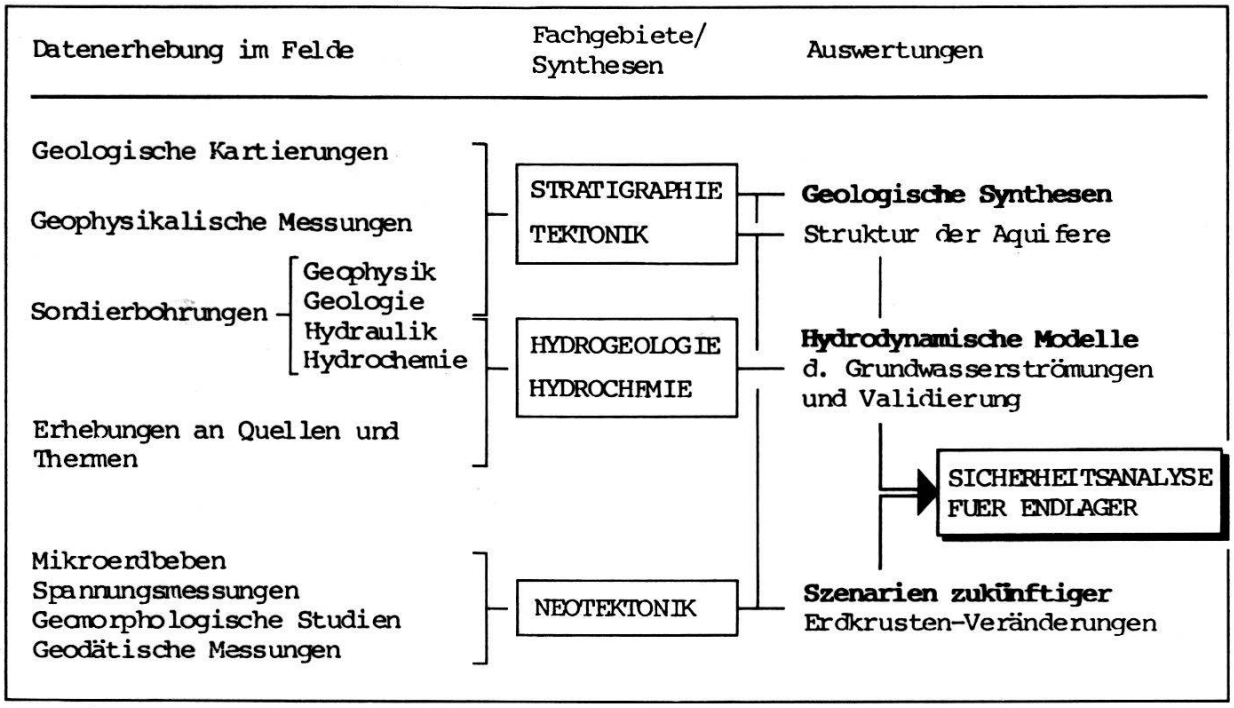
- die Grundwasserströmungsverhältnisse und
- die geologische Langzeitstabilität der Endlagerregion.

Für die Freisetzung und den Rücktransport im Untergrund eingelagerter toxischer Abfälle (nicht nur der radioaktiven) in den Lebensraum des Menschen kommt in erster Linie zirkulierendes Grundwasser in Frage. Hydrogeologischen Untersuchungen kommt daher im Arbeitsprogramm der Nagra ein besonderer Stellenwert zu (vgl. hierzu Abschnitt 3, Hydrodynamik, Hydrochemie). Die Modellierung der Grundwasserströmungsverhältnisse erfordert u. a. aber auch die Kenntnis der geologischen Tiefenstruktur wie sie aus Resultaten der oberflächen-geophysikalischen Messungen, Feldkartierungen und Sondierbohrungen hergeleitet wird. Gesteinsdurchlässigkeiten und potentiometrische Druckverhältnisse im tieferen Untergrund können nur in Sondierbohrungen gemessen werden, werden aber durch umfangreiche Datenerhebungen an Grundwasserfassungen, Quellen und Thermen ergänzt.

Die geologische Langzeitstabilität einer Endlager-Region erfordert Aussagen über mögliche zukünftige Veränderungen in der Erdkruste über geologische Zeiträume. Die unter dem Sammelbegriff Neotektonik (in Figur 1) zusammengefaßten Untersuchungen erstreben die Erfassung des rezenten Zustandes der Erdkruste, d. h. ihrer Struktur und Dynamik, und deren laufende Veränderungen. Eine möglichst genaue Kenntnis der geologischen Struktur, ihrer Entstehungsgeschichte und rezenten Veränderungen dient als Grundlage für plausible Szenarien künftiger Entwicklungen (vgl. DIEBOLD, MÜLLER, 1985, s. *NTB 85-26*).

Die notwendigen erdwissenschaftlichen Untersuchungen sind äußerst vielschichtig. Wie sich im Laufe der bisherigen Datenerhebung gezeigt hat, stoßen sie an die Grenzen herkömmlicher, bewährter Methodik (z. B. Hydrogeologie des kristallinen Grundgebirges) oder sie bewegen sich auf geologischem Neuland, für das analoge Vergleichsfälle oftmals fehlen (z. B. Struktur des Permokarbon-Troges).

Diese Vielschichtigkeit und Komplexität verlangt nicht nur ein interdisziplinäres Vorgehen, wie es schematisch in Figur 1 zur Darstellung kommt, sondern auch die Mithilfe von Spezialisten des In- und Auslandes.



Figur 1: Zusammenhänge der erdwissenschaftlichen Datenerhebungen der Nagra in der Nordschweiz

Resultate der bis Ende 1984 ausgeführten erdwissenschaftlichen Untersuchungen wurden im *Projekt Gewähr 1985* der Nagra in der Sicherheitsanalyse für den Modellfall «Nordschweiz» ausgewertet und dokumentiert (NAGRA, 1985, s. *NGB 85-01, 85-04, 85-05*).

Der vorliegende Text lehnt sich in Teilen auch an die im Projekt *Bericht Gewähr 1985* (NAGRA, 1985, s. *NGB 85-04*) veröffentlichte Darstellung der hier behandelten Themen.

Heute liegt eine Fülle geologischer Rohdaten vor, an deren detaillierter Auswertung und Interpretation auch schweizerische Hochschulinstitute mitwirken; Arbeiten, die wahrscheinlich noch mehrere Jahre beanspruchen werden. Diese Daten tragen wesentlich dazu bei, den geologischen Bau des tieferen Untergrundes der Region Nordschweiz genauer abzuklären und das Verständnis der Geologie grundlegend zu verbessern.

Nagra publiziert diese Daten, Resultate und Interpretationen laufend in der Reihe der *Nagra Technischen Berichte* (NTB), auf die mehrfach Bezug genommen wird.

Im folgenden Abschnitt soll versucht werden, das Inventar der bisherigen Datenerhebungen im Felde kurz zu umreißen.

2 Übersicht der Datenerhebung im Felde

Die seit 1981 laufenden Datenerhebungen in der Region Nordschweiz umfassen ein Spektrum erdwissenschaftlicher Aktivitäten, das in seiner Vollständigkeit und

seinem Umfang für die Schweiz wohl einmalig ist. Die Methodik geophysikalischer Messungen und Sondierbohrungen konnte sich dabei weitgehend auf die von der Erdölwirtschaft entwickelte und erprobte Technologie abstützen. Dagegen fehlten vergleichbare Erfahrungen (z. B. bei den detaillierten hydrogeologischen und hydrochemischen Detailuntersuchungen) in den wenig permeablen kristallinen Grundgebirgsstrecken der Sondierbohrungen.

2.1 Geophysikalische Messungen

Im Gebiet der Nordschweiz ergab sich eine Übereinstimmung der Interessen der Nagra mit den Aufgaben der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission, die vom Bundesrat mit der geophysikalischen Landesaufnahme beauftragt ist. Beide Organisationen beschlossen deshalb im Sommer 1981, ihre Arbeiten in einem gemeinsamen Untersuchungsprogramm zu koordinieren.

Bis Ende 1985 umfaßte das geophysikalische Programm folgende Untersuchungen (Figuren 2 und 3):

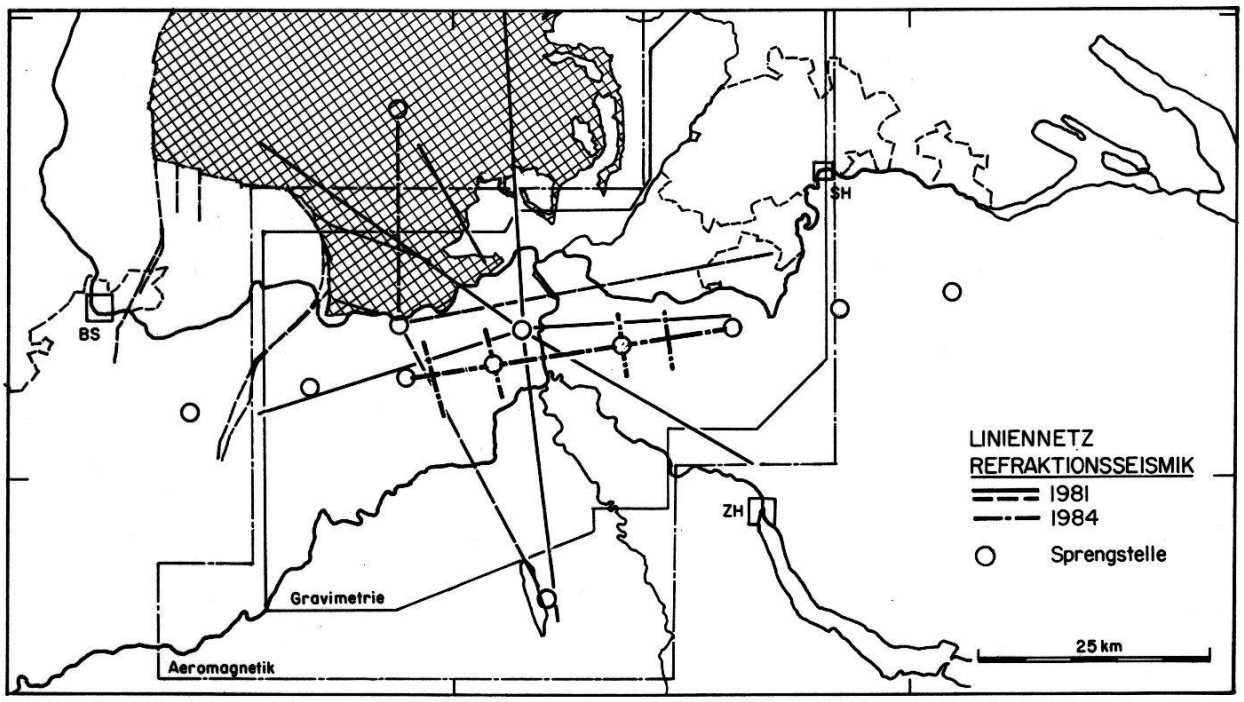
- *Gravimetrie* (Erdschwere-Messungen)
  In dem auf Figur 2 eingetragenen Untersuchungsgebiet wurden 1981/82 insgesamt 4952 gravimetrische Stationen vermessen. Die Auswertung der Daten ließ ein signifikantes Massendefizit im Bereich des Permokarbon-Troges erkennen (KLINGELÉ et al., 1984, s. *NTB 84-22*).

- *Aeromagnetik* (Magnetometrie)
  1981 wurde auf Flughöhen von 1100 m und 1500 m ein Liniennetz von insgesamt 6250 km mit einer Maschengröße von 1 km (N–S) und 5 km (E–W) magnetisch vermessen (vgl. Figur 2). Im Untersuchungsgebiet wurden keine signifikanten magnetischen Anomalien gefunden (KLINGELÉ, 1984, s. *NTB 84-14*).

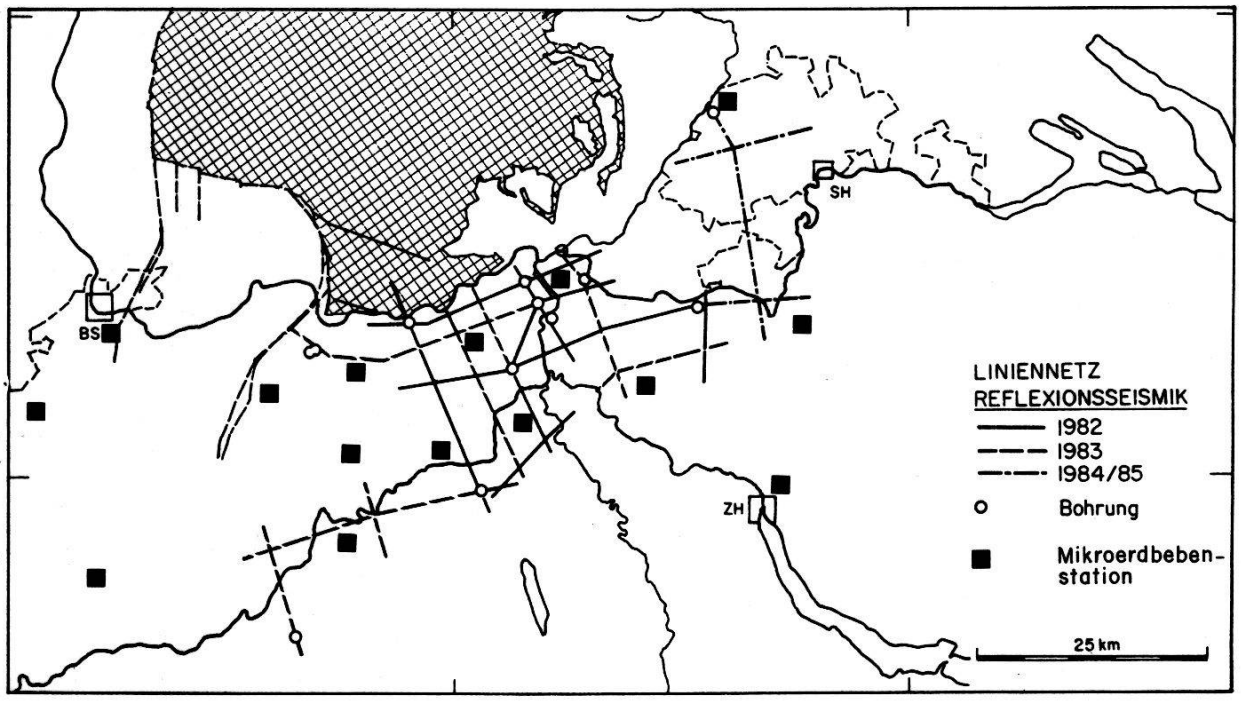
- *Magnetotellurik*
  Ebenfalls 1981 wurden im Schwarzwald (Schönau–Kaisten), im Tafeljura (Herznach) und am Baldeggersee magnetotellurische Pilotmessungen durchgeführt. Da sich die Resultate aber als nicht schlüssig erwiesen haben (FISCHER et al., 1984, s. *NTB 84-13*), wurden keine weiteren Messungen durchgeführt.

- *Refraktionsseismik*
  Mit Hilfe der Refraktionsseismik ist es möglich, die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges großräumig zu kartieren. Die Aufnahmen der Jahre 1981/82 basieren auf total 232 km Seismometerauslagen (Figur 2) und erbrachten die ersten deutlichen Hinweise auf die Existenz des nordschweizerischen Permokarbon-Troges (SIERRO et al., 1983, s. *NTB 83-21*). Nachdem dieser Trog sowohl mit Hilfe der Reflexionsseismik als auch in zwei Sondierbohrungen nachgewiesen werden konnte, wurde 1984 eine weitere Refraktionsmessung im Hinblick auf die Kartierung des Permokarbon-Troges ausgelegt. Die Situation ist aus Figur 2 ersichtlich.

– *Reflexionsseismik*
Das Liniennetz der in drei Etappen zwischen 1982 und 1985 durchgeführten Reflexionsseismik, bei 36facher Stapelung, beträgt insgesamt 400 km (Figur 3). Die geophysikalische Datenverarbeitung (Processing) der bisherigen Feldaufnahmen ist abgeschlossen und hat seismische Profile sehr hoher Qualität geliefert.



Figur 2: Geophysikalische Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz, 1981–1984, Gravimetrie, Aeromagnetik und Refraktionsseismik



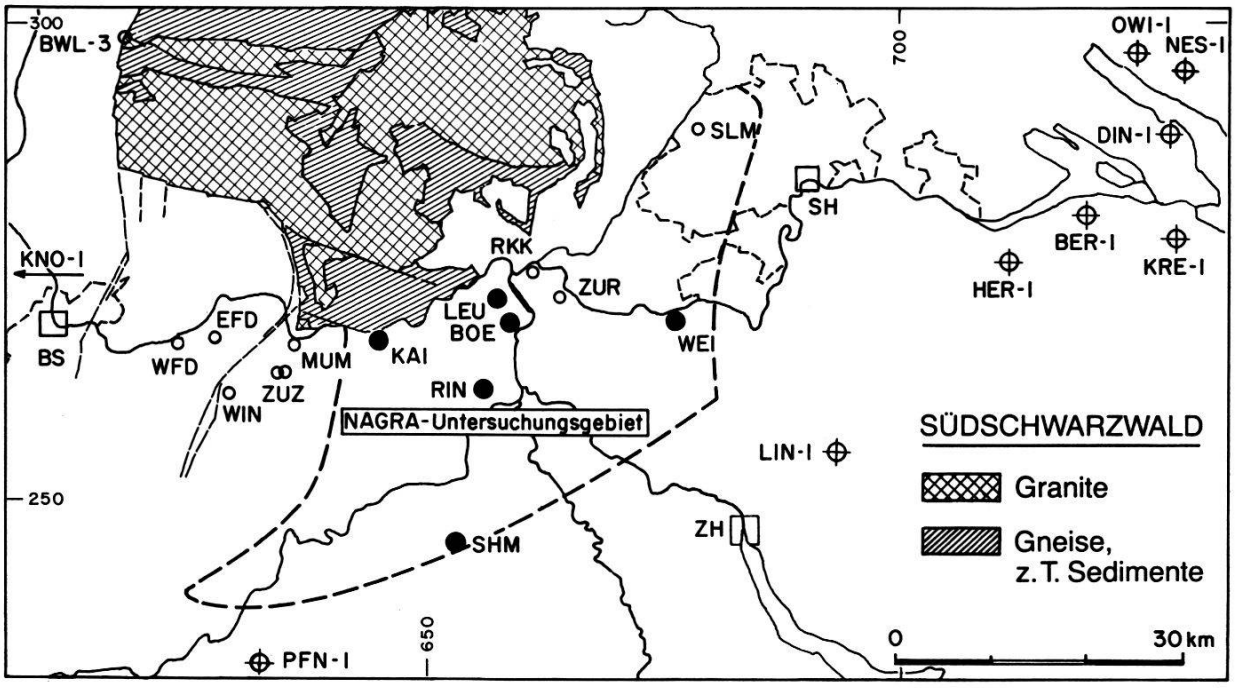
Figur 3: Geophysikalische Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz, 1982–1984/85, Reflexionsseismik und Mikroerdbebennetz

Dagegen ist die geologische Detailinterpretation der Profile – in Anbetracht der vorgefundenen komplexen Geologie – äußerst aufwendig und noch nicht abgeschlossen (z. B. LAUBSCHER, 1986 und Figur 6).

2.2 Die Sondierbohrungen

Sondierbohrungen stellen das wichtigste Hilfsmittel dar, um den tieferen Untergrund der Datenerfassung zugänglich zu machen. Die Untersuchungsprogramme in den Sondierbohrungen umfassen dementsprechend das ganze Spektrum der erdwissenschaftlichen Disziplinen, mit Schwerpunkt Hydrogeologie. Die Resultate der aufwendigen Untersuchungen werden ebenfalls in der laufenden Serie der *Nagra Technische Berichte* (NTB's) publiziert.

Die bis Ende 1985 abgeteuften sechs Nagra Sondierbohrungen sind in Figur 5



Abk.	Bohrung		1	2	3	4
KNO 1	Knöringen (F)	1959	E	- 1685	608	Gr
BWL 3	Badenweiler	1971	W	-	>156	
WFD	Weierfeld	1875	K	- 87	284	Gr
EFD	Engerfeld	1983	W	- 70	260	Gr
WIN	Wintersingen	1939	K	- 36	414	Gr
PFN 1	Pfaffnau 1	1963	E	- 1320	8	Gr
ZUZ	Zuzgen 1	1940	K	+ 156	176	Gr
	Zuzgen 2	1940	K	+ 163	167	Gr
MUM	Mumpf	1898	K	-	>180	
KAI	Kaisten	1984	N	+ 23	172	Gn
SHM	Schafisheim	1984	N	- 1069	0	Sy
RIN	Riniken	1984	N		>989	
LEU	Leuggern	1985	N	+ 126	0	Gn/Gr
BOE	Böttstein	1983	N	+ 32	0	Gr
RKK	Koblenz	1954	-	+ 164	0	Gr
ZUR	Zurzach (3)	1980	W	- 68	0	Gn/Gr
WEI	Weiach	1983	N	- 1651	1022	Gn

Abk.	Bohrung		1	2	3	4
SLM	Schleitheim	1823	S	+ 308	0	Gr
LIN 1	Lindau 1	1964	E	- 1849	0	Gr
HER 1	Herdern 1	1981	E	(-1610)	0	(Gr)
BER 1	Berlingen 1	1964	E	- 1718	>4	
NES 1	Nesselwangen (D)	1976	E	- 835	?	?
DIN 1	Dingelsdorf 1	1960	E	- 2198	724	Gr
KRE 1	Kreuzlingen 1	1962	E	- 2012	18	Gr
OWI 1	Owingen 1	1970	E	- 1112	?	?

Erläuterungen:

1 E: Erdöl ◆ 2 Kote der Grundgebirgsoberfläche
W: Wasser o
K: Kohle o 3 Mächtigkeit des Permokarbons (m)
S: Salz o
N: Nagra ● 4 Gr: Granit, Sy: Syenit, Gn: Gneis

Figur 4: Standorte der bis Ende 1985 durchgeführten Sondierbohrungen der Nagra und anderer bis Ende 1985 ins Perm und/oder Grundgebirge abgeteufter Bohrungen

vergleichend tabelliert. Ihre Standorte sind aus Figur 4 ersichtlich, auf der auch andere Bohrungen der Region Nordschweiz eingetragen sind, die Permokarbon und/oder Grundgebirge erreicht haben.

Insgesamt wurden in den sechs Sondierbohrungen ca. 10 800 Bohrmeter abgeteuft, davon steht über eine Strecke von rund 8000 m Bohrkernmaterial zur genauen geologischen Analyse zur Verfügung. In den Bohrungen wurden neben umfassenden bohrlochgeophysikalischen Meßreihen auch eingehende, z. T. lange dauernde hydraulische Testmessungen (Langzeitbeobachtungen) durchgeführt und entnommene Wasserproben hydrochemisch untersucht. Auf die regionale Interpretation dieser hydrogeologischen Daten wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Für die Sondierbohrung Böttstein, die erste Nagra-Bohrung, konnten die Datenanalysen abgeschlossen und in einer Anzahl detaillierter technischer Berichte publiziert werden (Nagra, 1985, s. *NTB 85-01, 84-05, 85-06* etc.). Die Auswertung der anderen Sondierbohrungen ist noch im Gange.

2.3 Neotektonische Untersuchungen

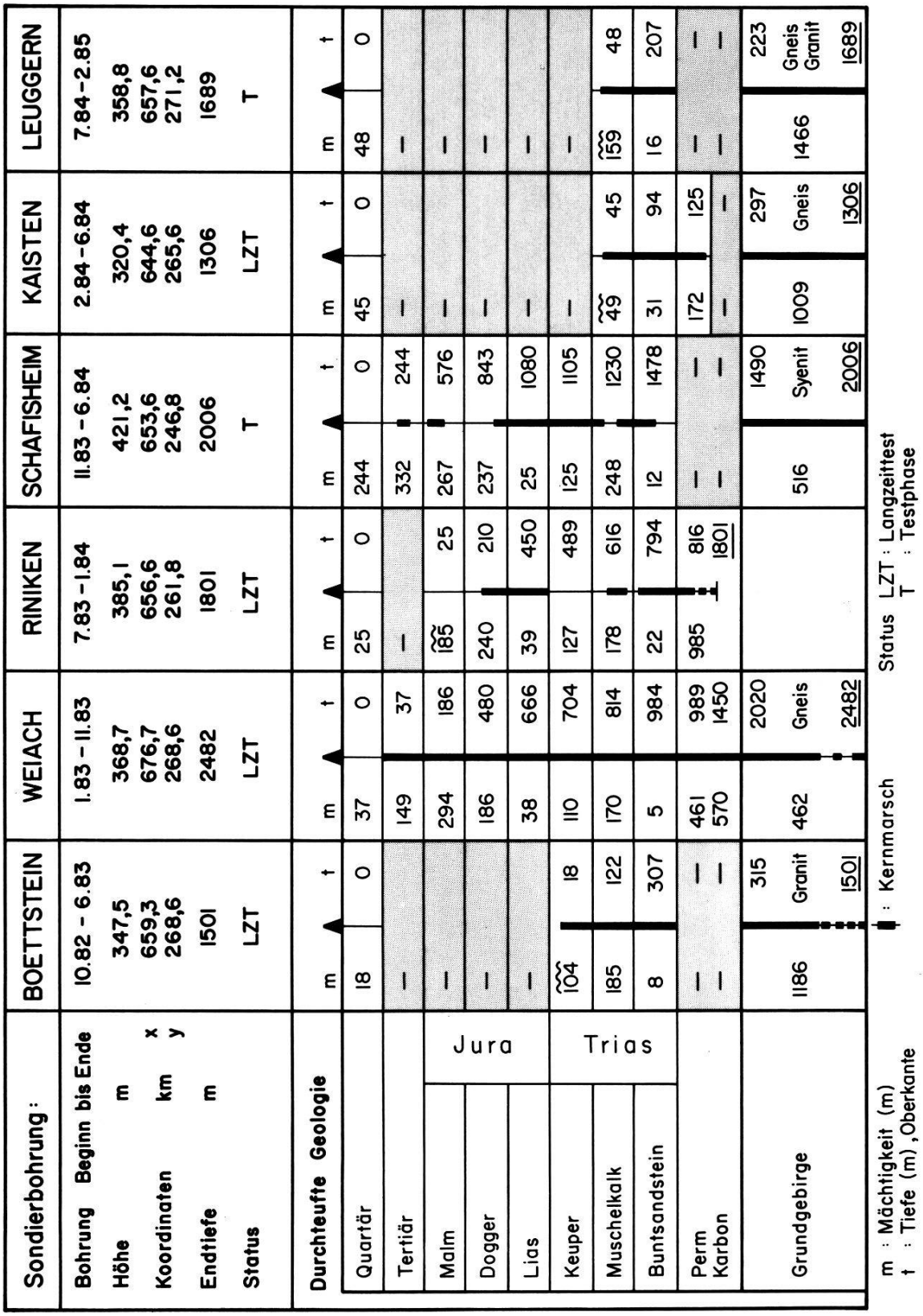
Wie einleitend dargelegt (Figur 1), werden unter dem Begriff Neotektonik jene erdwissenschaftlichen Untersuchungen zusammengefaßt, die eine Erforschung der geologisch jüngsten Erdkrustenbewegungen zum Ziele haben.

Hinweise auf junge Krustenbewegungen in der Nordschweiz sind in der einschlägigen geologischen Literatur mehrfach zu finden. So erschien es zweckmäßig, diese zu Beginn der Untersuchungen zu evaluieren und in einem Bericht zusammenzustellen (ISLER, 1984, s. *NTB 84-29)*.

- *Erdbeben*
  Bei neotektonischen Untersuchungen kommt den Erdbebenmessungen ein hoher Stellenwert zu. Die durch Spannungen in der spröden oberen Erdkruste meist an Verwerfungen ausgelösten Bewegungen verursachen Erdbeben. Ort- sowie Bewegungsrichtungen und damit auch der Spannungszustand in der Kruste, lassen sich durch gleichzeitige Messungen eines Bebens an einer Mehrzahl von Stationen berechnen. Aus einer Vielzahl von Beobachtungen über längere Zeitspannen können ausgedehnte Schwäche- bzw. Bewegungszonen ermittelt werden. Das heute in der Nordschweiz zur Verfügung stehende erweiterte Mikroerdbebennetz (Figur 3) ist dem schweizerischen Erdbebendienst angeschlossen. Dieses Stationsnetz erlaubt die Lokalisierung und Vermessung auch von sehr schwachen Beben (Magnitudenschwelle um 1 auf der Richterskala). Über die Auswertung dieser Erdbeben-Beobachtung berichtet Nagra regelmäßig (MAYER-ROSA et al., 1983, s. *NTB 83-08*, und DEICHMANN et al., 1984, s. *NTB 84-12)*.

- *Spannungsmessungen*
  Die aus Erdbeben bestimmbaren Spannungszustände der Erdkruste (PAVONI, 1985, s. *NTB 84-45)* können durch lokale Spannungs-Messungen an Gesteinen ergänzt werden. Das Spannungsfeld im nordschweizerischen untiefen Krusten-

teil wurde anhand von statistischen Daten über anisotrope Bohrlochwandausbrüche in den Nagra-Sondierbohrungen ermittelt. Die von einer kreisrunden



Figur 5: Die bis Ende 1985 abgeteuften Sondierbohrungen der Nagra im Vergleich

Bohrkrone geschnittenen Bohrlöcher sind im Querschnitt leicht exzentrisch. Die Abweichungen vom Kreis werden im Bohrloch vermessen und statistisch ausgewertet. Resultate wurden im Bericht von BECKER et al., 1984, s. *NTB 84-37,* publiziert.

- *Vertikale Krustenbewegungen* (Geodäsie)
  Rezente vertikale Krustenbewegungen lassen sich aus dem Vergleich von wiederholten, zeitlich getrennten Präzisionsnivellements berechnen. Die in der Nordschweiz in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie durchgeführten Untersuchungen haben Regionen mit signifikanten differentiellen Hebungs- bzw. Absenktendenzen nachgewiesen. Die Meßresultate sind in GUBLER et al., 1984, s. *NTB 84-17,* dokumentiert. Die Auswirkungen andauernder Krustenverstellungen der jüngsten geologischen Vergangenheit sollten sich auch in der Landschaftsform (Geomorphologie) und an Flußsystemen ausprägen.

- *Geomorphologie*
  Alle auf Satellitenaufnahmen festgestellten Lineamente wurden im Vergleich mit detaillierten Luftphotos, topographischen Karten und geologischen Kartierungen analysiert, ohne daß sich aber neue, bisher unbekannte Störungszonen hätten finden lassen (ISLER et al., 1984, s. *NTB 84-28).* Dagegen hat eine Analyse der Tiefenerosion sowie des Verlaufs der Niederterrassenschotter des unteren Aareabschnittes und des Hochrheins (Eglisau–Basel) Hinweise auf junge Krustenverstellungen gegeben. Solche lassen sich auch aus den Gefällsverhältnissen der Flüsse auf der südlichen Schwarzwaldabdachung vermuten (HALDIMANN et al., 1984, s. *NTB 84-16).*

Die vor rund drei Jahren angelaufenen neotektonischen Untersuchungen werden gezielt weitergeführt.

3 Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der Nordschweiz

Im Rahmen der Sicherheitsanalysen hat die Nagra zwei numerische, dreidimensionale hydrodynamische Modelle der Grundwasserströmungsverhältnisse der Region Nordschweiz entwickelt. Diese Modelle erwecken aus mehreren Gründen ein allgemeines Interesse:

- Die Resultate dieser Modelle sind zur Beurteilung einer Reihe von hydrogeologischen Fragen der Region potentiell nützlich, auch wenn für eine gezielte Anwendung gegebenenfalls gewisse Anpassungen notwendig wären.
- Die zur Modellierung notwendigen Eingabedaten erfordern die systematische Inventarisierung und Beurteilung aller aus der Region verfügbaren geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Daten. Die Kenntnis von Datenlücken erlaubt ein gezieltes Nachfassen bei der weiteren Datenerhebung.

Das Verständnis der hydrogeologischen Verhältnisse im tieferen Untergrund setzt u. a. auch die Kenntnis der Geometrie der Aquifere und Aquitarde voraus. Diese läßt sich wenigstens teilweise aus der Kenntnis der Tektonik und der Stratigraphie herleiten. Da im folgenden auf die Tektonik der Nordschweiz und auf den nordschweizerischen Permokarbon-Trog Bezug genommen wird, erschien es zweckmäßig, dem Text ein vereinfachtes geologisches Querprofil und ein schematisches Blockdiagramm des Permokarbon-Troges beizufügen (Figuren 6 und 7).

Das Ziel der hydrodynamischen Modellierung ist die quantitative Charakterisierung der Strömungsverhältnisse innerhalb des Modell-Gebietes, die der direkten Beobachtung meist nicht zugänglich sind. Die praktische Anwendung solcher Modelle zur Beurteilung von Abfall-Endlagern ist naheliegend (vgl. Abschnitt 1).

Sie werden aber z. B. ebenso bei der geothermischen Wärmegewinnung (NEFF, 1980) oder in der Erdölindustrie zur Planung der Ölförderung zum Einsatz gebracht. Hinweise auf die Aussagekraft eines Modells ergeben sich aus dem Vergleich der errechneten Daten mit meist nur punktuellen Felddaten (z. B. Vergleich errechneter potentiometrischer Höhen mit Beobachtungen in Bohrungen).

3.1 Grundsätzliche Aspekte hydrodynamischer Modelle

Modelle haben den Grundprinzipien der Hydrodynamik zu genügen. Diese beinhalten, daß

- in einem gegebenen (geschlossenen) Teilbereich der Wasserzufluß dem Abfluß gleich sein muß (Wasser-Bilanz) und
- die Wasserfließrate (q) in einem geologischen System proportional zum hydraulischen Gradienten (i) und zur hydraulischen Konduktivität (Wasserdurchlässigkeit) des Systems ist.

Für die Modelle wird eine sogenannte Filtergeschwindigkeit angenommen, die durch das Gesetz von DARCY beschrieben wird:

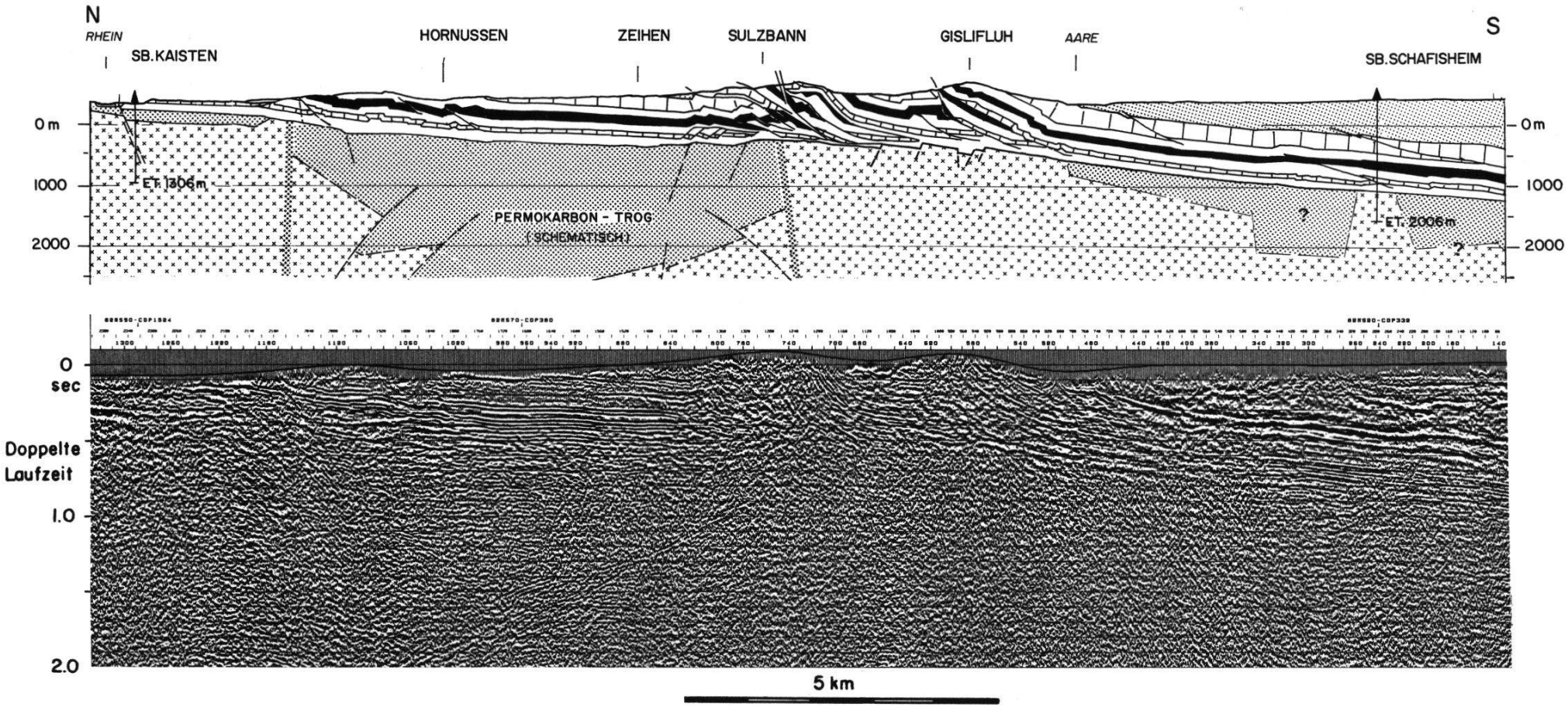
$$q = K \cdot i$$

wobei (vereinfacht):

q = Wasserfließrate pro Flächen- und Zeiteinheit ($m^3/m^2 \cdot s$)
K = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
i = Druckgradient (dp/dweg)

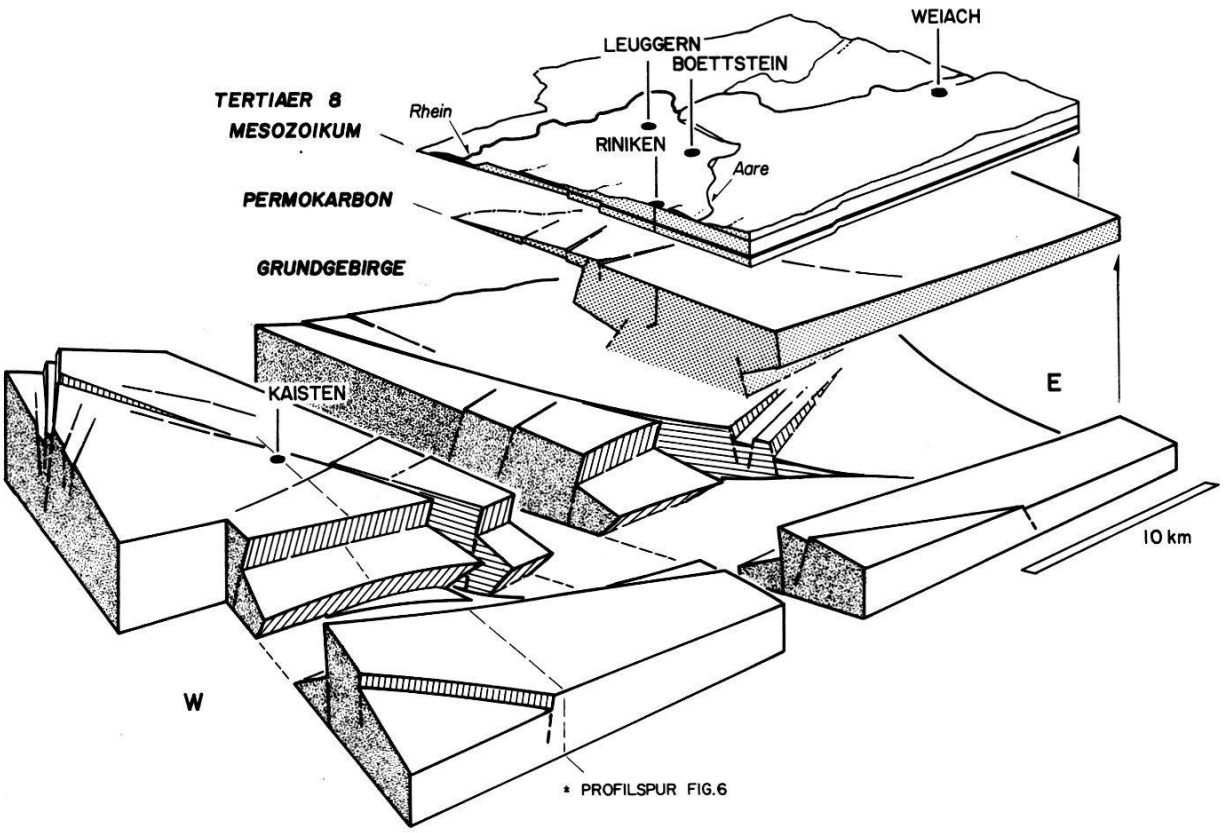
Es sei hier darauf hingewiesen, daß der Transport von im Wasser gelösten Stoffen nicht ausschließlich von der Filtergeschwindigkeit abhängt; er wird insbesondere verlangsamt von der kinematischen Porösität, der Sorptionskapazität des Gesteins und der möglichen Diffusion in die Gesteinsmatrix. Diese Retardationsphänomene für gelöste Stoffe sind auch bei der Altersbestimmung von Wässern (Verweilzeiten) im Gestein zu berücksichtigen.

Zur Modellierung der Grundwasserfließverhältnisse muß die *Darcy-Gleichung* und die Bedingung der Wasser-Bilanz für den ganzen Modellbereich erfüllt wer-



Figur 6: Geologische Interpretation der Seismiklinie 82-NF-10 Profil: Kaisten–Schafisheim

Die Figur zeigt, leicht vereinfacht, die Struktur des Kettenjuras, wie sie sich aus der Interpretation der Reflexionsseismik erkennen läßt. Der Kettenjura entstand durch Zusammenschub der mesozoischen und tertiären Sedimentdecke vor rund 10 Millionen Jahren. Die Faltung erfolgte über dem nur leicht deformierten, im wesentlichen während der Faltung passiven Grundgebirgssockel.
Im Sockel eingetieft befindet sich der Permokarbon-Trog, der schematisch bis zu einer Tiefe von 2500 m dargestellt ist. Aus dem Seismik-Profil ist im Troginnern eine flachliegende obere Schichtserie zu erkennen, die vermutlich dem oberen Perm angehört, wie es in Riniken erbohrt wurde (MÜLLER et al., 1984; *NTB 84–25)*. Tiefer liegende, steilstehende Reflexionen, die dem Ober-Karbon zugeordnet werden könnten, weisen auf Schichten hin, die an steilstehenden Blattverschiebungen tektonisch verstellt und z. T. überschoben wurden. Im Profil der Seismiklinie 82-NF-10 wird eine totale Trogtiefe von über 5 km vermutet (geologische Interpretation der Seismik nach H. P. LAUBSCHER).



Figur 7: Grundgebirgsoberfläche der Region Nordschweiz. Schematisches Blockdiagramm

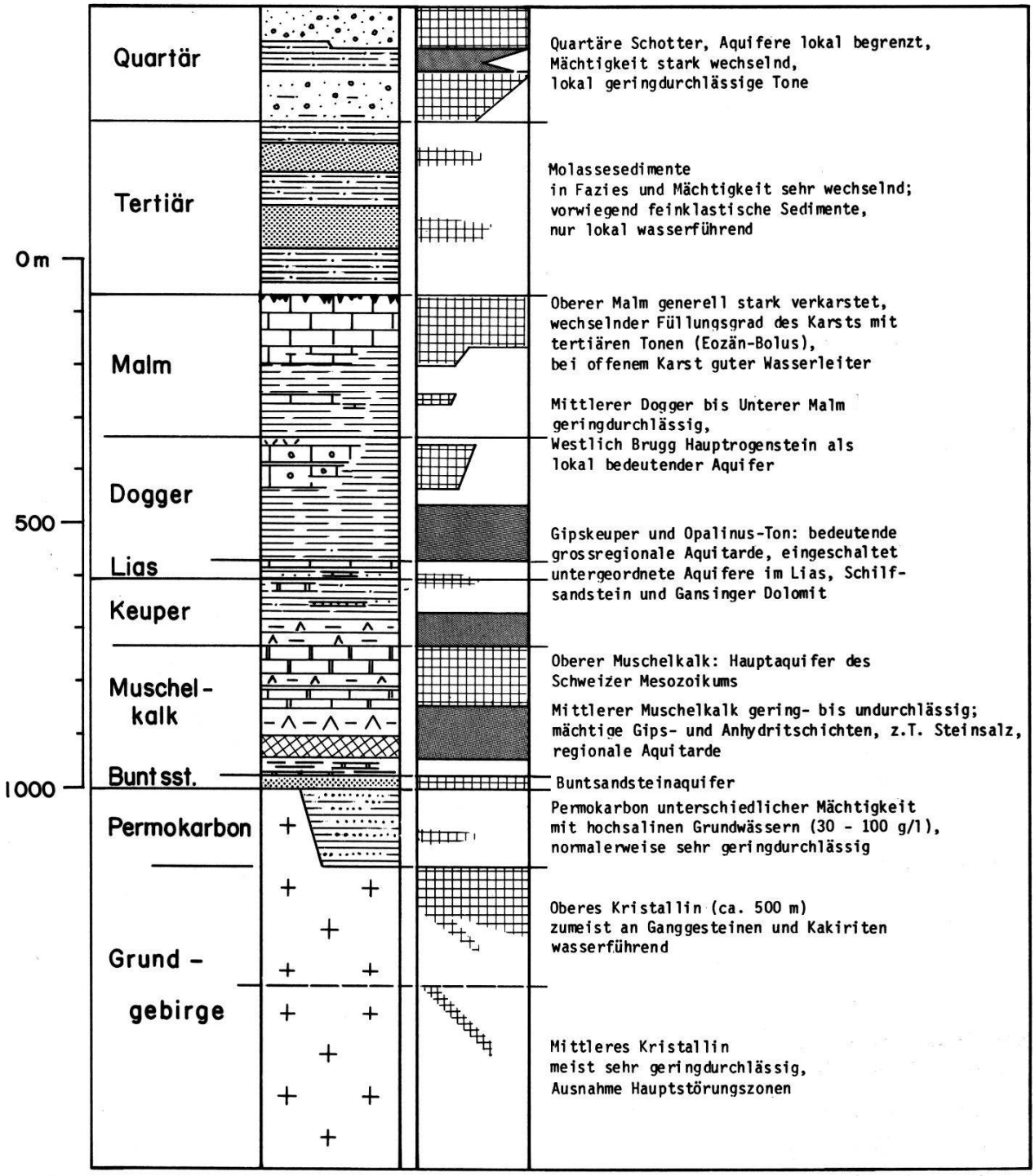
den. Die Berechnung einer unbekannten Größe, z. B. der Wasserfließrate (q), erfordert – als bekannt vorausgesetzte – Eingabedaten und auch Randbedingungen. Für ein heterogenes Gebiet, wie etwa dasjenige der Nordschweiz, muß die Region zur Modellierung in eine große Anzahl kleinerer Teilbereiche (Finite Elemente) unterteilt werden, für welche die Berechnungen durchgeführt werden. Dieses Vorgehen bedingt auch, daß gewisse Eingabedaten (siehe unten) über den ganzen dreidimensionalen Bereich des Modells definiert werden müssen.

Die von der Nagra verwendeten Modelle (KIRALY, 1985, s. *NTB 84-49,* KIMMEIER et al., 1985, s. *NTB 84-50)* benötigen die folgenden Eingabedaten:

- die Geometrie (Mächtigkeit und Struktur) aller betroffenen Aquifere und Aquitarde sowie
- deren Permeabilitäten (die Durchlässigkeitsbeiwerte K).
  Besonders problematisch gestaltet sich die hydraulische Erfassung von tektonischen Störungszonen bei Modellen. Dazu kommen
- die hydrologischen Randbedingungen der zu modellierenden Region. An den seitlichen (vertikalen) Grenzen des Modells muß insbesondere die Wasserbilanz (Zufluß–Abfluß) berücksichtigt werden. Als Randbedingungen an der Modelloberfläche müssen entweder die bekannten hydraulischen Druckhöhen oder aber konstante Infiltrations-/Exfiltrationsraten eingegeben werden.

3.2 Regionale und lokale hydrogeologische Eingabedaten

Figur 8 zeigt ein typisches geologisches und hydrogeologisches Profil der untersuchten Region. Es enthält die geologischen Formationen und eine Kennzeichnung der wichtigsten Aquifere und Aquitarden sowie deren Verbreitung in der Nordschweiz.



Figur 8: Aquifere und Aquitarden der Nordschweiz

Das kristalline Grundgebirge im Untersuchungsgebiet ist größtenteils von Sedimentgesteinen unterschiedlicher Mächtigkeiten überlagert. Die wichtigste Konsequenz der in der Nordschweiz vorhandenen sedimentären Überlagerung besteht darin, daß durch die horizontale Schichtung des Deckgebirges eine Wechsellagerung von Aquiferen und Aquitarden entsteht, so daß die Tiefengrundwässer sehr gut abgeschirmt sind und die oberflächennahen Fließsysteme kaum in die Tiefe reichen. So nehmen die Grundwasserfließverhältnisse in den tiefen Aquiferen einen regionalen Charakter an, wobei die In- und Exfiltrationsbereiche in den wichtigen topographischen Hoch- bzw. Tiefzonen liegen.

Um Grundwasserverhältnisse in einem geschichteten geologischen Medium darzustellen, bedarf es wegen der im allgemeinen recht großräumigen Fließsysteme der Untersuchung eines größeren Gebietes, in unserem Fall von den Alpen bis zum Schwarzwald.

Hydrogeologische «Einheiten» (Figur 8)

Das Grundwasserfließsystem der Nordschweiz, das im Untersuchungsgebiet das quartäre Alluvium, die Sedimentgesteine und das unterliegende Kristallin umfaßt, kann nur durch das Verständnis des Zusammenwirkens dieser drei Komponenten erfaßt werden.

Quartäre (Locker-)*Sedimente* bedecken große Teile der zentralen Nordschweiz. Durch die intensive Grundwassernutzung haben sich den ursprünglich ungestörten Grundwasserfließverhältnissen lokal sehr unterschiedliche Fließsysteme überlagert.

Die *Sedimentgesteine* unter den quartären Sedimenten reichen vom Tertiär (Obere Süßwassermolasse) bis hinab zur Permokarbon. Obgleich sie im allgemeinen weniger durchlässig sind als die des Quartärs, fungieren sie doch als wichtige Aquifere. So entspringen die meisten Thermal- und Mineralquellen der Nordschweiz diesen Sedimenten, von denen der Oberen Meeresmolasse, dem Oberen Malm, dem Hauptrogenstein (nicht vorhanden östlich der Aare), dem Oberen Muschelkalk und dem Buntsandstein eine besondere Rolle zukommen. Diesen Aquiferen zwischengelagert sind wenig durchlässige Barrieren, die Aquitarden aus Mergel, Dolomiten, Anhydriten und sogar Steinsalz (vor allem Gipskeuper und Anhydrite des Mittleren Muschelkalks).

Unterhalb der wasserführenden Sedimente liegt der *Kristallin-Aquifer,* der nördlich des Rheins in den Schwarzwald ausstreicht. Wie insbesondere in den bisherigen Sondierbohrungen der Nagra beobachtet werden konnte, weisen in den meisten Fällen die obersten paar hundert Meter des Kristallins eine ebenso hohe Konduktivität auf wie einige sedimentäre Aquifere (Tabellen 1 und 2). Das Grundwasser im Kristallin bewegt sich jedoch fast ausschließlich entlang tektonischer Störungszonen.

Tabelle 1: Zusammenfassung publizierter Konduktivitätswerte

Formation	Konduktivitätswert (m/s)	Datenquelle	Bemerkungen
Helvetische Kalke	$6 \cdot 10^{-5} - 1{,}6 \cdot 10^{-7}$	RECORDON (1979)	
Molasse	$< 10^{-5}$	PASQUIER (1977)	
		RYBACH et al. (1980)	Transmissivitäts-bereich $(0{,}5-10) \cdot 10^{-5}\ m^2/s$
Flysch	keine Daten		
Malm-Kalke	$10^{-3} - 10^{-4}$	KIRALY (1973)	
	10^{-2}	BERTRAND et al. (1973)	
	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-7}$	MATHEY et al. (1971)	
	$10^{-6} - 10^{-7}$	NEFF (1980)	
	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$	NEFF (1980)	Schätzung
	?	STRAYLE et al. (1983)	$(0{,}5-12) \cdot 10^{-3}\ m^2/s$ Transmissivitäts-bereich
Malm-Mergel	keine Daten		
Hauptrogenstein	$10^{-6} - 5 \cdot 10^{-8}$	NEFF (1980)	
	$10^{-4} - 10^{-6}$	NEFF (1980)	Schätzung
Dogger/Lias/ Keuper	$10^{-7} - 10^{-8}$	KIRALY (1973)	Schätzung
Hauptmuschel-kalk	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$	SCHMASSMANN (1970)	
	$10^{-4} - 6 \cdot 10^{-7}$	NEFF (1980)	Zurzach Z3, Mülligen BT2, Birmenstorf BT3, Schinznach Bad S2
	$5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-6}$	NEFF (1980)	Schätzung
Mittlerer und Unterer Muschelkalk	keine Daten		
Buntsandstein	keine Daten		
Permokarbon	keine Daten		
Kristallin	10^{-7}	LOUIS (1972)	
	$3 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}$	JAMIER (1975)	
	$5 \cdot 10^{-7}$	FONTES et al. (1979)	
	$5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7}$	RECORDON (1979)	
	$4 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-8}$	NEFF (1980)	Zurzach Z3

Tabelle 2: Übersicht der Konduktivitätswerte aus Messungen in Tiefbohrungen der Nagra (in m/s, vorläufige Werte)

Formation	Böttstein	Weiach	Riniken	Kaisten	Schafisheim	Leuggern
Oberer Malm		$1 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-7}$ (2)			—	
Unterer Malm/ Oberer Dogger		$10^{-12} - 10^{-11}$ (2)	—		—	
Unterer Dogger Lias/Keuper		$4 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-9}$ (Schilf) $2 \cdot 10^{-14} - 6 \cdot 10^{-13}$		$< 10^{-12} - 10^{-11}$ (7)	
Oberer Muschelkalk	$3 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	$7 \cdot 10^{-7}$		$3 \cdot 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-8}$ (2)	10^{-6}
Mittlerer Muschelkalk	—	10^{-11}	$< 10^{-12}$		$< 10^{-11}$	—
Buntsandstein	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-7}$ (2)	$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	10^{-9}	$2 \cdot 10^{-8}$
Permokarbon		$4 \cdot 10^{-12} - 2 \cdot 10^{-8}$ (8)	$5 \cdot 10^{-13} - 5 \cdot 10^{-8}$ (7)	$2 \cdot 10^{-5}$		
Kristallin	$10^{-13} - 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-9}$ (12)		$< 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-6}$ (48)	$< 10^{-12} - > 10^{-6}$ (20)	$10^{-13} - 10^{-6}$

| Formation nicht vorhanden
— nicht gemessen
(2) Anzahl Messungen
(Schilf): Schilfsandstein

Hydrogeologische Eigenschaften der Aquifere

Die hydraulische Konduktivität oder der Durchlässigkeitsbeiwert (K) ist durch folgende Gleichung definiert:

$$K = \frac{k \cdot \varrho \cdot g}{\mu}$$

wobei gilt:
- K: hydraulische Konduktivität (m/s)
- k: spezifische Permeabilität (Gesteinseigenschaft) (m^2)
- g: Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
- ϱ: Dichte des fließenden Mediums (kg/m^3)
- μ: dynamische Viskosität ($kg/m \cdot s$)

Änderungen der Salinität, der Temperatur und des Druckes bewirken auch Änderungen der Dichte und der Viskosität. Die meisten Konduktivitätsmessungen werden jedoch unter in-situ-Bedingungen durchgeführt und müssen deshalb bezüglich Dichte und Viskosität nicht korrigiert werden.

Einige Daten der hydraulischen Konduktivität (K-Werte) gewisser wasserführender Schichten (Tabelle 1) lagen schon vor Beginn der Nagra-Sondierbohrungen vor (Kimmeier et al., 1985, s. *NTB 84-50)*. Diese Daten reichten jedoch nicht aus, um die räumliche Verteilung der Konduktivitäten in den Hauptaquiferen des Untersuchungsgebietes zu erfassen.

Um die regionale Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes besser definieren zu können, wurde die Sedimentfolge im Rahmen des Nagra-Sondierprogramms durchgetestet. Eine zusammenfassende Aufstellung der interpretierten Durchlässigkeitsbeiwerte findet sich in Tabelle 2. Es zeigt sich, daß die Konduktivitäten der Aquifere, wie sie durch die Nagra-Sondierbohrungen ermittelt wurden, nicht wesentlich von den früher ermittelten Werten abweichen.

Die Aquitarden-Konduktivitäten in Tablle 2 illustrieren die extrem niedrigen Durchlässigkeiten derjenigen Schichten, welche die tieferen Aquifere zur Oberfläche hin abschirmen. Die für das Perm gegebenen Durchlässigkeiten scheinen darauf hinzuweisen, daß diese Einheit, wo vorhanden, als Aquitard zwischen dem aufliegenden (hangenden) Buntsandstein und dem darunterfolgenden Grundgebirge wirkt. Dieser Befund wird gestützt durch die hohe hydraulische Druckhöhe im Kristallin der Bohrung Rheinfelden–Engerfeld (Ryf, 1984), sowie die hohen Salinitäten im Perm der Sondierbohrung Weiach (Figur 9, Tabelle 5).

In der Sondierbohrung Riniken andererseits traten im Perm, bei einer Tiefe von 1006 m, hohe Spülungsverluste auf, die darauf hinweisen, daß die klastischen Permsedimente entlang von Störungen ziemlich durchlässig sein können.

Bisher veröffentlichte *K*-Werte für das kristalline Grundgebirge der Schweiz sind relativ selten und entstammen Tests in den nur obersten hundert Metern des Kristallins (Tabelle 1). So sind die detaillierten hydrologischen Profile sowie die langfristigen Probenahmen und Untersuchungen, die in den Nagra-Sondierbohrungen im Kristallin durchgeführt wurden, die Datengrundlage zur Konstruktion hydrologischer Modelle.

Befunde in den Nagra-Sondierbohrungen weisen auf den sehr heterogenen Charakter des Kristallins hin. Gut durchlässige Zonen (10^{-6} bis 10^{-7} m/s) wechseln mit solchen sehr niedriger Konduktivität (10^{-11} bis 10^{-12} m/s). Im allgemeinen verlaufen die durchlässigeren Bereiche entlang von Scherzonen und Ganggesteinen (NAGRA, 1985, s. *NTB 85-01)*. Die Ausdehnung dieser gut durchlässigen Zonen kann nicht an einem einzigen Bohrloch bestimmt werden; die Tatsache aber, daß solche Zonen seit Monaten oder, etwa bei den Thermalquellen in Zurzach, seit Jahren unverminderte Wassermengen liefern (NEFF, 1980) beweist, daß sie sich über zumindest Hunderte von Metern, wenn nicht Kilometern, erstrecken können.

Im einzelnen können diese Zonen nicht in Modelle aufgenommen werden; die Konduktivitäten müssen über größere Bereiche ermittelt werden. Eine Ausnahme bilden nur großräumige Störungszonen, welche als diskrete Elemente direkt im Modell berücksichtigt werden können.

Die hydraulischen Druckhöhen

Eine zusammenfassende Karte der verfügbaren Druckhöhen für die Sediment- und Kristallin-Aquifere der zentralen Nordschweiz zeigt Figur 9.

Die Daten der Druckhöhen im Untersuchungsgebiet stammen aus verschiedenen Quellen, unter anderem aus Drill-Stem-Tests (DST) in Bohrungen der Ölindustrie, aus Thermal- und Mineralwasserbrunnen sowie auch aus den Sondierbohrungen der Nagra.

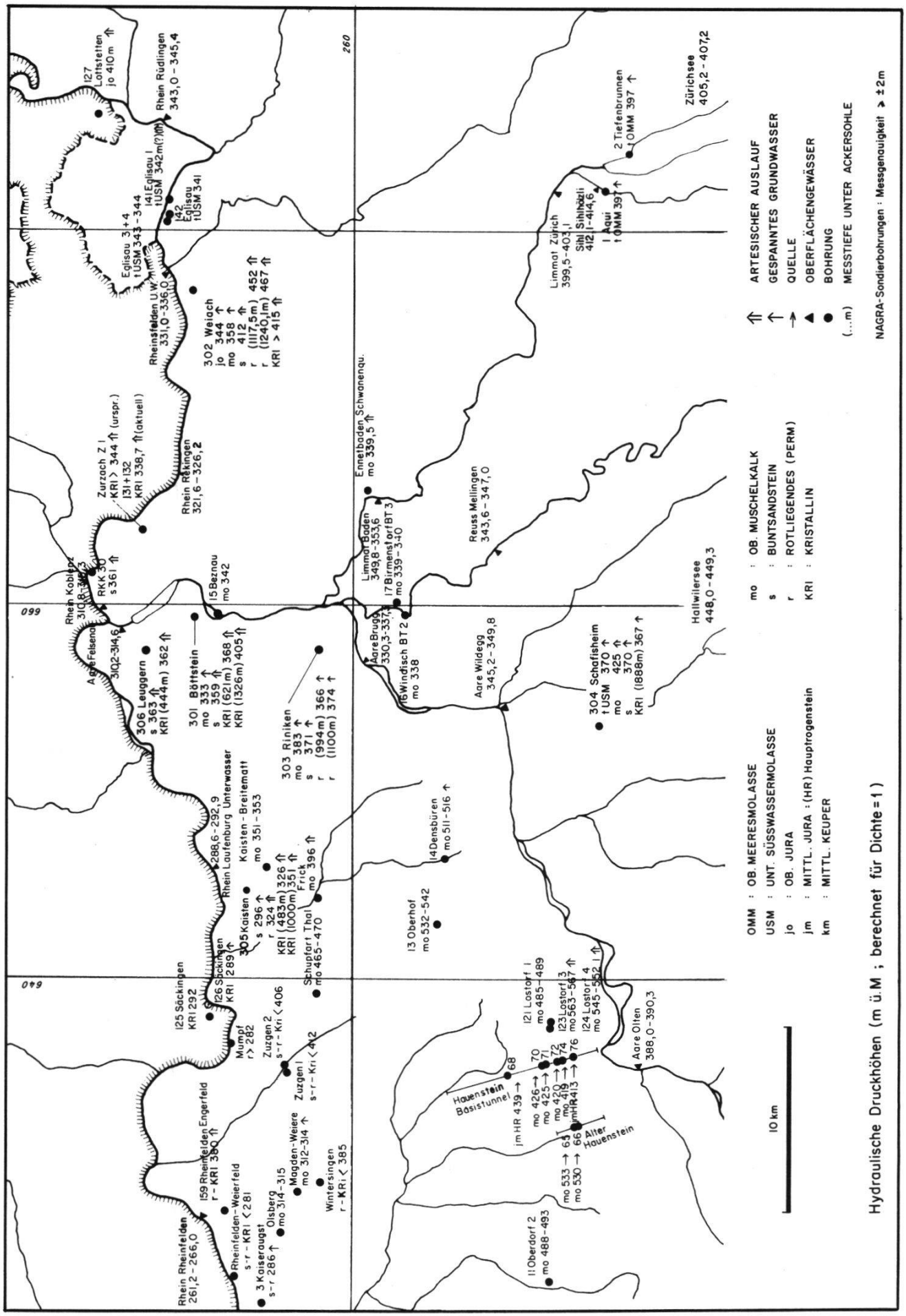
Eine Korrektur der gemessenen Drucke in bezug auf die Flüssigkeitsdichte wurde bei den in Figur 9 dargestellten hydraulischen Druckhöhen nicht vorgenommen. Sie beruhen auf einer Referenzdichte von 10^3 kg/m³. Es wurde nicht versucht, für diese Daten Isolinienkarten zu zeichnen, da die Datendichte noch zu gering ist.

Die Potentiale in den quartären Aquiferen entsprechen entlang den Haupt-Vorflutern normalerweise etwa den topografischen Höhen, können jedoch auch, je nach lokalem Fließsystem (JÄCKLI et al., 1972), um einige Meter differieren. Zusätzliche Angaben über Potentiale in den Karstaquiferen des Oberen Malms und Oberen Muschelkalks von Süddeutschland finden sich in VILLINGER (1977, 1982) und STRAYLE et al. (1983).

Grundwasserhaushalt

Die Datendichte für Niederschlagsmessungen in der modellierten Region ist hoch. Allerdings schwankt der Prozentsatz der ins Grundwasser infiltrierenden Niederschläge je nach Durchlässigkeit, Hangneigung, Vegetation und Regenintensität beträchtlich.

Außerdem entwässert ein erheblicher Anteil des infiltrierenden Niederschlags lokal und ist an regionalen Fließsystemen nicht beteiligt.



Figur 9: Verfügbare Daten beobachteter Druckhöhen für die Aquifere der Sedimente und des Kristallins

Entlang der größeren Flüsse der Nordschweiz ist eine Reihe von Pegelstationen verteilt (Figur 9), deren registrierte Abflußraten im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz publiziert werden. Aus der Differenz der Niedrigwasserabflußmengen benachbarter Pegelstationen kann ein ungefährer Wert der Grundwasserexfiltration in die Vorfluter für das Gebiet zwischen diesen Stationen ermittelt werden. Mag dieser Wert auch mit großen Unsicherheiten aus Meßfehlern und anthropogenen Einflüssen behaftet sein, so erlaubt er doch einen überschlagsmäßigen Vergleich mit den Grundwasserexfiltrationsraten, die durch ein hydrodynamisches Grundwassermodell errechnet werden.

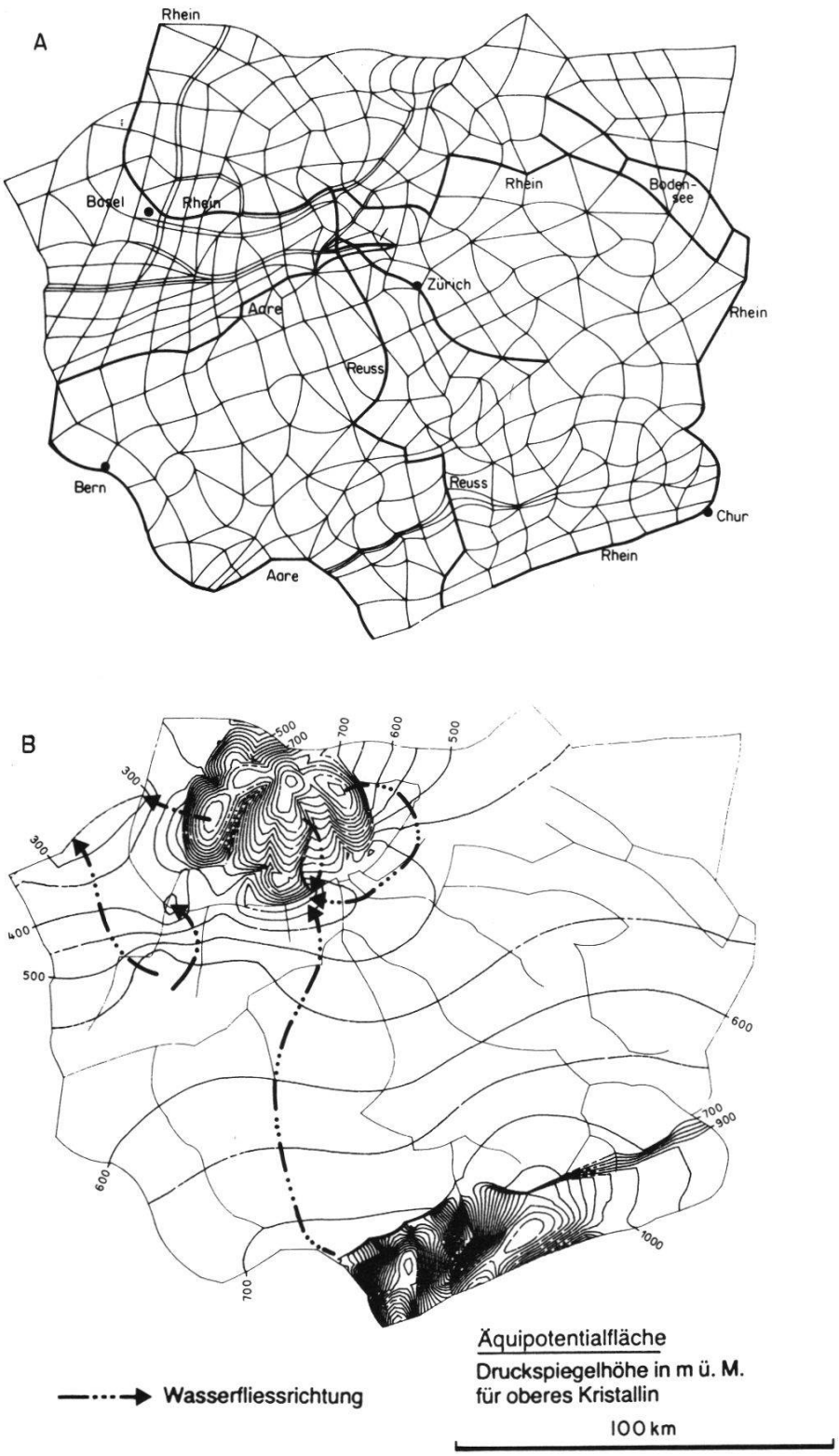
3.3 Die Modellierung der Grundwasserverhältnisse der Nordschweiz

Vorgehen

Um die voraussichtlichen Grundwasserfließverhältnisse im Untersuchungsgebiet der Nagra zu erfassen, hat das Centre d'Hydrogéologie der Universität Neuenburg im Auftrag der Nagra ein regionales und lokales hydrodynamisches Modell erstellt (KIRALY, 1985, s. *NTB 84-49,* KIMMEIER et al., 1985, s. *NTB 84–50).*

Bei der Aufstellung dieser hydrodynamischen Modelle wurde schrittweise vorgegangen:

1. Zunächst wurde das zu modellierende Gebiet so definiert, daß beim regionalen Modell die wichtigsten Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete eingeschlossen sind.
2. Das gewählte Gebiet war flächenhaft in eine genügende Anzahl dreidimensionaler Elemente so zu unterteilen (diskretisieren), daß die wichtigsten topographischen und geologischen Gegebenheiten erfaßt werden konnten. Die Elemente durften höchsten so groß sein, daß eine genügende Approximation des hydraulischen Potentials durch die Ansatzfunktionen noch gewährleistet war.
3. Der vertikale Bereich (Teufe) war gleicherweise genügend fein zu unterteilen, um hydrogeologische Unterschiede der stratigraphischen Einheiten berücksichtigen zu können.
4. Jedem Element waren Konduktivitäten (K-Werte) zuzuordnen. Die Elemente mußten so groß sein, daß eine statistisch homogene Konduktivitätsverteilung vorausgesetzt werden konnte. In hydrogeologisch wenig bekannten Gebieten mußte die Konduktivitätsverteilung inter- bzw. extrapoliert werden.
5. An den Randflächen bzw. Knotenpunkten des Modells waren Randbedingungen einzusetzen. Grundsätzlich hatte man für jeden Eingabepunkt die Wahl, entweder die Infiltrationsrate oder die hydraulische Druckhöhe als Eingabeparameter zu verwenden.
6. Nun erfolgte die eigentliche Computer-Simulation, bei der für jeden Knotenpunkt des Elementnetzes der fehlende Parameter (entweder Infiltrationsrate oder hydraulische Druckhöhe) berechnet wurde.



Figur 10: Regionales hydrodynamisches Modell

A) Netz der finiten Elemente an der Basis des oberen Kristallins (Horizontalschnitt)
B) Simulierte Äquipotentialfläche und Wasserfließrichtungen im oberen Kristallin

7. Die berechneten Werte für hydraulische Druckhöhen werden mit gemessenen Grundwasserspiegeln oder hydraulischen Druckhöhen verglichen (aus Quellen, Wasserfassungen, Druckmessungen in Tiefbohrungen).
8. Ebenso wird die berechnete Exfiltration mit Meßwerten von Flußmeßstationen und gemessenen Quellschüttungen verglichen.
9. Außerdem wird das rechnerisch ermittelte Fließsystem auf seine Übereinstimmung mit gemessenen geochemischen Daten aus dem Gebiet und mit Altersbestimmungen des Wassers überprüft. Das Alter des Wassers kann durch Isotopenmessungen bestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.4).
10. Wenn die in den Schritten 7, 8 und 9 angestellten Vergleiche unbefriedigend sind, wird die Modellrechnung entweder mit veränderten K-Werten oder angepaßten Randbedingungen wiederholt. Diese Iteration wird so lange betrieben, bis eine akzeptable Wirklichkeitsnähe des Modells erzielt wird.
11. Das Modell liefert zunächst die hydraulischen Druckhöhen in den Knotenpunkten. Daraus errechnen sich die hydraulischen Gradienten in den einzelnen Zellen und als Folge die Wasserfließwege.
12. Schließlich werden die Grundwasser-Fließraten entlang den Wasserfließwegen bestimmt.

Die hydrologische Modellierung der Nordschweiz wurde in zwei Stufen durchgeführt: Ein regionales Modell umfaßt die gesamten In- und Exfiltrationsgebiete des Kristallins innerhalb der Grenzen dieses Modells (Größenbereich: 200 km, Figur 10 A); das lokale Modell ermöglicht es, komplizierte Strukturen sowie stratigraphische und topographische Zusammenhänge in einem kleineren Gebiet genauer zu erfassen (Größenbereich: 40 km, Figur 11 A). Die äußeren Randbedingungen des lokalen Modells können aus dem regionalen Modell abgeleitet werden.

Das regionale und das lokale Modell werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

Das regionale hydrodynamische Modell (Figur 10)

Im regionalen hydrodynamischen Modell geht es darum, die Fließverhältnisse aller wichtigen Aquifere und Aquitarden von den In- bis zu den Exfiltrationsgebieten zu erfassen und die ermittelten Abflußraten wie auch die Fließrichtung abzubilden.

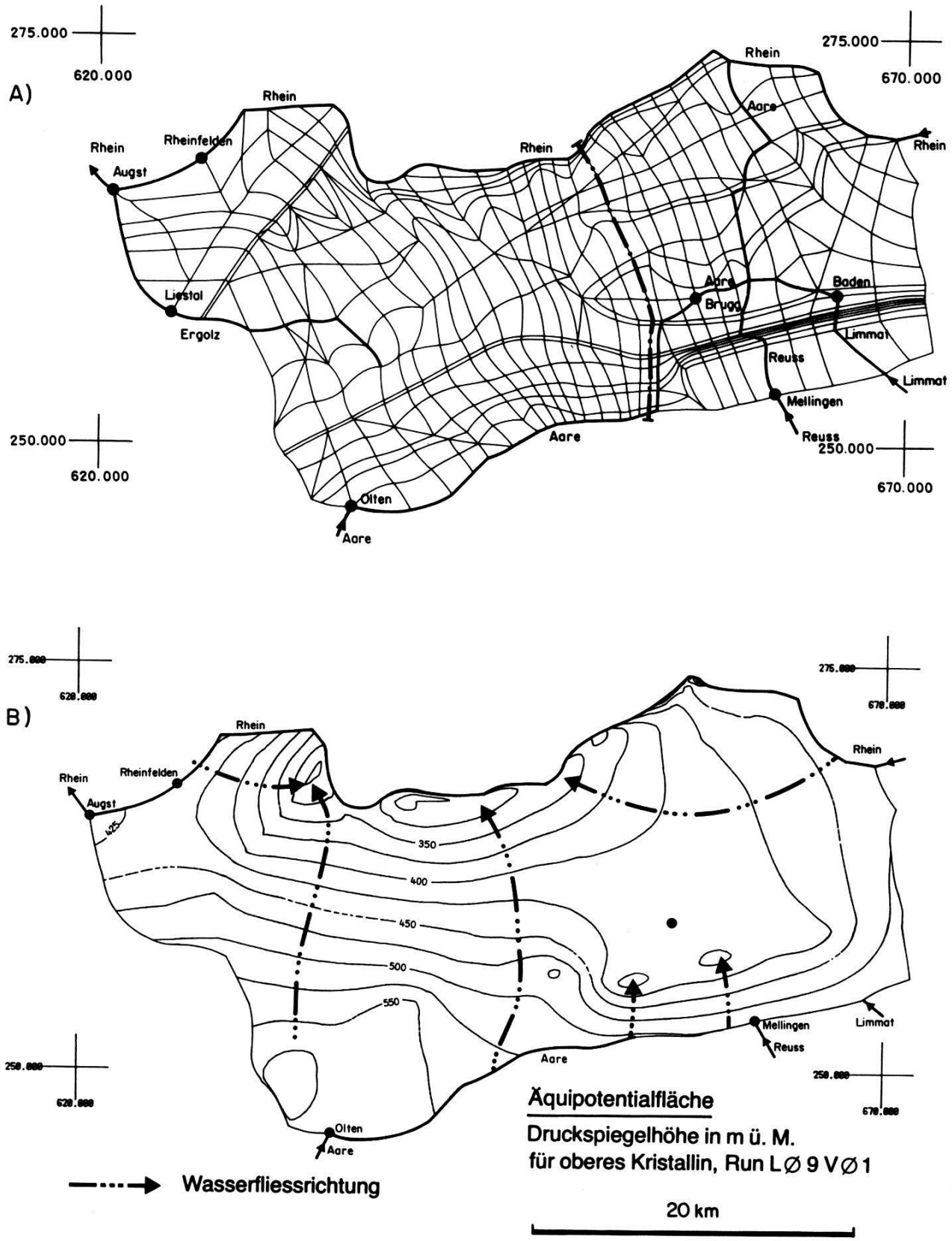
Diskretisierung des Lösungsraums:

- Das regionale Modell erstreckt sich vom Aarmassiv bis zum Schwarzwald und vom Berner Jura bis zum Bodensee (Figur 10 A). Die gewählte Diskretisierung dieser Fläche berücksichtigt die Oberflächentopographie, das Flußnetz, die geologischen Strukturen und stratigraphischen Ausstrichflächen.
- In der Vertikalen erstreckt sich das Modell von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 8000 m unter Meeresspiegel. Die vertikale Diskretisierung stützt sich in erster Linie auf lithostratigraphische Grenzen.

- Während die meisten Elemente dreidimensional sind, wurden sowohl die tektonischen Störungen im Juragebirge als auch die Aquifere des Hauptrogensteins, oberen Muschelkalks und Buntsandsteins mit Hilfe von zweidimensionalen Elementen modelliert. Für die Diskretisierung wurden 5631 Elemente und 14768 Knoten verwendet.
- Das kristalline Grundgebirge im regionalen Modell wurde in drei Zonen aufgeteilt: das obere Kristallin wird mit einer konstanten Mächtigkeit von 1000 m über die gesamte modellierte Fläche definiert, während mittleres und unteres Kristallin im Modell so gewählt wurden, daß ihnen jeweils die Hälfte der verbleibenden Mächtigkeit zwischen der Basis des oberen Kristallins und 8000 m unter Meeresspiegel zukommt.

Randbedingungen:

- Für alle äußeren Grenzen des Modells müssen Randbedingungen spezifiziert werden. Die nördliche Grenze ist im wesentlichen eine Wasserscheide und wird deshalb als Grenze betrachtet, durch welche kein Wasser fließt. Die Teile der Ost-, Süd- und Westgrenze, die direkt unter Rhein und Aare liegen, werden generell als «Symmetrie-Ränder» ohne lateralen Grundwasserfluß angenommen. Die Aare und der Rhein werden dort als regionale Großvorfluter für die tiefen Grundwassersysteme angesehen, mit ausschließlich vertikaler Fließrichtung direkt unter dem Fluß.
- An der Westgrenze unter dem Jura wird ein Grundwasserfluß parallel zur Modellgrenze gemäß der N–S-verlaufenden Fortsetzung der Strukturen des Rheintals unter dem Jura angenommen. An der NE-Grenze wird ebenfalls angenommen, daß kein lateraler Durchfluß herrscht. (Diese Annahmen wurden während einer Simulation probeweise aufgehoben, um ihre Relevanz zu testen. Zudem ist zu beachten, daß die seitlichen Ränder des regionalen Modells weit entfernt vom engeren Untersuchungsgebiet der Nagra gelegt wurden und daher wenig Einfluß auf die Resultate der Modellrechnungen für die zentrale Nordschweiz haben.)
- Außer den vertikalen Seitenbegrenzungen müssen auch der Oberfläche des Modells Werte für die Randbedingungen zugeordnet werden. Diesen Größen kann entweder ein konstantes Potential (z. B. Knote des Grundwasserspiegels) oder eine konstante Infiltrationsrate zugewiesen werden.
- An Elementgrenzen, die an größeren Flüssen liegen, wurden konstante Grundwasserspiegel eingegeben. Da eine gewisse Unsicherheit über die einzusetzenden Werte für die Potentiale und die Versickerungsraten besteht, wurden die verwendeten Oberflächen-Randbedingungen einer Sensitivitätsanalyse unterworfen.
- Im ganzen Datensatz, der für die Modellierung verwendet wurde, ist die horizontale und vertikale Durchlässigkeitsverteilung der einzelnen Elemente derjenige Eingabeparameter, welcher mit der größten Unsicherheit behaftet ist. Die Auswirkung dieser Unsicherheit kann man daran abschätzen, wie empfindlich das Grundwasserfließsystem (definiert durch die berechnete Fließrichtung und



Figur 11: Lokales hydrodynamisches Modell

A) Netz der finiten Elemente an der Basis des oberen Kristallins (Horizontalschnitt)
B) Simulierte Äquipotentialfläche und Wasserfließrichtungen im oberen Kristallin

-geschwindigkeit) auf eingegebene Durchlässigkeitsänderungen reagiert (KIMMEIER et al., 1985, s. *NTB 84-50)*. Es war daher zweckmäßig, zahlreiche Modellrechnungen mit verschiedenen Sätzen von hydraulischen Konduktivitäten durchzuführen.

Das lokale hydrodynamische Modell (Figur 11)

Ziel der lokalen Modellierung ist die genauere Ermittlung von Grundwasserströmungsverhältnissen, insbesondere von Wasserfließwegen in einem begrenzten Gebiet der Nordschweiz. Das lokale Modell erlaubt eine feinere Diskretisierung des zu untersuchenden Raumes, die es ermöglicht, zusätzliche Störungszonen mit hoher Durchlässigkeit als diskrete Elemente zu modellieren.

Das lokale Modell erstreckt sich vom Rhein im Norden bis zur Aare entlang des Jurasüdfußes im Süden, von der Ergolz im Westen bis ungefähr zum Ostrand der Lägeren im Osten (Figur 11 A). Die Form des Elementnetzes des Modells wird bestimmt durch geologische Strukturen, stratigraphische Aufschlüsse und die Topographie der Oberfläche und der Flüsse.

Vertikaler Bereich und vertikale Diskretisierung des lokalen Modells sind ähnlich denen des regionalen Modells. Der Hauptunterschied besteht darin, daß die zweidimensionalen Elemente des regionalen Modells durch dreidimensionale Elemente ersetzt wurden. Außerdem wurden dem oberen und mittleren Kristallin des lokalen Modells in Annäherung an die Befunde der Sondierbohrung Böttstein – abweichend vom Regional-Modell – konstante Mächtigkeiten von 500 und 1000 m zugeschrieben. Diese Unterschiede wurden ausgeglichen, indem die Konduktivität des oberen Kristallins so angepaßt wurde, daß die Transmissibilität des oberen Kristallins im lokalen und regionalen Modell gleich groß sind.

Für die Diskretisierung wurden 5974 Elemente und 20282 Knoten verwendet.

Die Randbedingungen entlang der seitlichen Begrenzung des lokalen Modells wurden aus den Ergebnissen des regionalen Modells abgeleitet. Die Randbedingungen entlang der Oberfläche des lokalen Modells sind denen des regionalen Modells analog und erlauben dank der verfeinerten Diskretisierung eine genauere Definition der kleineren Flußsysteme. Wie im regionalen Modell werden bei Flüssen konstante Potentiale, bei allen anderen Oberflächen dagegen entweder ein konstantes Potential, oder konstante Infiltrationen angenommen. Beide Typen von Oberflächen-Randbedingungen sind in KIMMEIER et al., 1985, s. *NTB 84-50* beschrieben.

Wie im regionalen Modell, so stellt auch im lokalen Modell die Verteilung der Konduktivität den unsichersten Eingabeparameter dar. Um deren Einfluß auf die berechneten Fließwege, Fließrichtungen und hydraulischen Gradienten bestimmen zu können, wurde eine Reihe von Konduktivitätshypothesen getestet, u. a.:

a) Modifizierung der Konduktivität der Hauptaquitarden (Unterer Malm, Unterer Dogger, Lias und Keuper sowie Mittlerer und Unterer Muschelkalk),
b) Modifizierung der Konduktivität entlang Störungszonen,
c) Einführung einer Anisotropie der Konduktivität im Grundgebirge.

Die Resultate dieser Modellvariationen werden im Nagra-Bericht von KIMMEIER et al., 1985, s. *NTB 84-50* ausführlich dargestellt.

Zur Validierung der Modelle können folgende Datengruppen benutzt werden:

1) beobachtete Druckhöhen in zusammenhängenden Aquiferen,
2) Abflußraten,
3) Infiltrationsraten oder beobachtete Grundwasser-Spiegelhöhen in den Oberflächenaquiferen,
4) hydrochemische und isotopenhydrologische Referenzdaten, z. B. Gesamtmineralisierung, Zusammensetzung, Verweilzeiten des Wassers, wie sie im folgenden Abschnitt noch ausführlicher dargelegt werden.

Die entwickelten Modellkonzepte der regionalen und lokalen Grundwasserfließsysteme lassen sich mit Hilfe der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Datenbasis noch nicht schlüssig validieren. Bei der starken räumlichen Variabilität und der geringen Dichte der zur Validierung verfügbaren Daten können verschiedene Sätze von Eingabedaten in die Modelle die hydrologischen und geochemischen Verhältnisse gleich gut erklären.

Resultate der Modellrechnungen

Das Vorgehen bestand darin, zunächst eine Reihe gezielter Simulationen durchzuführen, die ein Spektrum gemessener und/oder plausibler Eingabedaten und Randbedingungen berücksichtigen. Die sinnvolle Anwendung der Resultate dieser Simulationen kann sich dementsprechend nur auf Lösungen – und deren Variationsbreite – abstützen, die im Hinblick auf die spezifische Zielsetzung als konservativ bewertet wurden.

1) Ergebnisse der regionalen Modellierung

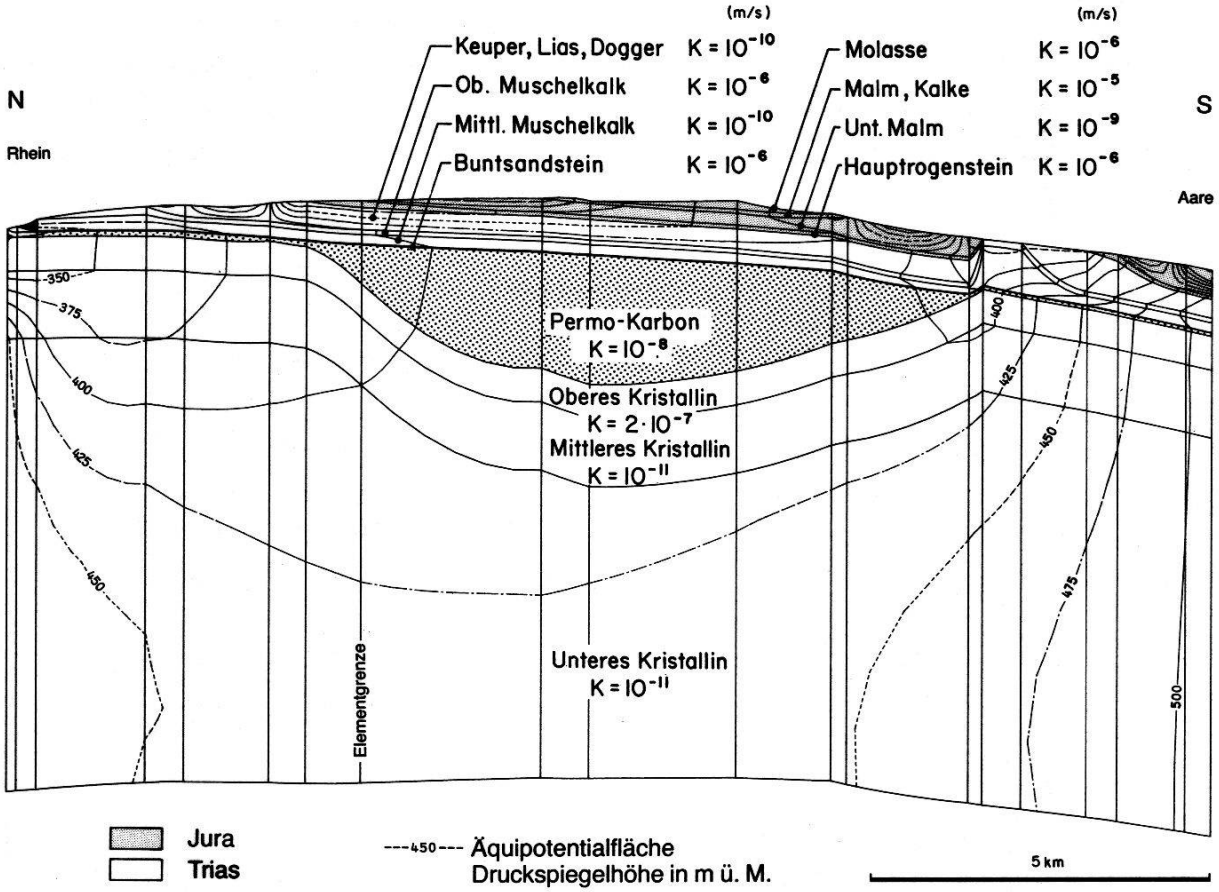
- Figur 10 B zeigt als Beispiel die modellierte Aequipotentialfläche des oberen Kristallins für eine mit den Beobachtungen gut übereinstimmende Variante.
- Aus Aequipotentialflächen lassen sich die Strömungsrichtungen in den Aquiferen ableiten.
- Diese Variante zeigt klar die Infiltrationsgebiete im Kristallin des Schwarzwaldes und des Aarmassivs mit dem Rhein als Vorfluter wie auch die laterale Exfiltration an der Grenze zum Rheintalgraben.
- In einem beträchtlichen Teil des Gebietes zwischen Schwarzwald und Aarmassiv kann auch Grundwasser aus dem Kristallin nach oben austreten. Der Ausfluß ist jedoch wegen der gewählten hydraulischen Konduktivitäten ($K = 10^{-10}$ m/s) in dieser Simulation sehr klein.

2) Ergebnisse der lokalen Modellierung

- Die simulierte Aequipotentialfläche des oberen Kristallins für eine mit den Beobachtungen gut übereinstimmende Variante ist als Beispiel in Figur

11 B gezeigt. Bei dieser Variante wurden niedrige Konduktivitäten für den Mittleren Muschelkalk (10^{-11} m/s), Dogger, Lias und Keuper (10^{-11} m/s) und den Unteren Malm (10^{-10} m/s) eingesetzt, sowie $2 \cdot 10^{-8}$ m/s für die Lägeren-Überschiebung. Aufgrund dieser Konduktivitäten wird im Modell das kristalline Fließsystem kaum von oberflächennahen lokalen Fließsystemen beeinflußt. Der Zufluß zum Kristallin kommt von den seitlichen Rändern, während der Abfluß in die Lockersedimente des Rheins hinein erfolgt.

- In Figur 12 sind die Äquipotentiallinien in einem vertikalen Schnitt vom Rhein bis zur Aare dargestellt. Aus den Aequipotentiallinien lassen sich in diesem Profil Strömungslinien ableiten.
- Die Figur 12 zeigt die Drainage des Oberen Muschelkalks zur Aare, dort wo der Muschelkalk durch die Lägeren-Überschiebung an die Oberfläche versetzt ist. Es gibt in diesem Punkt auch einen nach oben gerichteten Wasserfluß im Kristallin (vgl. Figur 11 B, geschlossene Aequipotentiallinien); der Volumenstrom ist wegen der niedrigen Konduktivitäten der Störungszone gering. Für die dargestellte Variante ergibt sich im Gebiet nördlich des Permokarbon-Troges ein aufwärtsgerichteter Fluß vom mittleren ins obere Kristallin.



Figur 12: N-S Profil (perspektivisch), aus dem lokalen hydrodynamischen Modell errechnete Äquipotentialflächen im Querschnitt (alle Konduktivitäten in m/s)

3.4 Hydrochemie der Tiefengrundwässer

Im erdwissenschaftlichen Untersuchungsprogramm der Nagra leitet sich die Bedeutung der Hydrochemie der Tiefengrundwässer aus folgenden Aspekten ab:

- Die im Untergrund einzulagernden (radioaktiven) Abfälle werden von mehreren technischen Barrieren umschlossen (Glas, Stahl, Bentonit), die dem Grundwasser ausgesetzt sein werden. Die Kenntnis der chemischen Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und den darin gelösten Stoffen einerseits und den Barrierematerialien andererseits ist von Wichtigkeit für die Beurteilung der Wirkungsdauer solcher Barrieren (z. B. Korrosion von Stahlbehältern).
- Die Löslichkeit der eigentlichen Abfallstoffe im Grundwasser ist von dessen Beschaffenheit abhängig.
- Die einzelnen Parameter der Wasserbeschaffenheit und ihre Wechselbeziehungen geben Beweise oder Hinweise auf die Herkunft, die Entwicklung (Evolution, Genese) und die Verweilzeit eines Tiefengrundwassers. Aus dessen Beschaffenheit können Schlüsse auf hydraulische Verbindungen zwischen verschiedenen Aquiferen oder auf das Fehlen solcher Verbindungen gezogen werden. Sodann lassen sich räumliche und zeitliche Daten der Grundwasserzirkulation ableiten, welche wichtige Bausteine der regionalen hydrogeologischen Synthese sind und zusammen mit anderen Daten eine Validierung der hydrodynamischen Modelle gestatten.

Im Jahre 1981 begann die Nagra mit regionalen Untersuchungen über die Beschaffenheit der Tiefengrundwässer, die den bisher hauptsächlich auf Analysen von Mineral- und Thermalwässern beruhenden Kenntnisstand bedeutend erweitert haben.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich auf den Molassetrog zwischen Solothurn und Bodensee, den nordöstlichen Falten- und Tafeljura, den Südschwarzwald und den südlichen Oberrheingraben.

Die Resultate dieser Arbeiten sind von allgemeinem Interesse für die Region Nordschweiz und wurden in SCHMASSMANN et al., 1984, s. *NTB 84-21* publiziert.

Untersuchte Parameter

An Wasserproben aus Grundwasserfassungen, Quellen und Thermen des Untersuchungsgebietes und den aus den Nagra-Sondierbohrungen entnommenen Wasserproben (KUSSMAUL et al., 1985, s. *NTB 85-04)* wurden folgende Parameter untersucht:

- Physikalische Eigenschaften des Wassers:
  z. B. Temperatur, Dichte, etc.
- Summenparameter (elektrische Leitfähigkeit, Gesamtmineralisierung etc.)
- Ionenkonzentrationen: Untersuchung auf Kationen und Anionen
- Undissoziiert gelöste Stoffe

- Organische Verbindungen (z. T.)
- Gelöste Gase
- Freie (nicht gelöste) Gase (z. T.)
- Mikroorganismen
- Isotopische Zusammensetzung des Wassers und seiner Inhaltsstoffe.

Mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung wurde das rund 25000 Einzeldaten umfassende Material übersichtlich tabelliert, Plausibilitätskontrollen unterzogen, graphisch dargestellt und auf statistische Beziehungen untersucht (SCHMASSMANN et al., 1984, s. *NTB 84-21)*.

Interpretation und Resultate

In jeder der in der Nordschweiz und den angrenzenden Gebieten vorkommenden Aquifer-Formation kann es chemisch verschiedene Arten von Wasser geben. Damit können unter anderem hydraulische Verbindungen zwischen Aquiferen verschiedener Formationen erkennbar werden.

Für die Unterscheidung eignen sich folgende Arten des Vorgehens:

- Hauptbestandteile erlauben eine erste Zuordnung zu bestimmten Wassertypen.
- Aequivalent- oder Mengenverhältnisse von Wasserinhaltsstoffen oder Korrelationen zwischen zwei solchen Haupt- oder Nebenbestandteilen sind vielfach für eine signifikante Unterscheidung geeignet.
- Statistische Verfahren gestatten eine Aufgliederung der großen Zahl von Wasseranalysen in möglichst homogene Klassen (Clusters), die genetische Zusammenhänge oder Unterschiede reflektieren.

In den folgenden zusammenfassenden Abschnitten wird zur Hauptsache auf eigentliche Tiefengrundwässer eingegangen, die nur sehr langsam – in geologischen Zeiträumen – am Wasserkreislauf teilnehmen.

Grundwässer in Aquiferen des Tertiär- und des Jura-Systems (Tabelle 3)

Im *Molassetrog* enthalten die tertiären Sedimente und die unter ihnen liegenden Kalke des Malms (Ober-Jura) schon in Tiefen von wenigen hundert Metern Wasser, deren chemische und isotopische Beschaffenheit sich signifikant von derjenigen der oberflächennahen Wässer unterscheidet (LEMCKE & TUNN, 1956).

In der Oberen Meeresmolasse sowie im Malm ist die weite Verbreitung von Natrium-Hydrogencarbonat-Wässern nachgewiesen. Zu diesem chemischen Typ gehört auch ein unter den tertiären Ablagerungen des Oberrheingrabens im Hauptrogenstein (Dogger) erbohrtes Wasser, ferner außerhalb der zusammenhängenden Molassegebiete ein aus dem Lias (Unterer Jura) im Weißensteintunnel austretendes Wasser. Der durch Ionenaustausch-Prozesse entstandene Chemismus dieser Wässer setzt gewöhnlich lange Verweilzeiten voraus, worauf auch Anreicherungen von Helium hinweisen. Im Molassetrog hat ein Teil der Wässer

zudem sehr niedrige Deuterium- und Sauerstoff-18-Werte, die unter den gegebenen hydrogeologischen Randbedingungen auf eine kaltzeitliche Infiltration des Wassers während des Pleistozäns (Eiszeitalter) schließen lassen.

Natrium-Chlorid-Wässer, die im Molassetrog ebenfalls in den tertiären Sedimenten und im darunter liegenden Malm vorkommen, enthalten zumindest Anteile, die noch älter als die Natrium-Hydrogencarbonat-Wässer sind. Sie unterscheiden sich durch besondere chemische Merkmale von den salinen Wässern anderer Formationen. Gemeinsam sind ihnen zum Beispiel Iodid-Konzentrationen, wie es sie in keinen anderen Wässern des Untersuchungsgebietes gibt und die in Weiach und Schafisheim 8–10 mg/l erreichten.

Tabelle 3: Tiefengrundwässer aus Aquiferen des Tertiär- und des Jura-Systems

Ort	Aquifer	mval/l	g/l	Wassertyp
Schönenbuch	Untere Süßwassermolasse	8	0,6	**Mg**—Ca—**HCO_3**
Bellingen Steinenstadt	Hauptrogenstein	53–74	3,3–4,7	**Na**—Ca—**Cl**—HCO_3 bis **Na**—**Cl**
Konstanz, Mainau, Zürich-Aqui Lottstetten, Singen Neuwiller Weissensteintunnel	Obere Meeresmolasse Malm Hauptrogenstein Lias	8–20	0,6–1,5	**Na**—**HCO_3** bis **Na**—HCO_3—SO_4—Cl
Zürich-Tiefenbrunnen Eglisau	Obere Meeresmolasse Untere Süßwassermolasse	37–67	2,4–4,1	**Na**—**Cl**—SO_4 bis **Na**—**Cl**
Schafisheim Weiach	Untere Süßwassermolasse Malm	115–150	8,8–8,9	**Na**—**Cl**
Meerwasser zum Vergleich S = 35‰. ρ = 1,025 g/cm^3		620	36,0	**Na**—**Cl**

Erläuterungen zu den Tabellen 3–6:
Die in den Tabellen 3 bis 6 enthaltenen Äquivalentkonzentrationen (Summe Kationen in mval/l) und Massenkonzentrationen (Summe aller gelösten Feststoffe in g/l), sind die minimalen und die maximalen Durchschnittswerte der angegebenen Orte oder Tiefenbereiche (in Nagra-Sondierbohrungen). Die Wassertypen sind mit den Ionen bezeichnet, deren Äquivalentkonzentration mindestens 20 % der gesamten Kationen- oder Anionen-Konzentration beträgt. Ionen mit mindestens 50 %-Anteil sind **fett** gedruckt.

Im Vergleich zu anderen Natrium-Chlorid-Wässern haben sie unter anderem auch höhere Bromid/Chlorid- und niedrigere Lithium/Natrium-Verhältnisse. Nach der chemischen und isotopischen Beschaffenheit handelt es sich wahrscheinlich um Mischungen von marinem oder brackischem Wasser der Tertiär-Periode (Formationswasser) mit einem durch die Versickerung von Niederschlägen entstandenen und durch Austauschprozesse veränderten Wasser, welches zum Typ des kaltzeitlich infiltrierten Natrium-Hydrogencarbonat-Wassers gehört. Offenbar ist eine durch Mischvorgänge eingeleitete Verdrängung des älteren, teritären Formationswassers durch das seit dem Pleistozän infiltrierte jüngere Wasser im Gange.

Die weiträumige Verbreitung der tertiären, zum Teil in den Malm eingedrungenen Natrium-Chlorid-Wässer ist durch Bohrungen belegt (LEMCKE & TUNN, 1956).

Hydraulische Barrieren zwischen den Aquiferen des Jura-Systems und des Oberen Muschelkalks

Zwischen den Aquiferen des Jura-Systems (Malmkalke, im Westen auch Hauptrogenstein) und dem Aquifer des Oberen Muschelkalks finden sich mächtige Formationen, die vorwiegend eine für Wasser nur geringe Durchlässigkeit haben. Bezeichnend sind unter anderem der Opalinus-Ton sowie der gips- und vor allem der anhydritenführende Gipskeuper (Figur 8).

In durchlässigeren Teilen dieser Schichtenfolge können wenig tief gehende, lokale Fließsysteme bestehen, deren als Quellen austretende Wässer Verweilzeiten von weniger als 30 Jahren haben. Dazu gehören Calcium-Sulfat-Wässer, die in durch Lösungsvorgänge durchlässig gewordenem Gipskeuper entstehen und zum Teil als Mineralwässer genutzt werden.

Alle bisher ermittelten hydrogeologischen Daten lassen darauf schließen, daß diese Schichtenfolge zwischen Hauptaquiferen des Jura-Systems und dem Oberen Muschelkalk als Ganzes eine hydraulische Barriere bildet. Dementsprechend ergeben sich aus der Beschaffenheit der in den Tertiär- und Malm-Aquiferen des Molassetrogs vorkommenden Tiefengrundwässer keinerlei Verdachtsmomente, daß diese Formationen Wässer aus tieferen, geologisch älteren Aquiferen, zufließen würden oder einmal zugeflossen wären.

Grundwässer im Oberen Muschelkalk

Die Kalke und Dolomite des Oberen Muschelkalks sind im Felsuntergrund der Nordschweiz die bedeutendsten Aquifere. Die als Quellen austretenden oder mit Bohrungen erschlossenen Calcium-Magnesium-Sulfat-Hydrogencarbonat-Wässer sind für die oberflächennahen, lokalen Fließsysteme bezeichnend (Tabelle 4).

Diesem Wassertyp mit verhältnismäßig niedrigen Konzentrationen an gelösten Bestandteilen gehören auch noch einige Wässer an, die im Falten- und im Tafeljura in größeren Tiefen erbohrt sind und längere Verweilzeiten haben. So ergibt sich aus dem Argon-39-Gehalt des in die Bohrung Lostorf 3 bei rund 575 m zufließenden Wassers eine mittlere Verweilzeit von etwa 250 Jahren.

Deutliche Exfiltrationen von Tiefengrundwasser aus dem Aquifer des Oberen Muschelkalks manifestieren sich längs des *Südfußes des Faltenjuras*. An verschiedenen Orten weisen chemische Indizien darauf hin, daß die aufsteigenden, tiefen Muschelkalkwässer lokalen Fließsystemen oberflächennaher Wässer beigemischt werden (NEFF, 1980).

Eine von anderen Muschelkalkwässern deutlich abweichende Beschaffenheit hat das Thermalwasser von Baden. Seine chemische und isotopische Beschaffenheit kommt der Mischung eines typischen Muschelkalkwassers (Lostorf 4) mit einem in der Bohrung Riniken angetroffenen Buntsandstein-Perm-Wasser, sehr nahe. Insbesondere wenn noch Kohlendioxid zugegeben wird, das entweder aus größeren Tiefen aufsteigen oder aus den – verschiedenenorts in Muschelkalkwässern nachgewiesenen – Kohlenwasserstoffen entstehen kann. Die sich auf die neuesten Untersuchungsergebnisse stützenden Studien legen nahe, daß ein aus untertriasischen und permischen, eventuell karbonischen Ablagerungen stammendes salines Wasser mitsamt dem Kohlendioxid aus dem die Lägerenantiklinale bedingenden Sockelsprung aufsteigt und sich mit dem eigentlichen Muschelkalkwasser vermischt. In geringerem Maße ist ein solcher Einfluß auch im Wasser von Schinznach Bad zu vermuten. Die Tritium-Konzentrationen zeigen schließlich, daß den Tiefengrundwässern in Baden zusätzlich etwas junges Grundwasser des Muschelkalk-Typs beigemischt ist.

Die Sondierbohrung Weiach hat im Oberen Muschelkalk ein Grundwasser angetroffen, das zum gleichen chemischen Typ wie das Wasser der Bohrung Lostorf 4 gehört. Zu beiden Seiten des Abschnitts Schinznach–Baden enthält also der Obere Muschelkalk dieselbe Art von Grundwässer. Daraus, daß auch in den Wässern von Schinznach und Baden Anteile dieses Wassertyps anzunehmen sind, ergibt sich eine weiträumige Verbreitung längs des Nordrandes des Molassetrogs.

Die Sondierbohrung Schafisheim zeigte jedoch, daß im tiefliegenden Muschelkalk des Molassetroges noch ein anderer Wassertyp vorkommt, der bereits bisher durch das Wasser der Bohrung Lostorf 1 angedeutet war. In Schafisheim hat dieses als Ionen vorwiegend Natrium und Chlorid enthaltende Wasser eine sehr hohe Methan-Konzentration von 143 mg/l, außerdem 14 mg/l Ethan sowie eine kausal auf diese Kohlenwasserstoffe zurückzuführende extrem hohe Schwefelwasserstoff-Konzentration von 780 mg/l.

Das im *Tafeljura* über dem Permokarbon-Trog in der Sondierbohrung Riniken erbohrte Muschelkalk-Wasser hat eine ähnliche Ionen-Zusammensetzung wie das Wasser von Schafisheim, aber nur sehr niedrige Konzentrationen an Schwefelwasserstoff und Methan. Schwefelwasserstoff-Konzentrationen von mindestens etwa 1 mg/l (Baden) bleiben für die Wässer im tiefliegenden Muschelkalk des Molassetroges (Schafisheim, Weiach) und für die Austrittszone am Jurasüdfuß (Lostorf 1, Lostorf 4, Schinznach Bad, Baden) bezeichnend.

Im Aargauer Tafeljura nördlich des Permokarbon-Troges haben die Bohrungen Beznau und Böttstein im Oberen Muschelkalk Natrium-Calcium-Sulfat-Chlorid-Wässer angetroffen, die verhältnismäßig hohe Konzentrationen an gelösten Bestandteilen aufweisen. Nach den Deuterium- und Sauerstoff-18-Werten

sind diese Wässer wahrscheinlich ähnlich wie die Natrium-Hydrogencarbonat-Wässer des Molassetrogs während einer pleistozänen Kaltzeit versickert, womit das Kohlenstoff-14-Alter von mehr als 15000 Jahren in Einklang steht. Dies weist darauf hin, daß die Muschelkalk-Wässer in diesem Gebiet viel längere Verweilzeiten als an anderen Orten (z. B. Lostorf 3, Lostorf 4, Weiach) haben.

Tabelle 4: Tiefengrundwässer aus Aquiferen des Keupers und des Muschelkalks (Erläuterungen vgl. Tabelle 3)

Ort	Aquifer	mval/l	g/l	Wassertyp
Riniken	Oberer Mittelkeuper	234	15,5	**Na**–**SO_4**–Cl
Frenkendorf Densbüren Lostorf (Bohrung 3)	Oberer Muschelkalk	10–12	0,8–0,9	**Ca**–Mg–**SO_4**–HCO_3
Leuggern	Oberer Muschelkalk	17	1,2	**Ca**–Na–**SO_4**–HCO_3
Krozingen Freiburg	Oberer Muschelkalk	61–66	4,4–4,7	**Ca**–Na–**SO_4**–HCO_3
Lostorf (Bohrung 4) Weiach	Oberer Muschelkalk	37–48	2,4–3,3	**Ca**–Mg–**SO_4**
Lostorf (Bohrung 1)	Oberer Muschelkalk[1)]	59	3,8	**Na**–**Cl**
Schinznach Bad (Bohrung S2)	Oberer Muschelkalk[2)]	42	2,8	**Ca**–Na–**SO_4**–Cl
Baden/Ennetbaden	Oberer Muschelkalk[3)]	68	4,5	Na–Ca–Cl–SO_4
Böttstein, Beznau	Oberer Muschelkalk	98–101	6,4–6,6	Na–Ca–**SO_4**–Cl
Riniken Schafisheim	Oberer Muschelkalk	237–251	14,5–15,3	**Na**–**Cl**–SO_4

[1)] Aufstieg aus dem Oberen Muschelkalk in Sackungsmasse, Analyse der Probe mit geringster Verdünnung.
[2)] Tiefengrundwasser mit Beimischung von jüngerem, oberflächennahem Wasser.
[3)] Aufstieg aus dem Oberen Muschelkalk in Keuper und Quartär, geringe Beimischung von jüngerem Wasser.

Die Barriere des Mittleren Muschelkalks

Wie über dem Oberen Muschelkalk, liegt auch unter ihm regional eine Folge von Formationen, die eine nur geringe Durchlässigkeit haben oder von Wasser überhaupt nicht durchströmt werden. Sie besteht aus den Sulfat- und Salzzonen des Mittleren Muschelkalks und dem tonig-mergeligen Unteren Muschelkalk. In Oberflächennähe kann der Mittlere Muschelkalk wie der Gipskeuper durch Lösungsvorgänge durchlässig werden und dann in lokalen Fließsystemen Calcium-Sulfat-Wässer führen. Sonst sprechen alle hydrogeologischen Daten dafür, daß die Schichtenfolge zwischen Oberem Muschelkalk und Buntsandstein eine hydraulische Barriere bildet, die aber an einzelnen tektonischen Störungen unterbrochen sein kann.

Grundwässer im Buntsandstein und im Perm

Die Buntsandstein- und die Perm-Wässer haben typische chemische Eigenschaften, die sie von anderen Tiefengrundwässern unterscheiden. Zum Beispiel haben sie meistens kleinere Fluor-Erdalkalien-Verhältnisse als Wässer im Oberen Muschelkalk, dem wichtigsten hangenden Aquifer, oder solche im Kristallin. Durch Kohlendioxid, welches an tektonischen Störungen aufsteigt, erhält das eine der in Grenzach erbohrten Wässer – mit Hydrogencarbonat als überwiegendem Anion – seinen abweichenden chemischen Charakter (Tabelle 5).

Tabelle 5: Tiefengrundwässer aus Aquiferen des Buntsandsteins und Perms

Ort	Aquifer	mval/l	g/l	Wassertyp
Grenzach (Geigy)	Buntsandstein	25	1,8	**Na**—CA—**HCO_3**—SO_4
Grenzach (Brunnen 1) Kaisten	Buntsandstein	101–107	6,8	**Na**—Ca—**SO_4**—Cl bis **Na**—Ca—**Cl**—SO_4
Kaiseraugst Weiach	Buntsandstein-Perm Buntsandstein	194–220	12,9–14,7	**Na**—**SO_4**—Cl
Leuggern	Buntsandstein	29	1,9	**Na**—**Cl**—SO_4
Riniken Schafisheim	Buntsandstein-Perm Buntsandstein-Kristallin	163–241	10,4–16,0	**Na**—**Cl**—SO_4
Riniken, 958–1010 m (2 Tiefenbereiche)	Perm	295–387	17,9–23,4	**Na**—**Cl**
Weiach, 1109–1455 m (2 Tiefenbereiche)	Perm	619–1693	37,4–97,7	**Na**—**Cl** bis **Na**—**Cl**—Ca

Wo permische Ablagerungen fehlen, ist der Buntsandstein der tiefste Sediment-Aquifer. Unter diesen in den Sondierbohrungen Leuggern, Böttstein und Schafisheim angetroffenen Bedingungen enthält er Wässer mit Gesamtionenkonzentrationen, die zwar unterschiedlich hoch, aber an allen bisher untersuchten Orten höher als in den Wässern des direkt darunter folgenden Kristallins sind. Die höhere Konzentration des Buntsandsteinwassers gilt auch für die Sondierbohrung Kaisten, wo das Perm Wasser enthält, das aus dem Kristallin aufsteigt und eine geringere Gesamtionenkonzentration als das Buntsandsteinwasser hat.

Dort, wo unter dem Buntsandstein mächtige permische oder permokarbonische Ablagerungen folgen, wie es in den Bohrungen Kaiseraugst, Riniken und Weiach der Fall ist, sind die beiden Formationen als ein einziger Aquifer oder eher als eine Gruppe von mehreren Aquiferen zu betrachten, in welcher in Riniken und Weiach die Gesamtionenkonzentration nach der Tiefe zunimmt. Darüber, welche Beschaffenheit unter den permokarbonischen Sedimenten ein tieferes Kristallin-Wasser hat, bestehen noch keine genügenden Informationen.

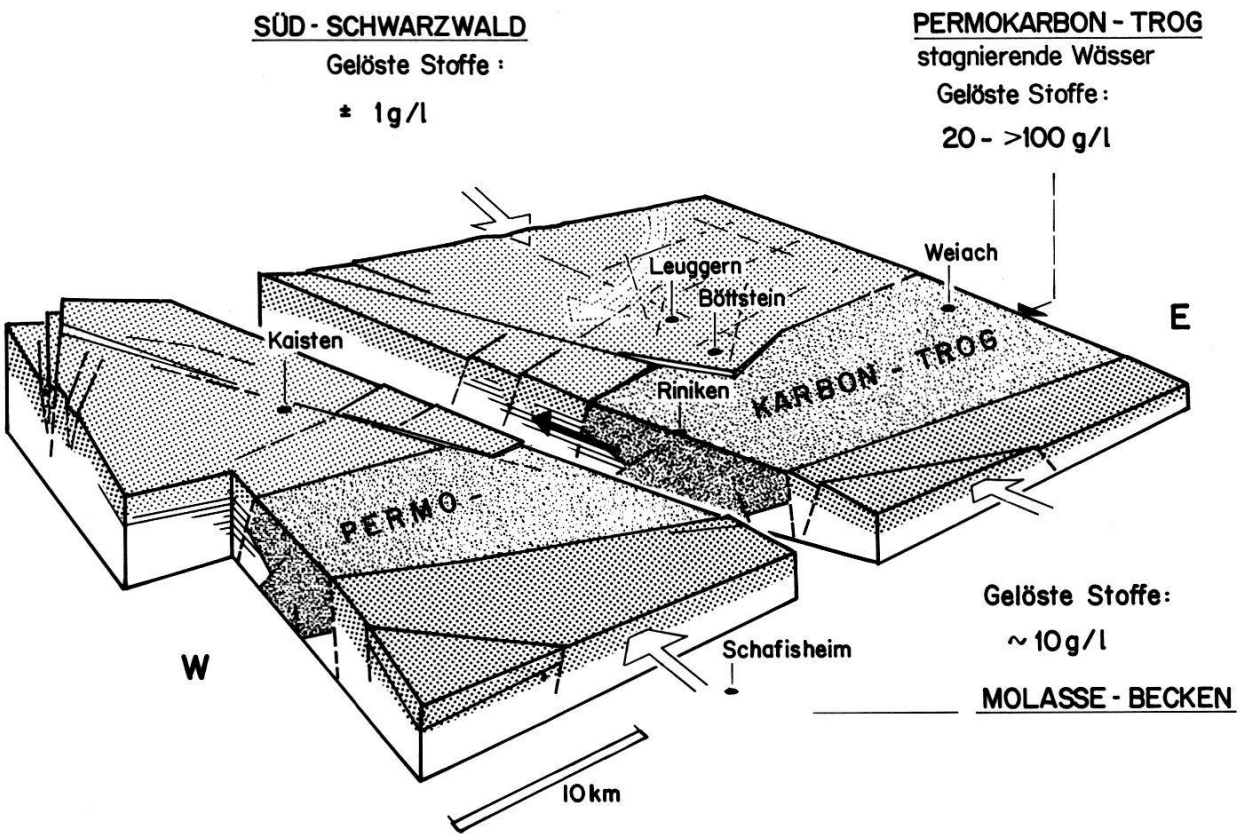
Aus dem Perm der Sondierbohrungen Weiach und Riniken sind die Wässer mit den größten Konzentrationen an gelösten Bestandteilen in der gesamten Region gefördert worden. In einer Probe erreichen sie das 2,7fache der Äquivalent- und der Massenkonzentration von Meerwasser. Die Befunde weisen darauf hin, daß Formationswässer aus kontinentalen Salzseen vorliegen, welche zu den Klimabedingungen der Perm-Periode durchaus passen. Solche Formationswässer können mit Wässern, die am hydrologischen Kreislauf teilhaben, vermischt sein, sind aber durch diese bis heute nicht vollständig verdrängt worden, was auf eine sehr geringe Wasserzirkulation in den betreffenden permischen Sedimenten schließen läßt.

Grundwässer im kristallinen Grundgebirge

Typische Kristallin-Wässer des Südschwarzwalds mit mittleren Verweilzeiten von mehr als 25–30 Jahren speisen eine Subtherme in Bürchau und die an der Randstörung des Oberrheingrabens aufsteigenden Thermen von Badenweiler. Ein bei Waldkirch östlich der Randstörung in Gneisen erbohrtes Wasser hat dagegen den chemischen Charakter der Buntsandstein-Perm-Wässer und ist vermutlich zu einer Zeit, als die Buntsandstein-Perm-Überdeckung dort noch erhalten war, aus dieser auf Klüften in das Schwarzwald-Kristallin hinuntergewandert (Tabelle 6).

Eine Besonderheit des nahe dem Oberrheingraben gelegenen *westlichen Tafeljuras* bilden kohlensäurereiche Wässer (Bohrung Grenzach und Bohrung Rheinfelden–Engerfeld). In diesem durch Bruchtektonik stark gestörten Gebiet bilden einzelne Störungen tiefreichende gas- und wasserwegsame Verbindungen zum Grundgebirge.

Im *östlichen Tafeljura* (Figur 13) zeichnet sich nördlich des Permokarbon-Troges ein durch die Thermalwasserbohrungen von Zurzach und durch die Sondierbohrungen Leuggern, Böttstein und Kaisten belegtes zusammenhängendes Gebiet ab, in welchem die höheren Teile des kristallinen Grundgebirges chemisch untereinander eng verwandte Wässer mit verhältnismäßig niedrigen Gesamt-



Figur 13: Grundwasserprovinzen im oberen Kristallin und Permokarbon-Trog der Region Nordschweiz (schematisches Blockdiagramm)

ionenkonzentrationen enthalten. Diese Konzentrationen sind kleiner als in allen anderen außerhalb des Schwarzwaldes gelegenen Kristallin-Wässern des Untersuchungsgebietes, auch kleiner als in Wässern des das Kristallin bedeckenden Buntsandsteins und vor allem viel geringer als in den Wässern des südlich an das Gebiet angrenzenden Permokarbon-Troges. Der weitgehende Kationen-Austausch, der sich bei eher geringen Chlorid-Konzentrationen im unter den Kationen stark dominierenden Natrium manifestiert, sowie hohe Helium-Konzentration sind zumindest Hinweise auf lange Verweilzeiten der Wässer im Untergrund; sie sind nach Kohlenstoff-14-Messungen auf rund 15000 Jahre und mehr zu veranschlagen. Hydrodynamisch können die durch ihre chemische und isotopische Beschaffenheit definierten Wässer als Teil eines regionalen Fließsystems interpretiert werden, dessen Infiltrationsgebiet im Südschwarzwald liegt. Es greift nach dieser Interpretation auf das nördlich des Permokarbon-Troges gelegene Tafeljura-Gebiet über, in dessen kristallinem Sockel es eine ungefähr ost-westliche Strömungsrichtung annimmt; das Rheintal oberhalb Säckingen bildet das Exfiltrationsgebiet (Figuren 11 B und 13).

Auf die in der Sondierbohrung Böttstein vorgefundenen hydrochemischen Verhältnisse (vgl. Tabelle 6) wird in drei Nagra-Berichten näher eingegangen (*Nagra*, 1985, s. *NTB 85-01;* PEARSON, 1985, s. *NTB 85-05* und BALDERER, 1985, s. *NTB 85-06)*.

In Bad Säckingen kam es schon auf natürliche Weise zum Austritt von mit rezenten Wässern lokaler Fließsysteme vermischten salinen Tiefengrundwässern. Einzelne chemische Besonderheiten und die Ergebnisse der Clusteranalysen zeigen Beziehungen der Säckinger Thermalwässer zu solchen der Buntsandstein-Perm-Aquifere. Sehr wahrscheinlich sind sie aus dem südlich des Gebietes der schwach mineralisierten Wässer (Zurzach–Leuggern–Böttstein–Kaisten) gelegenen Permokarbon-Trog in das Kristallin hineingewandert, aus welchem sie in Säckingen auf tektonischen Störungen aufsteigen und sich mit rezenten Grundwässern vermischen (in Figur 13 angedeutet).

Tabelle 6: Tiefengrundwässer aus dem kristallinen Grundgebirge

Ort	Aquifer	mval/l	g/l	Wassertyp
Bürchau	Granit	2	0,2	**Ca**–Na–**HCO_3**
Badenweiler	Trias-Perm (aus Kristallin)	5	0,4	Ca–Na–**HCO_3**–SO_4
Böttstein, 394–803 m (4 Tiefenbereiche) Zurzach Leuggern, 251–847 m, 1208 m Leuggern, 1643 m	Granit Granit Gneis Granit	14–18	1,0–1,3	**Na**–SO_4–HCO_3 bis **Na**–SO_4–HCO_3–Cl bis **Na**–SO_4–Cl–HCO_3 bis **Na**–SO_4–Cl–HCO_3
Kaisten, 276–1306 m 6 Tiefenbereiche	Gneis-Perm (Aufst. aus Gneis)	19–22	1,5–1,7	**Na**–**SO_4**–HCO_3
Leuggern, 1433 m	Granit	> 27	> 1,7	**Na**–**Cl**–SO_4
Rheinfelden (Engerfeld)	Granit/Gneis-Perm (aus Kristallin)	63	4,6	**Na**–Ca–HCO_3–SO_4–Cl
Leuggern, 923 m	Gneis	66	4,6	**Na**–Ca–**SO_4**
Waldkirch	Gneis	79	5,6	**Na**–Ca–**SO_4**
Säckingen (3 Bohrungen)	Granit	16–120	1,0–7,4	**Na**–Ca–**Cl**–HCO_3 bis **Na**–**Cl**
Weiach, 2214, 2267 m (2 Tiefenbereiche)	Gneis	106–133	6,5–8	**Na**–**Cl**
Schafisheim, 1565–1892 m (2 Tiefenbereiche)	Granit/Gneis	125–131	8,3–8,4	**Na**–**Cl**–SO_4 bis **Na**–**Cl**
Böttstein 1321–1331 m	Granit	223	13,3	**Na**–**Cl**

Südlich des Permokarbon-Troges ist die Beschaffenheit eines Kristallin-Grundwassers vorerst nur aus der Sondierbohrung Schafisheim bekannt, wo sich ein saliner Wassertyp findet.

Die aufgrund der Beschaffenheit der Tiefengrundwässer erkannten hydrogeologischen Zusammenhänge erlaubten insbesondere im Gebiet des Aargauer Tafeljuras und des angrenzenden Südschwarzwaldes eine Validierung und wesentliche Präzisierung der hydrodynamischen Modelle.

Verdankungen

Der Verfasser dankt der Geschäftsleitung der Nagra für die Erlaubnis zur Publikation des vorliegenden Artikels. Folgenden Nagra-Mitarbeitern sei ihre Mithilfe verdankt: Herrn Dr. M. THURY für die Durchsicht und kritische Diskussion des Manuskriptes, Frl. C. WITTWER für die Diskussion hydrochemischer Daten, Frl. M. WITTWER für die Erstellung des Manuskriptes und Herrn J. KELLERMÜLLER für die Anfertigung der Textfiguren.

Literaturhinweise

BERTRAND et al., 1973: «Inversion temporaire du gradient hydraulique du Karst et hétérogénité de la perméabilité»; Bull. Soc. Neuchâteloise des Sci. Nat. *96,* 1973.

FONTES J.C. et al., 1979: «Determination of the initial ^{14}C activity of a total dissolved carbon: a review of existing models and a new approach»; Water Resources Research, *15,* S. 399–413, 1979.

JÄCKLI H., KEMPF TH., 1972: «Hydrogeologische Karte der Schweiz, Bözberg–Beromünster», S. 143, 1972.

JAMIER D., 1975: «Etude de la fissuration de l'hydrogéologie et de la geochémie des eaux profondes des Massifs de L'arpille et du Mont-Blanc»; Thèse, Neuchâtel 1975.

KIRALY L., 1973: «Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel»; Bull. Soc. Neuchâteloise des Sci. Nat. *96,* 1973.

LAUBSCHER H.P., 1986: The eastern Jura: Relations between thin skinned and Basement Tectonics, Local and Regional (in press).

LEMCKE K., TUNN W., 1956: «Tiefenwässer in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage»; Bull. VSP, *23,* Nr. 64, S. 35–56, 1956.

LOUIS C., 1972: «Les charactèristiques hydrauliques du massif de fondation du barrage de Grand-Maison (Isère)»; Bull. B. R. G. M., 2e Série, III, S. 13–37, 1972.

MATHEY et al., 1971: «Estimation de la perméabilité en terrains calcaires par essais d'injection d'eau»; Actes du Coll. d'Hydrologie en pays calcaire Besançon, S. 165–175, 1971.

NEFF, 1980: «Geothermische Prospektion im Raume Koblenz–Wildegg–Dielsdorf, Forschungsprojekt Geothermische Energie und unterirdische Wärmespeicherung»; Nationaler Energie-Forschungs Fonds (Neff), Basel 1980.

PASQUIER F., PERSOZ F., 1977: «Oxydation des calcaires mésozoiques sont la molasse du plateau suisse et paléokarst»; Bull. VSP. *43,* Nr. 105, S. 21–28, 1977.

RECORDON I., 1979: «Dynamique des eaux souterraines – cours post-grade»; Centre d'hydrogéologie de l'université Neuchâtel 1979.

RYBACH L. et al., 1980: «Tiefengrundwasser aus geothermischer Sicht»; Eclogae Geol. Helv., 73/1, S. 293–310, 1980.

RYF W., 1984: «Thermalwasserbohrung 1983, Engerfeld, Rheinfelden»; Rheinfelder Neujahrsblätter, Rheinfelden, 1984.

SCHMASSMANN H.J., 1970: «Die Grundwasservorkommen im oberen Muschelkalk des Kantons Basellandschaft»; Gas-Wasser-Abwasser, 50. Jg. Nr. 4, 1970.

STRAYLE G., VILLINGER E., WERNER J., 1983: «Erfahrungen bei Geothermiebohrungen in Oberschwaben»; SIA Dokumentation 59 (Geothermie), Zürich 1983.

VILLINGER E., 1977: «Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb»; Geologisches Jahrbuch, Reihe C, *18,* S. 93, 1977.

VILLINGER E., 1982, «Hydrogeologische Aspekte zur geothermischen Anomalie im Gebiet Urach-Boll am Nordrand der Schwäbischen Alb»; Geologisches Jahrbuch, Reihe C, 32, S. 3–41, 1982.

Nagra Technische Berichte (sind nach der NTB-Nummer geordnet)

NTB 80-07 «Erläuterungen zum Nagra-Tiefbohrprogramm als vorbereitende Handlung im Hinblick auf das Projekt Gewähr»; M. THURY (1980).

NTB 82-09 «Sondierbohrung Böttstein – Arbeitsprogramm»; A. L. NOLD, M. THURY (1982a).

NTB 82-10 «Sondierbohrung Weiach – Arbeitsprogramm»; A. L. NOLD, M. THURY (1982b).

NTB 83-08 «Inventar der Erdbeben 1910–1982 und Karten der Magnitudenschwellenwerte 1928–1982»; D. MAYER-ROSA, H. BENZ, U. KRADOLFER, K. RENGGLI (1983).

NTB 83-14 «Sondierbohrung Riniken – Arbeitsprogramm»; A. L. NOLD, M. THURY (1983 a).

NTB 83-21 «Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Regionale Refraktionsseismische Messungen»; N. SIERRO, A. BINDSCHÄDLER, J. ANSORGE, ST. MÜLLER (1983).

NTB 83-25 «Sondierprogramm Schafisheim – Arbeitsprogramm»; A. L. NOLD, M. THURY (1983 b).

NTB 84-06 «Sondierbohrung Kaisten – Arbeitsprogramm»; A. L. NOLD, M. THURY (1984).

NTB 84-11 «Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz, Teil 1: Technische Unterlagen, Stationsnetz»; D. MAYER-ROSA, M. DIETIKER, N. DEICHMANN, K. RENGGLI, J. BRÄNDLI, J. STUDER, G. RUTISHAUER (1984).

NTB 84-12 «Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz, Teil 2: Seismizität, Januar 1983–September 1984»; N. DEICHMANN, K. RENGGLI (1984).

NTB 84-13 «Programme d'Etudes Géophysiques du Nord de la Suisse: Sondages Magnétotelluriques Pilotes 81»; G. FISCHER, P.-A. SCHNEGG, B. V. LE QUANG (1984):

NTB 84-14 «Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Aeromagnetische und bodenmagnetische Messungen 81»; E. KLINGELÉ, H. SCHWENDENER, CH. HEIM (1984).

NTB 84-16 «Fluviatile Erosions- und Akkumulationsformen als Indizen jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten»; P. HALDIMANN, H. NAEF, H. SCHMASSMANN (1984).

NTB 84-21 «Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten»; H. SCHMASSMANN, W. BALDERER, W. KANZ, A. PEKDEGER (1984).

NTB 84-22 «Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Gravimetrische Messungen 81/82»; E. KLINGELÉ, H. SCHWENDENER (1984).

NTB 84-25 «Erläuterungen zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000»; W. H. MÜLLER, M. HUBER, A. ISLER, P. KLEBOTH (1984).

NTB 84-26 «Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit»; P. DIEBOLD, W. H. MÜLLER (1985).

NTB 84-28 «Beurteilung der Satellitenbild-Lineamente im Raume Baden–Frick–Laufenburg–Zurzach»; A. ISLER (1984 a).

NTB 84-29 «Literaturzusammenstellung zur Neotektonik»; A. ISLER (1984 b).

NTB 84-30 «Das Kristallin des Südschwarzwaldes»; M. HUBER, A. HUBER (1984).

NTB 84-37 «Rezentes Spannungsfeld in der zentralen Nordschweiz»; A. BECKER, P. BLÜMLING, W. H. MÜLLER (1984).

NTB 84-38 «Sondierprogramm Leuggern – Arbeitsprogramm»; *Nagra* (1984).

NTB 84-45 «Seismotektonik Nordschweiz»; N. PAVONI (1985).

NTB 84-49 «FEM 301 – A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation»; L. KIRALY (1985).

NTB 84-50 «Simulation par Modèle Mathématique des Ecoulements Souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire»; F. KIMMEIER, P. PERROCHET, R. ANDREWS, L. KIRALY (1985).

NTB 85-01 «Sondierbohrung Böttstein – Untersuchungsbericht», *Nagra* (1985 a).

NTB 85-04 «Hydrochemische Labormethoden für das Nagra-Untersuchungsprogramm»; H. KUSSMAUL, O. ANTHONSEN (1985).

NTB 85-05 «Sondierbohrung Böttstein – Results of hydrochemical investigations: Analysis and interpretation»; F. H. PEARSON (1985).

NTB 85-06 «Sondierbohrung Böttstein – Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer», W. BALDERER (1985).

NTB 85-08 «Hydrogeologic Testing of Crystalline Rocks During the Nagra Deep Drilling Program»; G. E. GRISAK, J. F. PICKENS, D. W. BELANGER, J. D. AVIS (1985).

NTB 85-09 «Sondierbohrung Böttstein – Hydrogeologic testing of crystalline rocks»; R. E. J. LEECH, K. G. KENNEDY, D. GEVAERT (1984).

NTB 85-12 «Sondierbohrung Böttstein – Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik»; *Nagra* (1985 b).

NTB 85-39 «Analysis of pressure and flow data from the long-term monitoring tool in Böttstein borehole»; J. F. PICKENS, D. W. BELANGER, G. J. SAULNIER (1985).

Projekt-Berichte, Nagra (1985 c):

NGB 85-01 Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985.

NGB 85-04 Projekt Gewähr 1985. Endlager für hochaktive Abfälle, Das System der Sicherheitsbarrieren.

NGB 85-05 Projekt Gewähr 1985. Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht.

Dr. Peter Diebold
Schwerzleweg 11
5027 Herznach