

**Zeitschrift:** Eclogae Geologicae Helvetiae  
**Herausgeber:** Schweizerische Geologische Gesellschaft  
**Band:** 80 (1987)  
**Heft:** 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"  
  
**Artikel:** Überblick über das geologische Untersuchungsprogramm der Nagra in der Nordschweiz  
**Autor:** Thury, Marc / Diebold, Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-165995>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

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

# Überblick über das geologische Untersuchungsprogramm der Nagra in der Nordschweiz

Von MARC THURY<sup>1)</sup> und PETER DIEBOLD<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

For the assessment of the feasibility and safety of a repository for high level radioactive waste, Nagra (National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste) has started in 1980 in central northern Switzerland an extensive geological investigation program. This overall program contains four field investigation programs and several programs for synthesis work.

By the end of 1985, six deep drillings have been completed. The deepest borehole reached 2482 m. All in all, more than 8000 m of cores have been taken and analyzed in detail. In the boreholes, extensive hydrogeological tests have been carried out.

Within the regional geophysical investigation program gravimetric, aeromagnetic and magnetotelluric, refraction seismic and reflection seismic surveys have been carried out. Vibroseis lines of 400 km length have been measured.

Within the regional hydrogeological program, water samples of more than 100 springs and wells with hydrochemically or thermally abnormal waters have been analyzed in detail for their chemical and isotopic composition.

Within the neotectonic program, geomorphologic, tectonic, geodetic and seismic studies and measurements have been carried out. In 1983, a microearthquake survey network was installed.

All these data were analyzed in several synthesis programs: Structural geology, hydrochemistry, hydrodynamic modelling and long term stability scenarios.

The Nagra program continues. As next, a deep borehole in the Canton of Schaffhausen is planned. Meanwhile all data are analyzed in detail and the understanding of the regional and local geology, geochemistry and hydrogeology of northern Switzerland is improved and refined.

## ZUSAMMENFASSUNG

Zur Abklärung der Machbarkeit und der Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle hat die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) 1980 in der zentralen Nordschweiz ein geologisches Untersuchungsprogramm in Angriff genommen. Dieses Programm gliedert sich in vier Messprogramme mit umfangreichen Felduntersuchungen und in verschiedene Syntheseprogramme.

Bis Ende 1985 wurden 6 Tiefbohrungen ausgeführt. Die tiefste Bohrung erreichte eine Tiefe von 2482 m. Insgesamt wurden über 8000 m Bohrkern gezogen und untersucht. In den Bohrungen wurden umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen ausgeführt.

Ein regionales geophysikalisches Programm umfasste gravimetrische, aeromagnetische und magnetotellurische Messungen, ausgedehnte Refraktionsseismik und Reflexionsseismiklinien von insgesamt 400 km Länge.

---

<sup>1)</sup> Nagra, Parkstrasse 23, CH-5401 Baden.

<sup>2)</sup> Schwerzleweg 11, CH-5027 Herznach.

In einem regionalen hydrogeologischen Programm wurden Wässer von über 100 Quellen und Wasserfassungen mit hydrochemischen oder thermischen Anomalien genauestens auf ihre chemische und isotopische Beschaffenheit hin untersucht.

Im Rahmen eines Neotektonik-Programms wurden geomorphologische, tektonische, geodätische und seismologische Studien und Messungen durchgeführt. Zudem wurde 1983 in der Nordschweiz ein Mikroerdbeben-Messnetz installiert.

Die gewonnenen Daten wurden in verschiedenen Syntheseprogrammen ausgewertet: Strukturgeologie, Hydrochemie, hydrodynamische Modellierung, Szenarien geologischer Langzeitsicherheit.

Das Programm ist noch nicht abgeschlossen. Als nächstes ist eine weitere Tiefbohrung im Kanton Schaffhausen vorgesehen. Die bis anhin gewonnenen Daten werden im Detail ausgewertet und die Synthesen werden überarbeitet und verfeinert.

## 1. Einleitung

Gemäss dem Konzept der nuklearen Entsorgung in der Schweiz ist vorgesehen, hochradioaktive Abfälle in Endlagern in geologischen Formationen zu entsorgen. Zur Beurteilung der Machbarkeit und der Sicherheit eines solchen Endlagers sind zahlreiche Fragen über die Geosphäre in einer Endlagerregion zu beantworten. Zur Abklärung dieser Fragen wurde in der Nordschweiz ein umfangreiches geologisches Untersuchungsprogramm in Angriff genommen. Dieses Programm ist noch nicht abgeschlossen, schon heute hat es aber Erkenntnisse gebracht, die weit über die projektbezogenen Fragestellungen hinaus für die Erdwissenschaften ganz allgemein von bedeutendem Interesse sind.

In zahlreichen Publikationen werden, wie beispielsweise in diesem Band, von einzelnen Ergebnissen berichtet. Der Zweck des vorliegenden Artikels ist es, den Gesamtrahmen aller Untersuchungen aufzuzeigen.

## 2. Der Beitrag der Geologie zur Sicherheit eines Endlagers

Gemäss den Projekten der Nagra sollen die hochradioaktiven Abfälle in einem Stollensystem in tiefliegenden geologischen Schichten endgelagert werden. Ein System von technischen Barrieren schliesst die radioaktiven Stoffe vorerst für mehrere tausend Jahre ein. Nach dieser Zeit können radioaktive Stoffe in geringen Mengen herausgelöst werden. Sie gelangen in das Tiefengrundwasser und mit diesem möglicherweise zurück in die Biosphäre.

Die Geosphäre beeinflusst die Sicherheit der Endlagerung auf mehrfache Weise:

- Die Mächtigkeit der Überdeckung schützt vor einem mutwilligen oder unbeabsichtigten menschlichen Zugriff, Sabotage und kriegerischen Handlungen.
- Die Tiefenlage schützt die Integrität der technischen Barrieren vor den Einflüssen der Erosion durch Wasser und Eis.
- Die Anlage des Endlagers in einer stabilen Gesteinsscholle schützt die Integrität der technischen Barrieren vor tektonischer Beanspruchung und Erdbeben.
- Durch geeignete Wahl von Wirtgestein und Standort können das Wasserangebot im Endlagerbereich klein und die Wasserfliessgeschwindigkeiten des Tiefengrundwassers niedrig gehalten werden.
- Kleiner Wasserfluss schliesst die Erosion der Betonitverfüllung – einer wichtigen technischen Barriere – aus.
- Kleiner Wasserfluss und lange Fliesswege führen zu langen Migrationszeiten von Radionukliden vom Endlager zur Biosphäre.

- Grosser Wasserfluss in endlagerfernen Aquiferen sorgt potentiell für eine wirksame Vorverdünnung von kontaminiertem Grundwasser auf seinem Weg zur Erdoberfläche.
- Reduzierende chemische Bedingungen begrenzen die Löslichkeit wichtiger Radionuklidverbindungen im Grundwasser.
- Geeigneter Grundwasserchemismus reduziert die Korrosionsrate der Abfallbehälter.
- Die geochemischen Bedingungen beeinflussen die Retardation migrierender Radionuklide durch Sorption, Matrixdiffusion und Dispersion.

### 3. Programmübersicht

Im Rahmen der langfristigen Zielsetzung der Nagra soll in der seit 1980 laufenden ersten Phase ein geologisches 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 notwendig für die Auswahl sowohl eines günstigen Wirtgesteins als auch zur Definition jener Teilgebiete, die in einer späteren Phase im Detail auf ihre Eignung als potentielle Standorte weiter zu untersuchen sein werden.

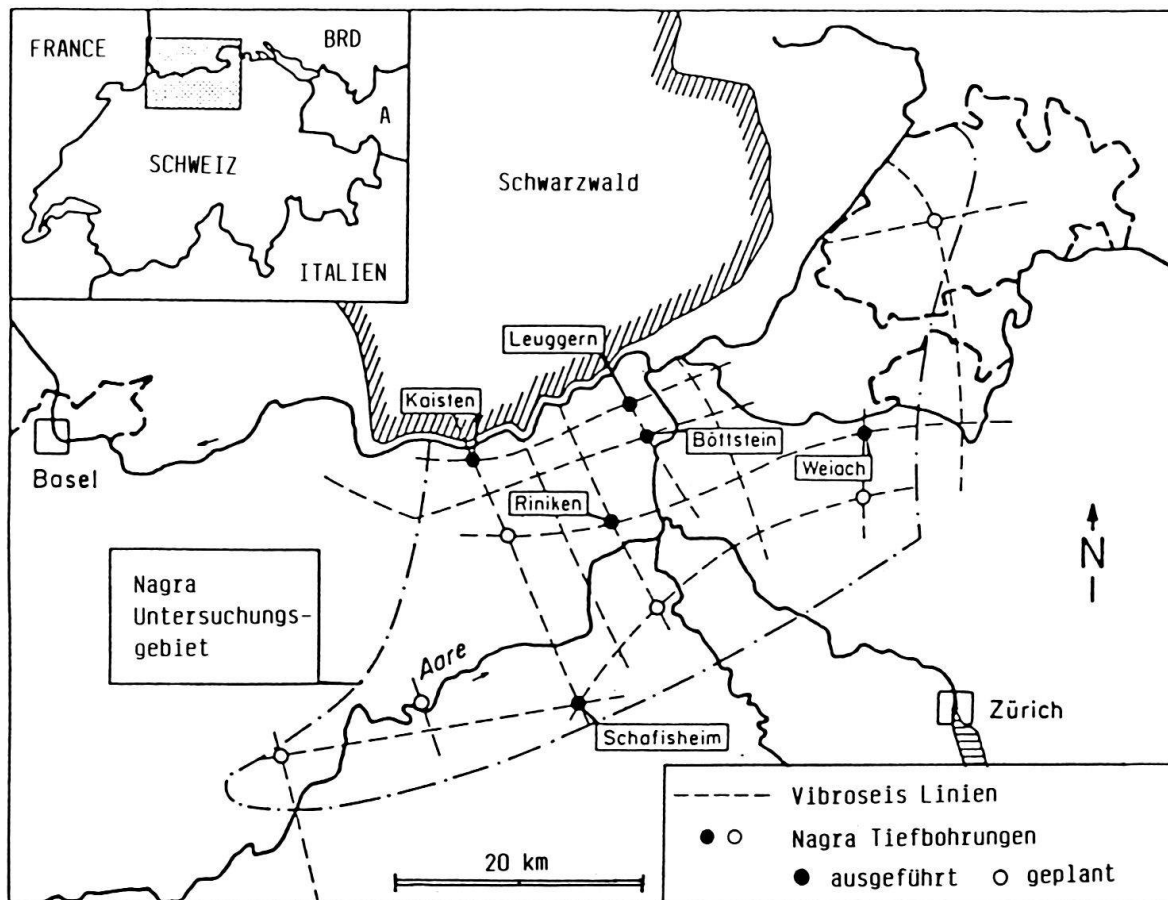


Fig. 1. Nagra-Untersuchungsgebiet. Lage der Tiefbohrungen und der Vibroseis-Linien.

Die Lage des Untersuchungsgebietes ist auf Figur 1 dargestellt. Dieses Untersuchungsgebiet wurde 1979 festgelegt (THURY 1980). Westlich und östlich dieses Gebietes liegen die Regionen von Basel und Schaffhausen, die eine erhöhte Erdbebenaktivität aufweisen und deshalb gemieden wurden. Die Nordgrenze fällt mit der Landesgrenze zusammen. Für den bergmännischen Bau eines Endlagers darf die Gesteinstemperatur nicht viel mehr als 55°C betragen. Aus dieser Randbedingung ergibt sich die Südgrenze des Untersuchungsgebietes, denn südlich dieser Grenze kommt das Grundgebirge, das in erster Priorität als Wirtgestein für ein Endlager untersucht wird, wegen der nach Süden hin zunehmenden Mächtigkeit der Sedimentüberlagerung erst in einer Tiefenlage vor, in der die Gesteinstemperaturen zu hoch sind für ein Endlager.

Wie auf Figur 2 dargestellt ist, gliedert sich das laufende Untersuchungsprogramm in vier Messprogramme mit umfangreichen Felduntersuchungen (Regionale Hydrogeologie, Tiefbohrungen, Regionale Geophysik, Neotektonik) und in Syntheseprogramme mit projektbezogenen Auswertungen der Felduntersuchungen.

#### 4. Tiefbohrungen

Bis Ende 1985 wurden von der Nagra sechs Tiefbohrungen abgeteuft. Es sind dies die Bohrungen von Böttstein, Riniken, Schafisheim, Kaisten und Leuggern im Kanton Aargau und Weiach im Kanton Zürich. Ihre Lage ist aus Figur 1 ersichtlich. Die Bohrtiefen und die Mächtigkeiten der durchbohrten geologischen Formationen sind auf Figur 3 dargestellt. Auf Tafel 1 sind die stratigraphischen Übersichtsprofile dieser Bohrungen wiedergegeben.

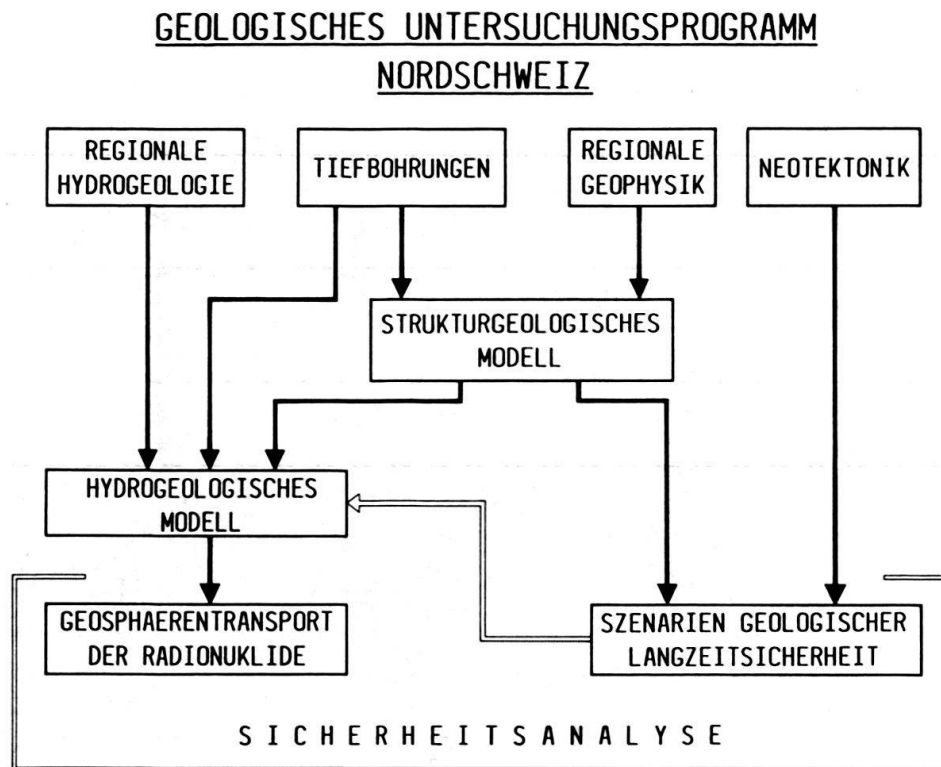


Fig. 2. Gliederung des geologischen Untersuchungsprogramms Nordschweiz.

Sondierbohrung:		BOETTSTEIN	WEIACH	RINIEN	SCHAFISHEIM	KAISTEN	LEUGGERN
Bohrung	Beginn bis Ende	10.82 - 6.83	1.83 - 11.83	7.83 - 1.84	11.83 - 6.84	2.84 - 6.84	7.84 -
Höhe	m	347,5	368,7	385,1	421,2	320,4	358,8
Koordinaten	km x y	659,3 268,6	676,7 268,6	656,6 261,8	653,6 246,8	644,6 265,6	657,6 271,2
Endtiefe	m	1501	2482	1801	2006	1306	1689
Durchteufte Geologie		m t	m t	m t	m t	m t	m t
Quartär		18 0	37 0	25 0	244 0	45 0	48 0
Tertiär		—	149 37	—	332 244	—	—
Malm	Jura	—	294 186	185 25	267 576	—	—
Dogger		—	186 480	240 210	237 843	—	—
Lias		—	38 666	39 450	25 1080	—	—
Keuper	Trias	104 18	110 704	127 489	125 1105	—	—
Muschelkalk		185 122	170 814	178 616	248 1230	49 45	159 48
Buntsandstein		8 307	5 984	22 794	12 1478	31 94	16 207
Perm	Karbon	—	461 989	985 816	—	172 125	—
Karbon		—	570 1450	1801	—	—	—
Grundgebirge		1186 315 Granit 1501	462 2020 Gneis 2482		516 1490 Syenit 2006	1009 297 Gneis 1306	223 Gneis Granit 1689

m : Mächtigkeit (m)  
t : Tiefe (m), Oberkante

⬮ : Kernmarsch

Fig. 3. Die ersten sechs Tiefbohrungen der Nagra im Vergleich.

Die Bohrungen wurden grösstenteils als Kernbohrungen ausgeführt. Insgesamt wurden ca. 10800 Bohrmeter abgeteuft, und rund 8000 m Bohrkern gezogen. An diesen Bohrkernen wurde ein umfangreiches Labor-Untersuchungsprogramm ausgeführt (PETERS et al. 1986, MATTER et al. 1987).

Die Bohrkern wurden räumlich orientiert (sehr erfolgreich mit Sonic Televiewer) und eine ausführliche Statistik über die Klufthorientierungen wurde erstellt.

Geophysikalische Logs wurden aufgenommen, mit praktisch allen heute gebräuchlichen Sonden (WEBER et al. 1986). Für den Granit der Bohrung Böttstein wurde ein synthetisches Faciolog entwickelt, das mit der beobachteten Petrographie bemerkenswert gut übereinstimmt.

Zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des Gesteins wurden systematisch in 12 bis 25 m-Intervallen Doppelpackertest durchgeführt (GRISAK et al. 1985, LEECH et al. 1985).

Zur Erkennung und genauen Lokalisierung von diskreten wasserführenden Zonen wurde ein «Fluid Logging» durchgeführt. Stärker wasserführende Zonen wurden mit einem Spinnerflowmeter lokalisiert, mit welchem die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im Bohrloch gemessen wird. Wasserführende Zonen in sehr gering drucklässigen Strecken konnten gut mit dem elektrischen Leitfähigkeitslog nachgewiesen werden. Dabei wurde die Bohrlochflüssigkeit vorgängig durch deionisiertes Wasser ersetzt.

In den Sediment-Aquiferen und in den wasserführenden Zonen des Kristallins wurden Wasserproben entnommen. Die Kristallin-Abschnitte der Bohrungen wurden entweder mit deionisiertem Wasser oder infiltrierendem Tiefengrundwasser gebohrt. Es wur-

den keinerlei Additive zugesetzt, mit Ausnahme von zwei Tracern, welche die Bestimmung der Kontamination der Grundwasserproben durch Bohrspülung vor Ort erlaubten. Mehrere Wasserproben wurden unmittelbar nach dem Anbohren einer wasserführenden Zone entnommen, die Bohrarbeiten wurden dabei unterbrochen. Ein Teil der Wasserproben wurde an der Oberfläche genommen, der andere in der Tiefe mit Hilfe von Druckgefässen. Die Wasserproben wurden chemisch, bakteriologisch und isotopenhydrologisch sehr genau analysiert (PEARSON 1985, BALDERER 1985, HAUG 1985, WITTEWER 1986).

Anfangs 1984 wurde in der Bohrung Böttstein ein Multipackersystem mit acht Packern installiert, das die langfristige Beobachtung der Druckspiegel von acht verschiedenen Abschnitten im Kristallin erlauben sollte. Dieses Multipackersystem bewährte sich bis anhin sehr gut. 1985 wurden ähnliche Multipackersysteme in vier weiteren Bohrungen installiert (PICKENS et al. 1985, SCHNEIDER & SCHLANKE 1986).

Für die Tiefbohrung Böttstein konnten die Datenanalysen abgeschlossen und in einer Anzahl technischer Berichte publiziert werden (z. B. Nagra 1985). Die detaillierte Auswertung der anderen Sondierbohrungen ist noch im Gange.

## 5. Regionale Geophysik

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 beschliessen deshalb im Sommer 1981, ihre Arbeiten in einem gemeinsamen Untersuchungsprogramm zu koordinieren.

Bis Ende 1985 umfasste das regionale geophysikalische Programm folgende Untersuchungen:

- *Gravimetrie* (Erdschwere-Messungen)  
Im Untersuchungsgebiet wurden 1981/82 insgesamt 4952 gravimetrische Stationen vermessen. Die Auswertung der Daten liess ein signifikantes Massendefizit im Bereich Riniken-Weiach erkennen (KLINGELÉ & SCHWENDENER 1984).
- *Aeromagnetik* (Magnetometrie)  
1981 wurde auf Flughöhen von 1100 m und 1500 m ein Liniennetz von insgesamt 62.25 km mit einer Maschengrösse von 1 km (N-S) und 5 km (E-W) magnetisch vermessen. Im untersuchungsgebiet wurden keine signifikanten magnetischen Anomalien gefunden (KLINGELÉ et al. 1984).
- *Magnetotellurik*  
Ebenfalls 1981 wurden im Schwarzwald (Schönau-Kaisten), im Tafeljura (Herznach) und am Baldegersee magnetotellurische Pilotmessungen durchgeführt (FISCHER et al. 1984). Da sich die Resultate aber als nicht schlüssig erwiesen haben, wurden keine weiteren Messungen durchgeführt.
- *Refraktionsseismik*  
Die Aufnahmen der Jahre 1981/82 basieren auf total 232 km Seismometerauslage und erbrachten die ersten Hinweise auf die Existenz des nordschweizerischen Permokarbon-Troges (SIERRO et al. 1983). Nachdem dieser Trog sowohl mit Hilfe der Reflexionsseismik als auch in zwei Sondierbohrungen nachgewiesen werden konnte, wurden

1984 eine weitere Refraktionsmessung im Hinblick auf die Kartierung des Permokarbon-Troges ausgelegt (FROMM et al. 1985).

— *Reflexionsseismik*

Das Liniennetz der in drei Etappen zwischen 1982 und 1985 durchgeführten Reflexionsseismik, bei 36facher Stapelung, beträgt insgesamt 400 km. Die geophysikalische Datenverarbeitung (Processing) der bisherigen Feldaufnahmen ist abgeschlossen und hat seismische Profile sehr hoher Qualität geliefert. Die Ergebnisse der Kampagne 1982 wurden publiziert (SPRECHER & MÜLLER 1986).

## 6. Strukturgeologische Modelle

Für die Planung des geologischen Untersuchungsprogramms wurde 1980 ein strukturgeologisches Modell des Nagra-Untersuchungsgebietes erarbeitet. In diesem Modell wurde gemäss der allgemeinen Lehrmeinung ein relativ ruhig nach Süden einfallender Buntsandstein und darunter eine nicht wesentlich coupierte Kristallinoberfläche, möglicherweise mit einigen lokalen permischen Füllungen von Rinnen angenommen.

Aufgrund des in den sechs Tiefbohrungen und mit regionalen geophysikalischen Untersuchungen gewonnenen, sehr umfangreichen Datenmaterials mussten die Vorstellungen über den Aufbau des Untergrundes ganz wesentlich revidiert werden. Ein mächtiger Permokarbon-Trog wurde nachgewiesen. Aufgrund der Bohrdaten und der Resultate der Vibroseis-Kampagne 1982 wurde 1984 ein neues strukturgeologisches Modell erarbeitet (SPRECHER & MÜLLER 1986). Im Auftrag der Sicherheitsbehörden wurde eine weitere Datenanalyse durchgeführt (LAUBSCHER 1986). Nachdem auch die Aufnahmen der Vibroseis-Kampagnen 1983 und 1984 prozessiert waren, wurde die Überarbeitung der strukturgeologischen Modelle der Nordschweiz in Angriff genommen, in welchem die Resultate aller geophysikalischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 5) und aller Tiefbohrungen sowie neuer geologischer Kartierungen (Blätter Zurzach und Laufenburg) berücksichtigt werden. Diese Arbeiten sollen 1988 abgeschlossen werden. Auf Figur 4 ist ein strukturgeologisches Blockdiagramm einer vorläufigen Interpretation des Permokarbon-Troges dargestellt.

## 7. Regionale Hydrogeologie

Für den Transport von Radionukliden aus Endlagern in die Biosphäre kommt in erster Linie zirkulierendes Grundwasser in Frage. Hydrogeologischen Untersuchungen kommt daher im Arbeitsprogramm der Nagra ein besonderer Stellenwert zu.

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

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

An Wasserproben aus über hundert Grundwasserfassungen und Quellen, die eine hydrochemische oder thermische Anomalie aufweisen, wurden detaillierte chemische, isotopenhydrologische und bakteriologische Analysen ausgeführt (z. B. Ionenkonzentra-



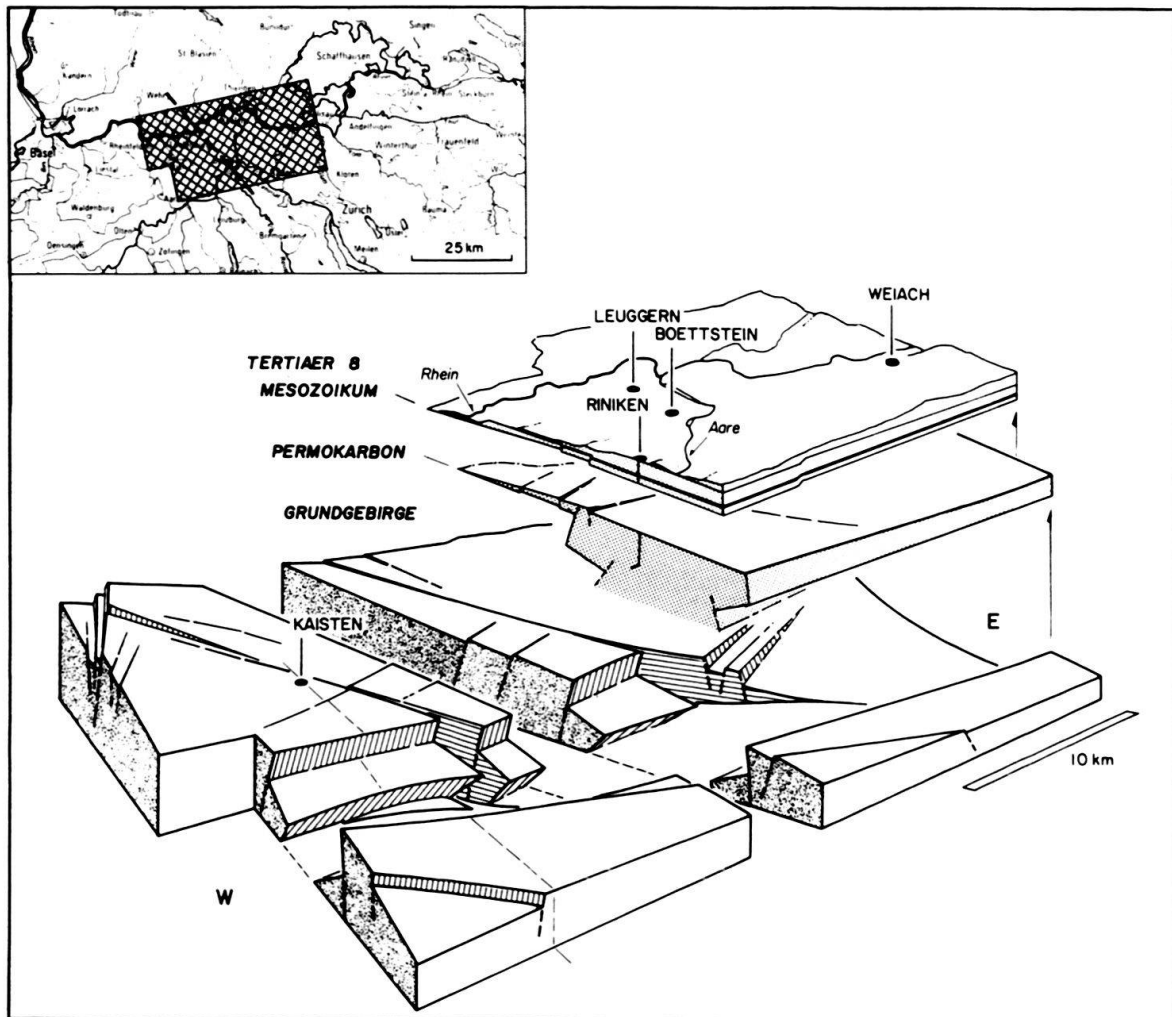


Fig. 4. Schematisches strukturgeologisches Blockdiagramm der Nordschweiz.

tionen von bis 25 Kationen und bis 18 Anionen; Isotopenanalysen von H, C, O, S, Cl, Kr, Ar, U, Th, Ra).

Eine erste hydrochemische und isotopehydrologische Auswertung und Synthese dieser Analysenresultate und erster Analysenresultate aus den Tiefbohrungen wurde 1983/1984 erarbeitet (SCHMASSMANN et al. 1984). Zur Zeit wird diese Synthese unter Berücksichtigung aller bis 1986 vorhandenen Analysenresultate überarbeitet. Dabei wird versucht, die hydrochemischen und isotopehydrologischen Unterschiede und lateralen Veränderungen der Grundwässer der einzelnen Aquifere mit chemischen Wechselwirkungen zwischen Gestein und Wasser in Beziehung zu bringen.

Die Mineralquellen und Thermen von Baden, Schinznach, Zurzach, Lostorf, Eglisau, Säckingen (BRD) und Nack-Lottstetten (BRD) wurden besonders eingehend untersucht und kontinuierlich überwacht, einerseits aus wissenschaftlichen Gründen, andererseits zur Beweissicherung. Mit dieser Beweissicherung konnte nachgewiesen werden, dass keine der sechs bis jetzt abgeteufte Tiefbohrungen einen messbaren Einfluss auf diese Mineralquellen und Thermen hatte.

### 8. Das hydrogeologische Modell

Das hydrogeologische Modell der Nagra beschreibt die Tiefengrundwasserverhältnisse in der Nordschweiz. Es umfasst einerseits die Grundwasserströmungsverhältnisse,

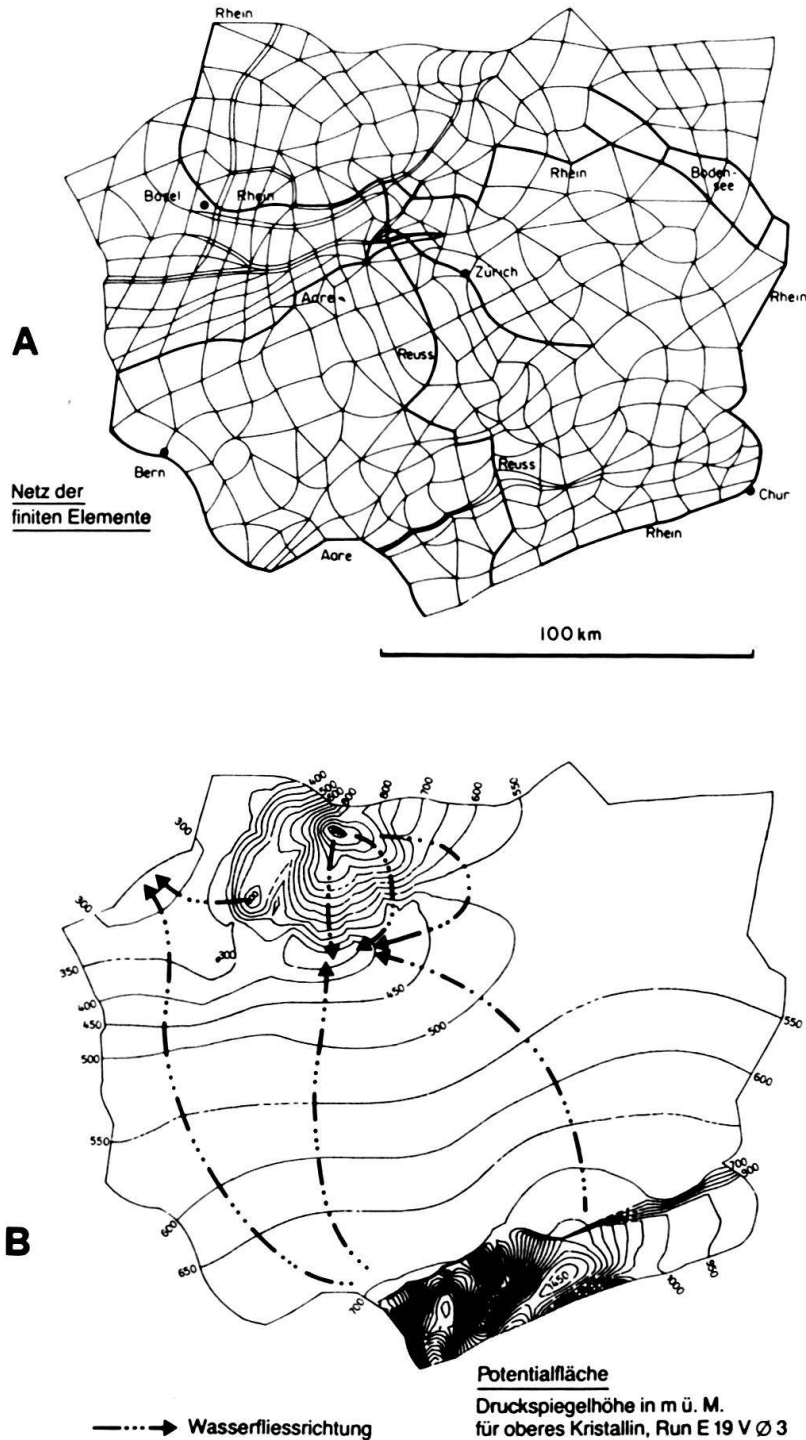


Fig. 5. Regionales hydrodynamisches Modell.

A: Netz der finiten Elemente des Kristallins.

B: Simulierte Potentialfläche und Wasserflussrichtungen im oberen Kristallin.

andererseits die chemische, physikalische und isopenhydrologische Beschaffenheit der verschiedenen Grundwässer (siehe auch Kapitel 7).

Die Grundwasserströmungsverhältnisse wurden mit zwei umfangreichen hydrodynamischen Rechenmodellen simuliert.

Ein regionales Modell umfasst die gesamten In- und Exfiltrationsgebiete des Kristallins. Das lokale Modell ermöglicht es, komplizierte Strukturen sowie stratigraphische und topographische Zusammenhänge in einem kleineren Gebiet genauer zu erfassen.

Das regionale Modell erstreckt sich vom Aarmassiv bis zum Schwarzwald und vom Berner Jura bis zum Bodensee. 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. Für die Diskretisierung wurden 5631 Elemente und 14768 Knoten verwendet. Auf Figur 5 ist das Netz der finiten Elemente und eine der zahlreichen gerechneten Potentialflächen dargestellt.

Das lokale Modell erstreckt sich vom Rhein im Norden bis zur Aare entlang des Jurasüdfusses im Süden und von der Ergolz im Westen bis ungefähr zum Ostrand der Lägeren im Osten. Es besteht aus 5974 Elementen und 20282 Knotenpunkten.

Die beiden Modelle wurden 1981–1984 erarbeitet (KIRALY 1985, KIMMEIER et al. 1985). Zur Zeit werden diese Modelle unter Berücksichtigung hydraulischer Daten aus den Tiefenbohrungen und neuer strukturgeologischer Erkenntnisse überarbeitet und anschliessend validiert mit neuen hydraulischen Daten sowie hydrochemischen und isopenhydrologischen Erkenntnissen.

## 9. Neotektonik

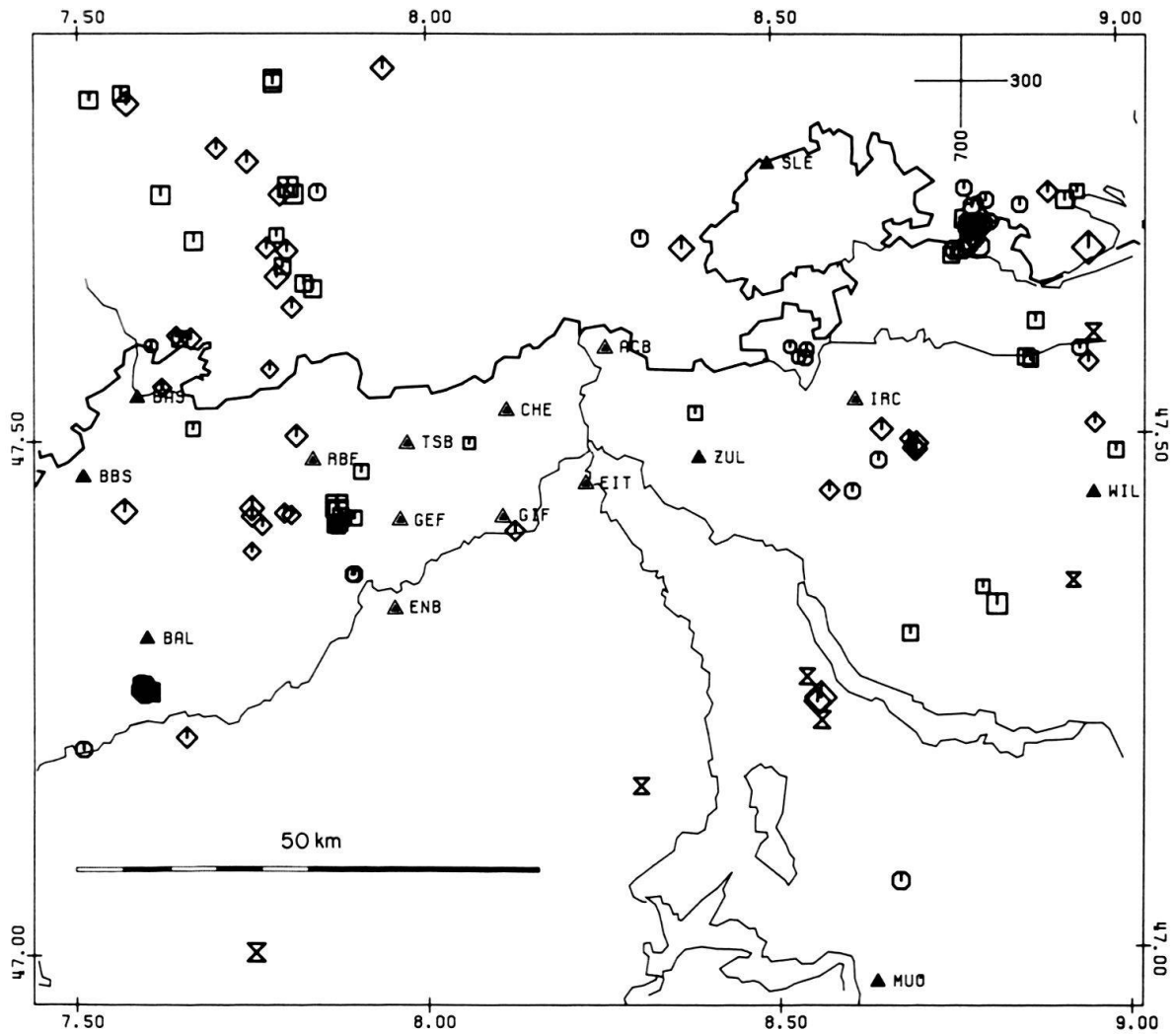
Unter dem Begriff Neotektonik werden jene erdwissenschaftlichen Untersuchungen zusammengefasst, die eine Erforschung der geologisch jüngsten Erdkrustenbewegungen zum Ziele haben. Es wird angenommen, dass sich zukünftige Bewegungen vorwiegend an Verwerfungen abspielen, die sich in geologisch jüngster Zeit noch bewegt haben. Für eine Prognose der zukünftigen Veränderungen kommt deshalb diesem Neotektonik-Programm ein bedeutender Stellenwert zu.

Das Neotektonik-Programm umfasst folgende Untersuchungen:

### — Erdbeben

Der Schweizerische Erdbebendienst betreibt zur Registrierung der Erdbebentätigkeit ein Netz von Seismographen-Stationen. Im Untersuchungsgebiet der Nagra lag jedoch nur eine einzige, die Station Zürich–Lägeren. Im Jahr 1983 wurden deshalb im Auftrag der Nagra im Untersuchungsgebiet weitere 9 Seismographen-Stationen installiert (MAYER-ROSA et al. 1984).

Dieses neue Stationsnetz erlaubt nun die Lokalisierung und Vermessung auch von sehr schwachen Beben (Magnitudenschwelle um 1 auf der Richterskala). Über die Auswertung dieser Erdbebenbeobachtungen berichtet Nagra regelmässig in ihren technischen Berichten (DEICHMANN & RENGGLI 1984). Auf Figur 6 ist das Stationsnetz und die registrierten Beben für den Zeitraum Januar 1983 bis April 1987 dargestellt.



ERDBEBEN - EPIZENTREN

Jan. 1983 - April 1987

▲ Nationale Seismographenstation

▲ Nagra Seismographenstation

$M_L \backslash Z$	$\geq 0$	$\geq 6$	$\geq 13$	$\geq 25$
$\geq 1$	○	□	◇	⊗
$\geq 2$	⊙	⊠	⊡	⊗
$\geq 3$	⊕	⊡	⊣	⊗
$\geq 4$	⊗	⊡	⊣	⊗
$\geq 5$	⊗	⊡	⊣	⊗

Fig. 6. Mikroerdbeben-Messnetz und Epizentren (Januar 1983 bis April 1987).

— Spannungsmessungen

Die aus Erdbeben bestimmbaren Spannungszustände der Erdkruste wurden analysiert (PAVONI 1984). Das Spannungsfeld im nordschweizerischen untiefen Krustenteil wurde zudem anhand von statistischen Daten über anisotrope Bohrlochwandausbrüche in den Nagra-Tiefbohrungen ermittelt. Die von einer kreisrunden Bohrkronen geschnittenen Bohrlöcher sind im Querschnitt leicht exzentrisch. Die Abweichungen vom Kreis wurden im Bohrloch vermessen und statistisch ausgewertet (BECKER et al. 1984).

— *Vertikale Krustenbewegungen (Geodäsie)*

Rezente vertikale Krustenbewegungen lassen sich aus dem Vergleich von wiederholten, zeitlich getrennten Präzisionsnivelements berechnen. Die in der Nordschweiz in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie durchgeführten Untersuchungen haben Regionen mit signifikanten differenziellen Hebungs- bzw. Absenk-tendenzen nachgewiesen (GUBLER et al. 1984).

— *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 finden liessen (ISLER et al. 1984). Dagegen hat eine Analyse der Tiefenerosion sowie des Verlaufs der Niederterrassenschotter des unteren Aareabschnittes und des Hochrheins (Eglisau–Basel) Hinweise auf junge Krustenverstellungen gegeben (HALDIMANN et al. 1984). Solche lassen sich auch aus den Gefällsverhältnissen der Flüsse auf der südlichen Schwarzwaldabdachung vermuten.

### 10. Szenarien geologischer Langzeitsicherheit

Die Langzeitsicherheit eines Endlagers könnte durch Krustenbewegungen in zwei Grössenbereichen beeinflusst werden:

- Im Lokalbereich können differenzielle Bewegungen (Verstellung an Verwerfungen) die Wirkung von technischen Barrieren beeinträchtigen (z. B. Zerscheren der Bentonitverfüllung) und/oder lokale Wasserfließsysteme verändern.
- Im Regionalbereich können langfristig kumulativ wirkende Krustenverstellungen die Wasserfließsysteme im Untergrund und an der Oberfläche modifizieren durch Veränderungen, z. B. der Erosionsbasis, von Druckgradienten und/oder Durchlässigkeitswerten.

1984 wurden Szenarien geologischer Langzeitsicherheit erarbeitet (DIEBOLD & MÜLLER 1985). Die angewandte Methodik zur Prognose von Krustenbewegungen war rein phänomenologisch und umfasste folgende Schritte:

- Aus der geologischen Geschichte wurden für gegebene geotektonisch einheitliche Gebiete Bewegungsabläufe und deren Raten abgeschätzt.
- Aus neotektonischen Beobachtungen resp. Messungen wurden, wenn möglich, junge oder rezente Bewegungsraten zum Vergleich erarbeitet.
- Publierte Daten anderer Gebiete in ähnlicher geotektonischer Lage wurden zum weiteren Vergleich herangezogen.
- Eine Extrapolation in die Zukunft erfolgte mit Hilfe der so erarbeiteten Bewegungsraten.

Für die Ausarbeitung geologischer Langzeitszenarien wurden die Abläufe geologischer Prozesse in der Nordschweiz in einen grösseren regionalen Rahmen gestellt, welcher das Gebiet zwischen Alpen und Schwarzwald–Rheingraben erfasste. Das für diese Region zu erstellende geologische Modell stützte sich auf Daten der Geologie, der Geophysik und der Neotektonik. Auch extreme Standpunkte wurden in die Modellbetrachtungen miteinbezogen. Vor allem musste das Modell so gebaut sein, dass auch die gravie-

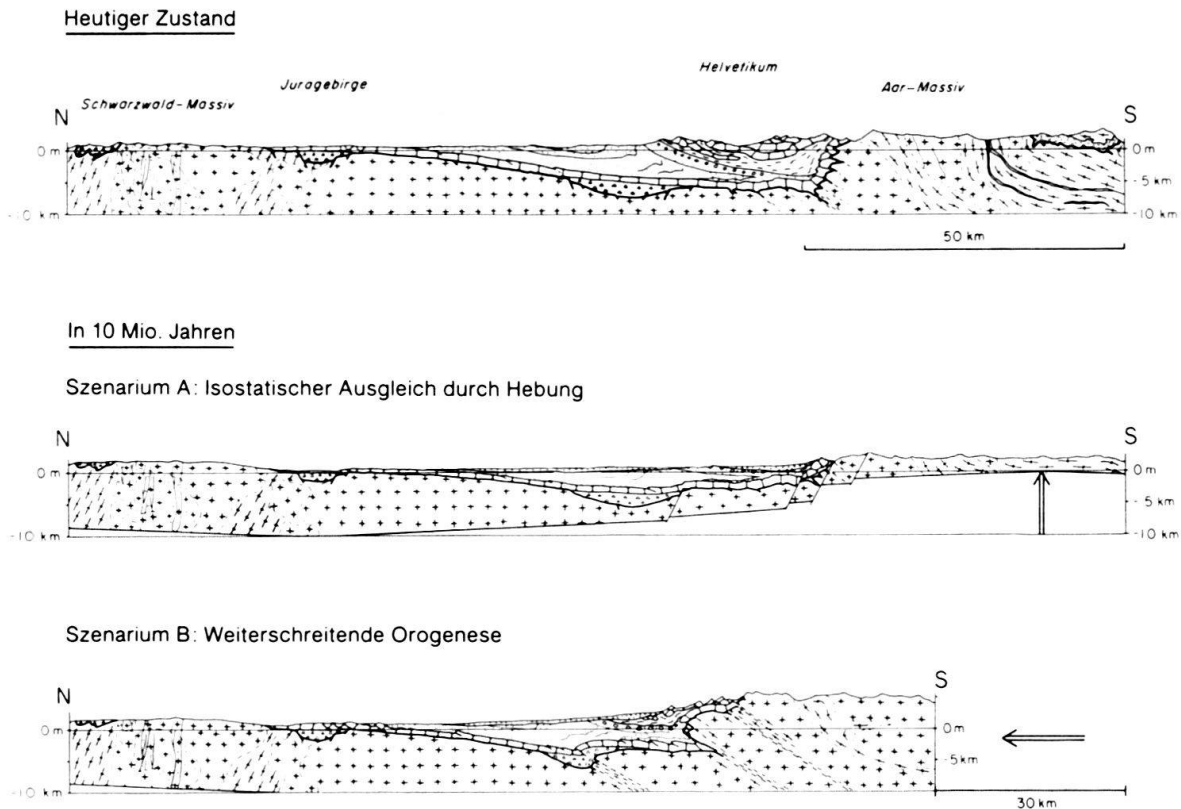


Fig. 7. Rahmenszenarien, Profil Schwarzwald-Alpen

rendsten Fälle, welche ein Endlager tangieren können, mitberücksichtigt sind. Für Sicherheitsbetrachtungen ist nicht das subjektiv wahrscheinlichste Modell ausschlaggebend, sondern dasjenige, welches im Endlagerbereich die ungünstigsten Veränderungen bewirken kann, aber immer noch plausibel ist.

Bis heute gibt es in der Schweiz keine präzisen geodätischen Messungen von Horizontalbewegungen über grössere Distanzen hinweg. Aus diesem Grund sind zwei Szenarien denkbar, die sich auf mögliche Krustenmodelle stützen, die im Einklang mit der Plattentektonik stehen (Fig. 7).

Obwohl die tatsächlichen Verhältnisse zweifellos viel komplizierter liegen als die auf Figur 7 skizzierten Modellvorstellungen, scheinen doch neueste Untersuchungsergebnisse, nicht zuletzt auch die Ergebnisse des neotektonischen Untersuchungsprogrammes, für eine noch nicht abgeschlossene Orogenese zu sprechen.

## 11. Organisation

Ein Stab von 20 Erdwissenschaftlern der Nagra plant und leitet das Untersuchungsprogramm. Ausgeführt wird es von über 200 Wissenschaftlern aus in- und ausländischen Hochschulinstituten, Bundesämtern und privaten Berater- und Spezialfirmen aus 9 Ländern (Schweiz, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, England, Dänemark, Schweden, USA, Kanada, Israel). Über 30 schweizerische und ausländische Experten beraten die Nagra bei der Planung, Leitung und Auswertung der Arbeiten. Zudem hat die Nagra Zusammenarbeitsverträge mit mehreren ausländischen Institutionen abgeschlossen, die

in ihren Ländern die gleiche Aufgabe wie die Nagra zu lösen haben. Damit ist gewährleistet, dass die Nagra jeweils auf dem weltweit neuesten Stand der Forschung und Entwicklung arbeitet.

## 12. Berichterstattung

Die Ergebnisse der für die Nagra ausgeführten Untersuchungen werden in der Publikationsreihe der Technischen Berichte der Nagra (NTB) publiziert und können bei der Nagra bezogen werden. Bis anhin sind über 180 Berichte erschienen. In über 50 Berichten werden die Untersuchungen und Auswertungen des geologischen Untersuchungsprogramms Nordschweiz dargelegt. Weitere 20 Berichte über dieses Programm sind in Vorbereitung.

Die Untersuchungsberichte der Tiefbohrungen erscheinen gleichzeitig als NTB und als Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, der Schweizerischen Geotechnischen Kommission.

Die Geologieberichte der Tiefbohrungen erscheinen gleichzeitig als NTB und als Geologische Berichte der Landeshydrologie und -geologie.

Die Rohdaten der Tiefbohrungen werden jeweils nach Veröffentlichung des Untersuchungsberichtes einer Bohrung bei der Landeshydrologie und -geologie deponiert.

Die gewonnenen Daten werden in einer zentralen Datenbank (MÜLLER et al. 1984a, 1984b) und in mehreren fachspezifischen Datenbanken gespeichert.

## 13. Die Weiterführung des geologischen Untersuchungsprogramms

Im Rahmen der langfristigen Zielsetzung der Nagra gehören die seit 1980 laufenden, in diesem Artikel dargestellten geologischen Untersuchungen in das Untersuchungsprogramm der Nagra für Endlager für hochradioaktive Abfälle.

Ziel dieses Untersuchungsprogramms ist es, die Inbetriebnahme eines schweizerischen Endlagers – falls erforderlich – bis zum Jahr 2020 zu gewährleisten. Das Programm gliedert sich in vier Phasen:

1980–1990 Phase 1	Regionale Untersuchungen und Einengung der Standortoptionen
1991–1995 Phase 2	Detaillierte Untersuchungen an bis zu drei Standorten und Wahl eines definitiven Standortes
1995–2005 Phase 3	Detaillierte Standortuntersuchungen mit einem Versuchsschacht und unterirdischem Labor am ausgewählten Standort
2005–2020	Erstellung des Endlagers

Die geologischen Untersuchungen der Phase 1 werden in den nächsten Jahren abgeschlossen. Zur Zeit laufen die Auswertungs- und Synthesearbeiten. Geplant ist eine nächste Tiefbohrung in Siblingen (Kanton Schaffhausen) und allenfalls noch eine weitere Tiefbohrung.

Die Endlagermöglichkeiten in Sedimenten werden ebenfalls untersucht und diese Studien sind auf das ganze schweizerische Mittelland und den Jura ausgedehnt worden.

All diese Arbeiten sollen 1990 eine Beurteilung der Endlagermöglichkeiten in der Nordschweiz und die Festlegung von näher zu untersuchenden Standortgebieten erlauben.

## 14. Verdankungen

Die Autoren danken im Namen der Nagra den über 200 Wissenschaftlern, die als Mitarbeiter, Berater und Experten dazu beigetragen haben, dass das im vorliegenden Artikel dargestellte Untersuchungsprogramm in wenigen Jahren bis zu seinem heutigen Stand durchgeführt werden konnte.

Das Programm umfasst zahlreiche wissenschaftliche und technische Pionierarbeiten, die zum Teil nur unter grösstem persönlichen Einsatz erfolgreich durchgeführt werden konnten. Dafür sei allen am Programm Beteiligten unser spezieller Dank und unsere Anerkennung ausgesprochen.

Möge der objektive Dialog zwischen Erdwissenschaftlern der verschiedensten Fachrichtungen weiterhin dazu beitragen, dass die projektbezogenen Fragestellungen einer Abklärung näher gebracht werden können.

### LITERATURVERZEICHNIS

- BALDERER, W. (1985): Sondierbohrung Böttstein – Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-06. Nagra, Baden.
- BECKER, A., BLÜMLING, P., & MÜLLER, W. H. (1984): Rezentens Spannungsfeld in der zentralen Nordschweiz. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-37. Nagra, Baden.
- DEICHMANN, N., & RENGGLI, K. (1984): Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz Teil 2: Seismizität, Januar 1983 – September 1984. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-12. Nagra, Baden.
- DIEBOLD, P., & MÜLLER, W. H. (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. – Nagra Techn. NTB 84-26. Nagra, Baden.
- FISCHER, G., SCHNEGG, P.-A., & LE QUANG, B. V. (1984): Programme d'Etudes Géophysiques du Nord de la Suisse: Sondages Magnétotelluriques Pilotes 81. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-13. Nagra, Baden.
- FROMM, G., DRIESSEN, L., & LEHNEN, I. (1985): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Refraktionsseismische Messungen 84. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-43. Nagra, Baden.
- GRISAK, G. E., PICKENS, J. F., BELANGER, D. W., & AVIS, J. D. (1985): Hydrogeologic Testing of Crystalline Rocks During the Nagra Deep Drilling Program. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-08. Nagra, Baden.
- GUBLER, E., SCHNEIDER, D., & KELLERHALS, P. (1984): Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-17. Nagra, Baden.
- HALDIMANN, P., NAEF, H., & SCHMASSMANN, H. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-16. Nagra, Baden.
- HAUG, A. (1985): Feldmethoden zur Grundwasserentnahme aus Tiefbohrungen und zur hydrochemischen Überwachung der Bohrspülung. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-07. Nagra, Baden.
- ISLER, A., DRES, P., KELLERHALS, P., & HAEFFELI, Ch. (1984): Beurteilung der Satellitenbild-Lineamente im Raume Baden–Frick–Laufenburg–Zurzach. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-28. Nagra, Baden.
- KIMMEIER, F., PERROCHET, P., ANDREWS, R., & KIRALY, L. (1985): Simulation par Modèle Mathématique des Ecoulements Souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire – Partie A: Modèle Régional – Partie B: Modèle Local (Nord de la Suisse). – Nagra Techn. Ber. NTB 84-50. Nagra, Baden.
- KIRALY, L. (1984): FEM 301 – A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-49. Nagra, Baden.
- KLINGELÉ, E., & SCHWENDENER, H. (1984): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Gravimetrische Messungen 81/82. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-22. Nagra, Baden.
- KLINGELÉ, E., SCHWENDENER, H., & HEIM, Ch. (1984): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Aeromagnetische und bodenmagnetische Messungen 81. – Nagra Techn. Ber. NRB 84-14. Nagra, Baden.
- LAUBSCHER, H. P. (1986): Expertenbericht zum Projekt Gewähr: Struktur des Grundgebirges und des Paläozoikums der Nordschweiz (unveröff.).
- LEECH, R. E. J., KENNEDY, K. G., & GEVAERT, D. (1984): Sondierbohrung Böttstein – Hydrogeologic testing of crystalline rocks. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-09. Nagra, Baden.



- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Techn. Ber. NTB 86-01. Nagra, Baden (im Druck).
- MAYER-ROSA, D., DIETIKER, M., DEICHMANN, N., RENGGLI, K., BRÄNDLI, J., STUDER, J., & RUTISHAUSER, G. (1984): Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz Teil 1: Technische Unterlagen, Stationsnetz. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-11. Nagra, Baden.
- MÜLLER, W. H., SCHNEIDER, B., & STÄUBLE, J. (1984a): NAGRADATA – Code-Schlüssel – Geologie. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-02. Nagra, Baden.
- (1984b): NAGRADATA – Benutzerhandbuch. Band 1. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-03. Nagra, Baden.
- Nagra (1985): Sondierbohrung Böttstein – Untersuchungsbericht: Textband, Beilagenband A, Beilagenband B. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-01. Nagra, Baden.
- PAVONI, N. (1984): Seismotektonik Nordschweiz. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-45. Nagra, Baden.
- PEARSON, F. J. (1985): Sondierbohrung Böttstein – Results of hydrochemical investigations: Analysis and Interpretation. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-05. Nagra, Baden.
- PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H.-R., & GAUTSCHI, A. (1986): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-02. Nagra, Baden.
- PICKENS, J. F., BELANGER, D. W., & SAULNIER, G. J. (1985): Analysis of pressure and flow data from the long-term monitoring tool in Böttstein borehole. – Techn. Ber. NTB 85-39. Nagra, Baden.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W., & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-21. Nagra, Baden.
- SCHNEIDER, A., & SCHLANKE, S. (1986): Sondierbohrung Böttstein, Schafisheim, Weiach, Kaisten, Riniken – Langzeit-Beobachtung der Tiefengrundwässer. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-11. Nagra, Baden.
- SIERRO, N., BINDSCHÄDLER, A., ANSORGE, J., & MÜLLER, St. (1983): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz – Regionale Refraktionsseismische Messungen – Nagra Techn. Ber. NTB 83-21. Nagra, Baden.
- SPRECHER, C., & MÜLLER, W. H. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82. – Nagra Techn. Ber. NTB 84-15. Nagra, Baden.
- THURY, M. (1980): Erläuterungen zum Nagra-Tiefbohrprogramm als vorbereitende Handlung im Hinblick auf das «Projekt Gewähr». – Nagra Techn. Ber. NTB 80-07. Nagra, Baden.
- WEBER, H. P., SATTEL, G., & SPRECHER, C. (1986): Sondierbohrungen Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern – Geophysikalische Daten, Textband. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-50. Nagra, Baden.
- WITTEW, C. (1986): Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern – Probenahmen und chemische Analysen von Grundwässern aus den Sondierbohrungen. – Nagra Techn. Ber. NTB 85-49. Nagra, Baden.

