ZUSAMMENFASSUNG

Die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) hat 1980 in der Nordschweiz in einem rund 1'200 km^2 grossen Gebiet ein umfassendes geologisches Untersuchungsprogramm in Angriff genommen. Es soll die erdwissenschaftlichen Erkenntnisse beschaffen, welche notwendig sind, um die Eignung des Untergrundes zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zu beurteilen. Die vielfältigen Untersuchungen gliedern sich in ein Tiefbohrprogramm, eine geophysikalische Erkundung der regionalen Gesteins- und Strukturverhältnisse, ein hydrogeologisches Untersuchungsprogramm zur Abklärung der Wasserfliesswege im tiefen Untergrund und ein neotektonisches Untersuchungsprogramm zur Erkennung aktiver Erdkrustenbewegungen im Untersuchungsgebiet.

Die Sondierbohrung Schafisheim wurde als vierte und südlichste Bohrung des Tiefbohrprogramms durchgeführt. Die Bohrstelle (Koord. 653'620/246'760;421.2 m ü.M.) liegt auf dem Gebiet der Gemeinde Schafisheim, Kanton Aargau, rund 4 km südwestlich von Lenzburg. Die Bohrung weist eine Endtiefe von 2'006.5 m auf.

Mit der Sondierbohrung Schafisheim sollten die Sedimentschichten durchteuft und rund 500 m des kristallinen Grundgebirges erbohrt werden. Im Bohrloch sowie an Bohrkernen und Wasserproben war ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchzuführen. Mit modernsten Untersuchungsmethoden wurde versucht, die geologische Beschaffenheit des Untergrundes und die Tiefengrundwasserverhältnisse detailliert zu erfassen.

Die Bohrarbeiten wurden am 26.11.1983 begonnen und dauerten, mehrfach von wissenschaftlichen Untersuchungen unterbrochen, bis zum 29.6.1984. Weitere sehr umfangreiche Tests und Untersuchungen wurden in den darauffolgenden Monaten durchgeführt. Anschliessend wurde am 18.2.-24.2.1985 ein Mehrfachpackersystem zur Langzeitbeobachtung der Tiefengrundwässer eingebaut, das jedoch, da die Packer nach nur einmonatiger Betriebsdauer versagten, ausgewechselt werden musste. Das definitive Multipacker-System ist seit dem 22.6.1987 in Betrieb, und erlaubt die Beobachtung der hydraulischen Verhältnisse in der Unteren Süsswassermolasse, im oberen Muschelkalk, im Buntsandstein sowie in Teilen des Kristallins. Das geplante Untersuchungsprogramm konnte praktisch vollständig und grösstenteils erfolgreich durchgeführt werden.

Das Bohr- und Untersuchungsprogramm wurde von Mitarbeitern der Nagra unter Beizug von Beratern geplant und geleitet. An den Untersuchungen arbeiteten über 40 Hochschulinstitute, Beraterfirmen und Servicefirmen aus der Schweiz, der BRD, Frankreich, Grossbritannien, den Niederlanden, Kanada und den USA. Insgesamt waren über 150 Wissenschaftler und Techniker beteiligt.

Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate des Untersuchungsprogramms dar. Innerhalb der Reihe der Untersuchungsberichte (Tiefbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Leuggern, *Schafisheim*, Kaisten und Siblingen) sind ähnliche Sachverhalte und Datensätze zu vergleichbaren Darstellungen zusammengefasst. Dadurch können leicht Quervergleiche angestellt werden. Diesbezügliche Schlussfolgerungen sollen jedoch einem abschliessenden Synthesebericht vorbehalten bleiben. Die detaillierte Berichterstattung über einzelne Untersuchungen erfolgt in der Serie der Technischen Berichte der Nagra (s. NTB-Verzeichnis am Schluss dieses Berichts).

Geologischer Überblick

Der Bohrstandort Schafisheim liegt südlich des Faltenjuras, im Bereich der mittelländischen Molasse bzw. des stark übertieften Seetals. Dessen Felssohle wurde in einer Tiefe von -244 m angetroffen. Gleichzeitig liegt der Bohrplatz auch südlich des tief ins kristalline Grundge-

birge eingesenkten Nordschweizer Permokarbon-Troges.

Nach den quartären Lockergesteinen und 332 m Tertiär durchfuhr die Bohrung mehr als 900 m mesozoische Sedimente. Dadurch konnten lückenlose Bohrkerne aus den leicht verformbaren triadischen Evaporiten gewonnen werden, die bei der Entstehung des Faltenjuras als Hauptabscherungshorizonte gedient haben.

Das Kristallin wurde in einer Tiefe von 1'490 m angefahren und besteht mehrheitlich aus Biotit-Graniten und Syeniten, Monzoniten sowie Dioriten variszischen Alters.

Bohrtechnik

Als Bohranlage wurde eine vollelektrifizierte Anlage National 80B, SMG AS 300/40 mit Gullivermast eingesetzt. Sowohl in den Sedimenten wie im Kristallin kam mehrheitlich das konventionelle Rotary-Bohrverfahren zur Anwendung. Die Sedimente wurden teilweise, das Kristallin vollständig gekernt. Während im Dogger, im Lias, im Keuper und im Muschelkalk sowie im oberen Kristallin die Kerne mit dem konventionellen Doppelkernrohr entnommen wurden, kam im unteren Buntsandstein und obersten Kristallin ein Downhole-Motor zum Einsatz. Das untere Kristallin wurde mit dem Seilkernverfahren gekernt. Im oberen Sedimentabschnitt (bis 1'235 m) wurde mit Ton-Süsswasserspülung und darunter (bis 1'490 m) mit deionisiertem Wasser oder Ton-Salzwasserspülung gebohrt. Im Kristallin wurde ausschliesslich mit deionisiertem Wasser gespült. Das Kristallin blieb ab 1'694.70 m unverrohrt.

Beim konventionellen Kernbohrverfahren wurden in den Sedimenten und im Kristallin nahezu identische Bohrfortschritte erzielt. Der Kronenverbrauch war im Kristallin allerdings mehr als sechsmal höher als in den Sedimenten. Mit dem Seilkernverfahren wurde eine Vergrösserung des Bohrfortschritts um ca. 30%, bei einer gleichzeitig verbesserten Kernqualität und -gewinnung erreicht. Nicht bewährt hat sich der spülungsgetriebene Downhole-Motor, dessen Einsatz bei geringem Bohrfortschritt zu hohem Kronenverschleiss, niedrigem Kerngewinn und ausgesprochen schlechter Kernqualität führte. Diese schlechten Ergebnisse werden mit einem für den Betrieb der Turbine zu grossen Ringraum begründet.

Die räumliche Orientierung der Bohrkerne erfolgte ausschliesslich anhand von Sonic-Televiewer-Aufnahmen (SABIS). Diese Methode lieferte gesamthaft gute Resultate. Generell schlechte Bildqualitäten ergaben sich in Abschnitten mit nennenswertem Überprofil. Da sich ein solches vor allem auch im Bereich von stark zerklüfteten bzw. kataklastischen Zonen einstellte, konnten gerade diese, z.T. auch wasserführende Klüfte enthaltenden Bereiche in ihrer Raumlage nicht erfasst werden.

Auf der Endteufe von 2'006.5 m wies die Bohrung eine Abweichung von 7.6 m nach Süden und von 17.3 m nach Westen auf.

Die Arbeiten während der Testphase wurden vorerst noch mit der Bohranlage ausgeführt. Später erfolgte ein zweimaliger Einsatz einer Workover-Anlage des Typs "Franks Explorer III/200". Um ergänzende hydrologische Beobachtungen ausführen zu können, wurde in 4 Teufenbereichen die Verrohrung perforiert.

Geologie

Am Kernmaterial der Sondierbohrung Schafisheim wurden detaillierte und umfangreiche Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt. Sie umfassten neben stratigraphisch-sedimentologischen und mineralogisch-petrographischen Untersuchungen auch strukturgeologische sowie verschiedenartige petrophysikalische, geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen.

Die Sedimentstrecke gliedert sich in 576 m quartäre und tertiäre Sedimente und ein ca. 914 m mächtiges, aufgeschupptes Mesozoikum.

Das erbohrte Quartär umfasst Niederterrassen-Schotter, interglaziale (?) Seeablagerungen sowie verrutschte und versackte Molassepakete, die risszeitlichen (?) Fein- bis Mittelkiesen aufliegen. Das Tertiär besteht aus einer 322 m mächtigen Wechselfolge von Sandsteinen, Siltsteinen sowie untergeordneten Tonsteinen der

Unteren Süsswassermolasse und rund 10 m dikken Ablagerungen der Bohnerz-Formation.

Die mesozoische Schichtreihe kann gut mit derjenigen des nahen Aargauer Kettenjuras korreliert werden. Sie besteht grösstenteils aus mergeligen und tonigen Gesteinen mit eingeschalteten karbonatischen und evaporitischen Horizonten. Sie setzt mit verkarsteten Kalken der Wangener Schichten ein und wurde in 40 z.T. biostratigraphisch datierte Formationen und Members gegliedert. Besonders hervorzuheben ist eine längs einer Aufschiebungszone beobachtete Repetition des Muschelkalks sowie das Vorhandensein eines 73 m mächtigen Hauptrogensteins und einer ca. 38 m mächtigen Steinsalzschicht

Im Übergangsbereich Keuper/Muschelkalk (Lettenkohle) sowie innerhalb und unterhalb der Aufschiebungszone im Muschelkalk wurden Erdölindikationen festgestellt.

Der karbonatische Malm, der Hauptrogenstein sowie das gesamte Schichtpaket zwischen Opalinus-Ton und Oberen Sulfatschichten sind stark geklüftet. Die allermeisten Klüfte weisen Kluftbeläge auf, die überwiegend aus Tonmineralen, Anhydrit und/oder Calcit bestehen.

Hohe absolute und offene Porositäten (> 10%) wurden an Proben der Unteren Süsswassermolasse, des Schilfsandsteins und des Trigonodus-Dolomits gemessen. Die im Opalinus-Ton ermittelten absoluten Porositäten variieren von 2.6-6.3%.

Die Basis des Buntsandsteins besteht aus einem 25 cm mächtigen Basiskonglomerat. Zwischen diesem Basiskonglomerat und dem Kristallin ist ein 9 cm messender Horizont aus Verwitterungsgrus des liegenden Granits (sog. "Basement grit") entwickelt.

Das Schafisheimer Kristallin wird im oberen Teil aus Biotit-Granit und im unteren Teil aus Syeniten, Monzoniten und Dioriten aufgebaut. In diese Intrusivgesteine eingelagert ist eine geringmächtige Gneiszone. Die Syenite, Monzonite und Diorite besitzen gemäss den durchgeführten radiometrischen Altersbestimmungen ein Alter von 315 Mio. Jahren und sind von steil einfallenden Apliten und aplitischen Graniten durchschlagen, die geochemisch mit dem Biotit-Granit korreliert werden können. Die mafischen Gesteine sind mit den sog. "Durbachiten" des Nordschwarzwaldes vergleichbar.

Das Kristallin war wiederholt einer starken Spröddeformation unterworfen, die zu einer Kataklase von 90% der Granitstrecke und 60% der Syenitstrecke geführt hat.

Unter der Einwirkung zirkulierender Fluids (relativ salzarme H_2O-NaCl-Lösungen), kam es während der Abkühlung zu frühhydrothermalen Umwandlungen ("Chlorit-Sericit-Phase"), wobei Biotit und Hornblende sowie Pyroxen in Chlorit und Plagioklas in Sericit umgewandelt wurden. Die Umwandlungen erfolgten unter retrograden Bedingungen, bei Temperaturen von 300-400°C und ziemlich geringer Überlagerung (wenige km).

Eine starke Durchdringung mit salzreichen, $CaCl_2$-betonten, hydrothermalen Fluids führte bei auf 100-300°C abgesunkenen Temperaturen dann zu einer weitgehenden Albitisierung der Plagioklase sowohl in den Graniten wie in den Syeniten und Monzoniten. Im Vergleich zu den Graniten der Bohrungen Böttstein und Leuggern sind Vertonungserscheinungen sehr untergeordnet.

Vor der Ablagerung des untertriadischen Buntsandsteins war das Kristallin einer schwachen Oberflächenverwitterung ausgesetzt.

Über 98% der Kristallinklüfte sind geschlossen und mit hydrothermalen Neubildungen mehr oder weniger vollständig verheilt. Die Füllungen werden von Tonmineralen, Calcit, Chlorit sowie Biotit dominiert. Offene Klüfte bzw. drusige Hohlräume wurden in den Graniten und Apliten insgesamt 209 und in den Dolomiten 55 festgestellt, die aber nur z.T. aktive Wasserfliesspfade repräsentieren.

Sowohl im Kristallin wie auch in den Sedimenten wurden im übrigen die Zusammensetzung der Tonminerale, die Gesteinschemismen

(Haupt- und Spurenelemente), das Kationenaustauschvermögen, die Gesteins- und Korndichten, die spezifischen Oberflächen und die Wärmeleitfähigkeit etc. bestimmt, um insbesondere auch Grunddaten bezüglich der Rückhaltung von Radionukliden im Gestein zu erhalten.

Bohrlochgeophysik

In der Sondierbohrung Schafisheim wurde ein umfassendes bohrlochgeophysikalisches Untersuchungsprogramm durchgeführt. Der dadurch gewonnene Datensatz wurde mit den Resultaten der Bohrkernanalyse und den im Bohrloch durchgeführten Tests verglichen. Dies ermöglichte es, detaillierte Informationen auch in Abschnitten mit Kernverlusten und in Meisselstrecken zu erhalten.

Die gefahrenen petrophysikalischen Logs der Firma Schlumberger erwiesen sich im Sedimentbereich erwartungsgemäss als sehr gut geeignet, um die wichtigsten Formationsparameter "in situ" zu erfassen. Damit konnte auch in den gemeisselten Strecken ein detailliertes Bild der lithologischen Verhältnisse erhalten werden.

Einer Unterscheidung der kristallinen Gesteine waren dagegen sehr enge Grenzen gesetzt. Es existieren nämlich zu wenig Logs mit voneinander unabhängiger Information, die eine quantitative Bestimmung der 4 bis 5 im jeweiligen Gestein dominierenden Minerale (Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Biotit und Hornblende/Klinopyroxen) erlauben würden.

Anhand der Logdaten der Dipmetersonde war es möglich, die Raumlage der Schichtflächen und Klüfte der Sedimente rechnerisch zu ermitteln. Im Kristallin dagegen gestaltet sich eine analoge Auswertung schwierig, da sich die Klüfte nur bedingt von Kataklasiten und Schieferungsflächen unterscheiden lassen.

Die bohrlochseismischen Messungen lieferten die Grundlagen für die Absoluteichung des Sonic-Logs. Sie ermöglichen damit eine präzise und zuverlässige Interpretation der seismischen Oberflächendaten.

Die Auswertung der geothermischen Daten zeigt wiederum eine Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und seismischer Geschwindigkeit auf. Der mittlere Gradient kann in Schafisheim mit durchschnittlich 41°C/km angegeben werden.

Hydrogeologie

Im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen in der Sondierbohrung Schafisheim wurden die wasserführenden Schichten und Zonen der Sedimente bzw. des Kristallins mit Pumpversuchen und Packertests untersucht. Damit sollten die Druckspiegelhöhen, die hydraulischen Durchlässigkeiten und eventuell die Speicherkoeffizienten der untersuchten Zonen bestimmt werden. Ergänzt wurden diese Tests durch Fluid-Logging (Leitfähigkeits-, Temperatur- und Spinner Flowmeter-Logs) im Muschelkalk, Buntsandstein und im Kristallin, um innerhalb der untersuchten Bohrlochabschnitte diskrete Zonen erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit zu lokalisieren. Abschliessend wurde ein Multipacker-System installiert, das eine Langzeitbeobachtung der hydraulischen Verhältnisse in der Unteren Süsswassermolasse, im Muschelkalk-Aquifer, am Übergang Buntsandstein/Kristallin sowie im Kristallin ermöglicht.

Durch Aufschiessen der Verrohrung zwischen 553-563 m konnte der unterste Teil der Unteren Süsswassermolasse hydraulisch getestet werden. Der aus Silt- und Sandsteinen aufgebaute Abschnitt weist eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von $K = 5 \times 10^{-8}$ m/s auf. Die Durchlässigkeit der Sandsteinhorizonte kann somit auf $K \geq 10^{-7}$ m/s geschätzt werden. Die entsprechende ungestörte Druckspiegelhöhe beträgt 375 m ü.M. ± 5 m (Terrainhöhe = 421.2 m ü.M.).

Im Dogger wurde nur der untere, von Tonen dominierte Teil (Sowerbyi-Sauzei-Schichten bis Opalinus-Ton) getestet. Sämtliche hier ausgeführten Doppelpackertests ergaben sehr geringe Durchlässigkeiten von weniger als 5×10^{-13} m/s.

Der Lias wies, obwohl im Arietenkalk s.l. mehrere offene Klüfte beobachtet wurden, ebenfalls eine sehr geringe Durchlässigkeit von

$\leq 3x10^{-13}$ m/s auf. Die ungestörte Druckspiegelhöhe konnte weder im Dogger noch im Lias bestimmt werden.

Der Gansinger Dolomit und der Schilfsandstein (Keuper) wurden mit einem Doppelpackertest getestet, der für den Nahbereich des Bohrlochs einen K-Wert von $1x10^{-11}$ m/s und für den etwas entfernteren Gesteinsbereich einen solchen von $1x10^{-13}$ m/s ergab.

Im Muschelkalk-Aquifer (Trigonodus-Dolomit bis zum Dolomit der Anhydrit-Gruppe) oberhalb der Aufschiebungszone wurde ein Pumpversuch und ein Casing-Test durchgeführt, die eine Durchlässigkeit von K = $1x10^{-7}$ m/s bzw. $5x10^{-8}$ m/s aufzeigten. Die anhand dieser Tests und der Langzeitbeobachtung mit dem Multipacker-System abgeschätzte Druckspiegelhöhe liegt bei 431 m ü.M. ± 2 m. Der Muschelkalk-Aquifer ist somit gespannt und artesisch.

Im Muschelkalk unterhalb der Aufschiebungszone fehlt mit dem Trigonodus-Dolomit der im allgemeinen durchlässigste Teil des Aquifers. Die drei hier durchgeführten Doppelpackertests ergaben denn auch alle mittlere Durchlässigkeiten von K $\leq 5x10^{-12}$ m/s.

Der im Buntsandstein durchgeführte Einfachpackertest, der überdies noch 2.2 m Wellendolomit und 10.5 m Kristallin erfasste, ergab eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von $6x10^{-10}$ m/s und eine Transmissivität T = $1.5x10^{-8}$ m^2/s. Damit in Einklang stehen die an zwei Sandsteinproben gemessenen, relativ geringen, totalen offenen Porositäten von 2.2% bzw. 4.9%. Die dazugehörige Druckspiegelhöhe liegt bei 364 m ü.M., bei einem möglichen Fehler von etwa ± 3 m. Der Buntsandstein-Aquifer ist somit gespannt, aber nicht artesisch.

Die im Kristallin durchgeführten zahlreichen Packertests und die Resultate des Fluid-Loggings ergeben eine durchschnittliche hydraulische Durchlässigkeit von K = $3.1x10^{-7}$ bis $2.6x10^{-8}$ m/s. Dieser Wert ist allerdings nur von begrenzter Aussagekraft, da sich die Wasserführung auf zahlreiche diskrete Wassereintrittsstellen längs offenen Klüften und Störungszonen konzentriert. Die Gesamttransmissivität des Kristallins (T = $1.6x10^{-4}$ - $1.3x10^{-5}$ m^2/s) ist zum grössten Teil durch derartige Zonen erhöhter Durchlässigkeit bedingt. Hydraulische Einzeltests in den permeableren Zonen ergaben Werte bis maximal K = $5x10^{-6}$ m/s und in den dazwischen liegenden Abschnitten solche von K $\leq 1x10^{-11}$ m/s. Die anhand der Packertests und der Langzeitbeobachtung mit dem Multipacker-System festgestellten ungestörten Druckspiegelhöhen liegen zwischen 362-368 m ü.M.. Sie liegen somit auf etwa gleicher Höhe oder unterhalb derjenigen des Buntsandsteins. Als bester Schätzwert für das gesamte Kristallin kann eine Druckspiegelhöhe von 362 m ü.M. angenommen werden. Die Kristallinwässer sind somit gespannt, aber nicht artesisch.

Hydrochemie

Zur Abklärung des Chemismus und Alters der Tiefengrundwässer wurden aus den wasserführenden Zonen und Horizonten der Sondierbohrung Schafisheim zahlreiche Wasserproben entnommen. Der Anteil an Bohrspülung wurde dabei mit Hilfe von Markierungsstoffen (Tracern), die der Bohrspülung beigemischt worden sind, bestimmt. Durch den kombinierten Einsatz von Natrium-Fluorescein (Uranin) und Meta-Trifluormethylbenzoe-Säure (m-TFMBA) konnten die Vorteile beider Tracer - rasche Verfügbarkeit der Resultate bzw. hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse - optimal ausgenützt werden. Zudem standen Tritium-Analysen zur Verfügung. Die chemische Zusammensetzung und die gelösten Gase der Wasserproben wurden von spezialisierten Labors bestimmt. Des weiteren wurden umfangreiche Isotopenuntersuchungen durchgeführt. An den meisten Proben wurden 9 Hauptbestandteile, 27 Nebenbestandteile und Spurenstoffe, 14 physikalisch-chemische Parameter und 13 verschiedene Gase sowie bis zu 20 Isotope bestimmt. Zusätzliche spektrometrische Untersuchungen vervollständigen das Analysenprogramm.

Aus heutiger Sicht lassen sich die verschiedenen in der Sondierbohrung Schafisheim angetroffenen Tiefengrundwässer wie folgt charakterisieren:

Die oberste Probe stammt aus Sandsteineinschaltungen in der *Unteren Süsswassermolasse*, die einen kombinierten Poren- und Kluftgrund-

wasserleiter darstellen. Das hier entnommene Wasser stellt ein relativ stark mineralisiertes Na-Cl-Wasser (8.8 g/l) dar. Bezüglich Calcit wurde von einer Sättigung ausgegangen. An Quarz ist es ebenfalls gesättigt, und an Dolomit leicht untersättigt. Eine deutliche Untersättigung besteht an Chalcedon und eine sehr starke bezüglich Gips und Anhydrit. Trotz seiner vergleichsweise höheren Mineralisierung weist das vorliegende Wasser einen im Vergleich zu den Wässern der Bohrungen von Eglisau (= Untere Süsswassermolasse), Tiefenbrunnen (= Obere Meeresmolasse) und Weiach (= Malmkalke) sehr ähnlichen Chemismus auf.

Die Auswertung der ^{14}C-Bestimmungen deutet auf ein sehr junges, d.h. rezent infiltriertes Wasser hin. Mit dieser Folgerung im Widerspruch stehen allerdings die hohe Mineralisierung dieses Wassers sowie die δ^2H- und $\delta^{18}O$-Daten, die auf eine längerdauernde Wasser/Gesteins-Interaktion schliessen lassen.

Der oberhalb der Aufschiebungszone beprobte *Muschelkalk-Aquifer* (Trigonodus-Dolomit bis Dolomit des Mittleren Muschelkalks) führt ein sehr hoch mineralisiertes Na-(Ca)-Cl-SO_4-Wasser (15.3-16.3 g/l). Während der Bohrphase wurden hier erhöhte Methan-Konzentrationen und vereinzelt auch geringe Gehalte an höheren Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid gemessen. Diese Gase dürften mit den Erdölspuren in Verbindung stehen, die im Bereich der Aufschiebungszone beobachtet wurden. Zudem wurde auch ein erhöhter Schwefelwasserstoffgehalt festgestellt. Beim Muschelkalkwasser ist eine Sättigung an Calcit anzunehmen. Die Modellrechnungen haben ferner eine deutliche Untersättigung an Dolomit und eine leichte Untersättigung an Gips und Anhydrit ergeben. Das Wasser aus dem Oberen Muschelkalk ist zudem deutlich übersättigt an Quarz und gesättigt an Chalcedon.

Anhand der gemessenen δ^2H- und $\delta^{18}O$-Werte sowie der Edelgasbestimmungen kann, unter der Voraussetzung heutiger Klimabedingungen, auf ein auf einer Höhe von 790-900 m ü.M. gelegenes Einzugsgebiet und eine Infiltrationstemperatur von 7°C geschlossen werden. Die Sulfatisotopenbestimmungen zeigen, dass das gelöste Sulfat gegenüber typischen Muschelkalksulfaten an ^{34}S stark angereichert ist.

Ein ^{14}C-Modellalter wurde nicht bestimmt. Anhand der ^{39}Ar-Aktivität lässt sich aber auf eine Verweildauer von mehr als 800 Jahren schliessen. Dieser Wert muss, da eine Untergrundproduktion an ^{39}Ar nicht ausgeschlossen werden kann, als Mindestverweildauer angesehen werden.

Die dem *Buntsandstein* und dem *Kristallin* entnommenen Proben ergaben ähnliche hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungsergebnisse.

Beim Wasser aus dem Übergangsbereich Buntsandstein/Kristallin handelt es sich um ein sehr hoch mineralisiertes Na-(Ca)-Cl-SO_4-Wasser (14.9-16.3 g/l). Das aus einer mittleren Tiefe von 1'571.1 m im Kristallin entnommene Wasser ist mit 8.2-8.3 g/l etwas weniger, aber immer noch stark mineralisiert und wurde als Na-(Ca)-Cl-SO_4-(HCO_3)-Wasser klassiert. Bei dem aus 1'887.9 m Tiefe geförderten Wasser handelt es sich um ein Na-Cl-(SO_4)-(HCO_3)-Wasser mit einer Mineralisierung von 8.3-8.6 g/l.

Für das Wasser aus dem Übergangsbereich wurde bezüglich Calcit Sättigung angenommen. Für Anhydrit zeigte sich eine leichte, für Chalcedon und Gips eine etwas stärkere Untersättigung. Eine deutliche Untersättigung besteht bezüglich Dolomit.

Im Kristallin nimmt die Untersättigung bezüglich Gips und Anhydrit mit zunehmender Tiefe stark zu. Beim Quarz besteht hier eine leichte Übersättigung und bezüglich Chalcedon leichte Untersättigung bis ungefähre Sättigung und bezüglich Dolomit eine deutliche Untersättigung.

Die δ^2H- und $\delta^{18}O$-Werte lassen analog zum Grundwasser aus der Unteren Süsswassermolasse, auf eine Wasser/Gesteinsinteraktion schliessen. Anhand der Edelgasanalysen wurden im Vergleich zu den übrigen Kristallinwässern der Nordschweiz relativ hohe Infiltrationstemperaturen von 10.4 und 10.9°C berechnet. Die Ergebnisse der $\delta^{18}O$- und $\delta^{34}S$-Bestimmungen am gelösten Sulfat der Proben aus 1'488.2 m (Buntsandstein/Kristallin) und 1'571.1 m Tiefe (Kristallin) deuten auf eine sedimentäre Herkunft hin. Beim Kristallinwasser aus 1'887.9 m

Tiefe dagegen handelt es sich wahrscheinlich um eine Mischung aus kristallinem und sedimentärem Sulfat.

Die Kristallinwässer von Schafisheim weisen hohe Cl-Gehalte (2.4-6.4 g/l) auf, die für Wässer sedimentärer Herkunft typisch sind. Auch aufgrund der Ergebnisse der ^{36}Cl-Bestimmungen kann eine sedimentäre Herkunft angenommen werden. Die durchschnittliche Verweilzeit dieser Chloridlösungen im Kristallin wurde mit max. 60'000 Jahren (Probe 1'571.1 m) bzw. 135'000±60'000 Jahren (Probe 1'887.9 m) errechnet.

Das ^{14}C-Modellalter ergab bei der Buntsandstein/Kristallin-Probe einen Wert von mehr als 21'000 Jahren und bei der entsprechenden Probe aus dem Kristallin bei 1'887.9 m mehr als 31'000 Jahre. Da der geringe ^{14}C-Gehalt durchaus auch auf die Kontamination durch Bohrspülung zurückgehen könnte, ist das Modellalter als Mindestalter aufzufassen.

Aufgrund der geologischen und hydrochemischen Verhältnisse kann eine Herkunft der Buntsandstein- und Kristallinwässer aus dem Permokarbon-Trog in Betracht gezogen werden.

Die Wasserfliesssysteme im Kristallin von Schafisheim

Das Kristallin der Sondierbohrung Schafisheim ist praktisch im gesamten durchbohrten Abschnitt von einer starken Kataklase und Klüftung erfasst worden. Seine Gesamttransmissivität beträgt 1.6×10^{-4} - 1.3×10^{-5} m^2/s bei einer mittleren hydraulischen Durchlässigkeit K = 3.1×10^{-7} bzw. 2.6×10^{-8} m/s. Dabei wechseln jedoch mächtige sehr gering durchlässige Gesteinspakete ($K \leq 10^{-11}$ m/s) mit relativ gut durchlässigen, 20-25 m dicken Zonen mit maximalen Werten von K = 5×10^{-6} m/s im Nahbereich der Bohrung.

Auf einer Bohrstrecke von total 517 m wurden 11 Zuflussstellen lokalisiert, deren Transmissivität bis zu 5×10^{-5} m^2/s beträgt. Aufgrund der geologisch-petrographischen Verhältnisse im Bereich der wasserführenden Zonen können grundsätzlich die folgenden zwei Fliesssystemtypen unterschieden werden:

- Fliesssystem A: umfasst wasserführende Zonen im Bereich kataklastischer Störungszonen

- Fliesssystem B: umfasst wasserführende Klüfte im Bereich von Apliten

Das Fliesssystem A ist über die ganze Bohrstrecke hinweg vertreten. Das an die Aplite gebundene Fliesssystem B dagegen tritt nur unterhalb 1'820 m Tiefe auf, da oberhalb dieser Grenze lediglich wenige und zudem geringmächtige Aplite erbohrt wurden.

Da die Aplite und Kataklasite eine sehr uneinheitliche räumliche Lagerung aufweisen, variiert die Orientierung der wasserführenden Klüfte ebenfalls sehr stark. Die grosse Variabilität der Richtungen lässt eine gute Verbindung zwischen den verschiedenen wasserführenden Zonen wahrscheinlich erscheinen. Entsprechend einheitlich ist denn auch die chemische und isotopische Zusammensetzung der darin zirkulierenden Wässer.

Die porosimetrischen Untersuchungen zeigten, dass die stärker deformierten Kristallinpartien höhere offene Porositäten, d.h. vor allem bedeutend mehr offene Mikroporen aufweisen als die weniger stark deformierten. Eine für Diffusionsprozesse relevante Verbindung zwischen den wasserführenden Klüften und der umgebenden Gesteinsmatrix besteht nur im Kreuzungsbereich mit kataklastischen Zonen und/oder Sprödrissen.

RÉSUMÉ

La Cédra (Société coopérative nationale pour l'entreposage des déchets radioactifs) a entrepris en 1980 un programme d'investigations géologiques important sur une aire d'environ 1'200 km^2 dans le nord de la Suisse. Ce programme doit permettre de définir si le sous-sol est approprié à l'entreposage définitif de déchets hautement radioactifs. Les diverses investigations peuvent se répartir en un programme de forages profonds, une reconnaissance géophysique de la nature et de la structure régionale des roches, un programme d'études hydrogéologiques axé sur la compréhension des écoulements souterrains dans le sous-sol profond, et un programme d'études néotectoniques destiné à la reconnaissance de mouvements encore actifs de la croûte terrestre dans la région d'investigation.

Le forage de Schafisheim est le quatrième des forages de reconnaissance profonds du programme. Le site se trouve sur le territoire de la commune de Schafisheim, dans le canton d'Argovie, à environ 4 km au sud-ouest de Lenzburg (coord. 653'620/ 246'760; alt. 421.20 m s.m.). Le forage atteint une profondeur de 2'006.5 m.

Le forage de Schafisheim devait permettre la reconnaissance de la couverture sédimentaire et d'une tranche d'environ 500 m du socle cristallin. Des investigations très poussées ont été menées dans le forage, sur les carottes et sur les échantillons d'eau prélevés. Les méthodologies les plus modernes ont été appliquées pour caractériser au mieux les paramètres géologiques et hydrogéologiques du sous-sol profond.

Les travaux de forage ont commencé le 26 novembre 1983 et se sont poursuivis jusqu'à fin juin 1984, avec plusieurs interruptions destinées aux études scientifiques. De nombreuses études, notamment des tests hydrauliques, se sont poursuivies dans les mois suivants. On a alors installé dans le forage, du 18 au 24 février 1985, un système à obturateurs multiples destiné à l'observation à long terme des niveaux piézométriques. Par la suite, ce système a dû être remplacé à cause de la rupture de certains obturateurs, après un mois de fonctionnement seulement. Le système définitif est en fonction depuis le 22 juin 1987. Il permet l'observation des niveaux piézométriques dans la Molasse d'eau douce inférieure (USM), le Muschelkalk supérieur, le Buntsandstein et une partie du cristallin. Le programme d'investigations prévu a pu être mené à bien presque en totalité et en grande partie de manière satisfaisante.

Le programme de forage et d'investigations a été établi et conduit par la Cédra, avec la participation de conseillers externes. Plus de 40 instituts universitaires, sociétés de conseils ou de services de Suisse, d'Allemagne fédérale, de France, de Grande-Bretagne, des Pays Bas, du Canada et des Etats Unis d'Amérique ont participé à ces travaux, soit au total plus de 150 scientifiques et techniciens.

Le présent rapport résume les principaux résultats du programme de recherches du forage de Schafisheim. Les programmes des autres forages profonds du nord de la Suisse (Böttstein, Weiach, Riniken, Leuggern, *Schafisheim*, Kaisten et Siblingen) sont traités et documentés de manière similaire, afin de faciliter le transfert et la comparaison des informations. Toutefois, les conclusions finales ne seront tirées que dans le cadre d'un rapport de synthèse. Des rapports detaillés ont été établis pour chacun des domaines d'investigation particuliers traités dans ce rapport (série des rapports techniques NTB de la Cédra, voir l'index en fin de rapport).

Aperçu géologique

Le forage de Schafisheim se trouve en bordure sud du Jura plissé, dans le domaine molassique et au sud du fossé permocarbonifère de la Suisse septentrionale. Par ailleurs, il est situé dans le Seetal, une vallée fortement surcreusée. C'est pourquoi le substratum rocheux se trouve à une profondeur de -244 m.

En dessous du Quaternaire et Tertiaire, le forage a traversé plus de 900 m de la série mésozoïque. Ainsi, on a obtenu des carottes complètes des evaporites triasiques qui sont facilement déformables. Ces dernières ont servi d'horizon de décollement lors de la formation du Jura plissé.

Le socle cristallin a été rencontré à 1'490 m de profondeur. Il est constitué principalement de granites à biotite, de syénites, de monzonites ainsi que de diorites, tous d'âge varisque.

Technique de forage

On a utilisé une installation de forage National 80B SMG AS 300/40, entièrement électrifiée, avec un mât Gulliver. Le forage a été fait en bonne partie au rotary, en mode conventionnel, aussi bien dans les séries sédimentaires que dans le cristallin. Ce dernier a été carotté en continu, et les sédiments en partie seulement. Dans le Dogger, le Lias, le Keuper, le Muschelkalk et la partie supérieure du cristallin, on a utilisé un carottier conventionnel à double tubage. Dans le Buntsandstein et dans la partie sommitale du cristallin, on a utilisé un carottier à moteur fonds de trou. Dans le reste du cristallin, on a employé un carottier à cable. Dans les séries sédimentaires supérieures (jusqu'à 1'235 m), le fluide de forage était une boue à l'eau douce. Plus bas (jusqu'à 1'490 m), on a utilisé une eau déionisée ou une boue à l'eau salée. Dans le cristallin, on a utilisé exclusivement une eau déionisée. Dès 1'694.70 m de profondeur, le cristallin est à parois nues (non tubées).

L'avancement au carottage conventionnel a été le même dans les sédiments et le cristallin, mais dans le cristallin on a utilisé six fois plus de couronnes. L'utilisation d'un carottier à cable a augmenté de 30 % la vitesse d'avancement, et fourni des carottes de meilleure qualité. Par contre, l'utilisation d'un carottier fonds de trou, mu par le fluide de circulation, s'est avéré non rentable: usure trop rapide des couronnes, faible taux de récupération des carottes et très mauvaise qualité de ces dernières. Ces mauvais résultats ont été attribués à un espace annulaire trop grand par rapport aux capacités de la turbine.

L'orientation spatiale des carottes a été effectuée exclusivement au moyen d'un télésondage acoustique (SABIS). Dans l'ensemble, cette méthode a livré de bons résultats. En général une mauvaise qualité d'image correspond aux tronçons à paroi excavée, que l'on rencontre avant tout dans les zones très fracturées ou cataclasées. C'est pourquoi ce sont justement ces zones, comprenant en partie des diaclases aquifères, que l'on n'a pu orienter spatialement.

A la profondeur finale de 2'006.5 m, le forage avait subi une déviation de 7.6 m vers le sud et de 17.3 m vers l'ouest.

La première phase des essais a été effectuée en cours de forage, au moyen de la tour de forage. Pour les essais subséquents, on a utilisé une tour de reconditionnement (workover rig) du type Frank Explorer III/200. Afin de compléter les observations hydrogéologiques, on a perforé le tubage du forage à 4 profondeurs différentes.

Géologie

Les carottes du forage de Schafisheim ont été soumises à des examens de terrain et de laboratoire nombreux et détaillés. Outre une description strati-sédimentologique et pétrominéralogique, ils ont porté également sur des éléments structuraux, pétrophysiques, géochimiques et isotopiques.

La série sédimentaire comporte 576 m de dépôts quaternaires et tertiaires, et environ 914 m de dépôts mésozoïques, dont la partie supérieure (environ 750 m) est chevauchante.

Le Quaternaire est constitué par des alluvions de terrasses basses ("Niederterrassen-Schotter"), des dépôts lacustres interglaciaires (?) et des paquets de molasse glissée ou écroulée, qui reposent sur des graviers rissiens (?) fins à moyens.

Le Tertiaire est composé d'une alternance de grès et de siltites, avec par endroits des argilites, sur 322 m d'épaisseur. Ces sédiments appartiennent à la molasse d'eau douce inférieure

(USM). Ils reposent sur 10 m de dépôts de la formation du minerai de fer pisolithique.

La série mésozoïque est comparable à celle du Jura plissé argovien tout proche. Elle se compose en grande partie de roches marneuses et argileuses, avec des intercallations d'horizons carbonatés ou évaporitiques. Elle débute par les calcaires karstifiés des "Couches de Wangen", et a été subdivisée en 40 formations et membres différents, en partie datés par la biostratigraphie. Il faut mentionner en particulier la répétition de la série du Muschelkalk due à une zone de failles inverses (chevauchement). On mentionnera aussi la présence du Hauptrogenstein sur 73 m d'épaisseur, et une couche de sel gemme d'environ 38 m de puissance.

Des indices de présence d'hydrocarbures ont été observés dans la zone de transition Keuper/ Muschelkalk ("Lettenkohle"), ainsi qu'à l'intérieur et en dessous de la zone de chevauchement dans le Muschelkalk.

Une fracturation importante a été observée dans le Malm calcaire, le Hauptrogenstein et dans l'ensemble de la série entre l'Argile à opalinum et les Couches sulfatées supérieures ("Obere Sulfatschichten"). Les fissures, en très grande majorité, contiennent un enduit de minéraux argileux, d'anhydrite et/ou de calcite.

Des valeurs élevées de la porosité totale et de la porosité efficace (> 10 %) ont été observées sur des échantillons de la molasse (USM), du Grès à roseaux et de la Dolomie à Trigonodus. Dans l'Argile à opalinum, on a déterminé des porosités totales de 2.6 à 6.3 %.

A la base du Buntsandstein, on trouve un conglomérat de base de 25 cm d'épaisseur. Entre ce conglomérat et le cristallin se trouve un horizon de sable grossier ("basement grit") de 9 cm d'épaisseur, résultant de l'altération du granite sous-jacent.

A Schafisheim, le cristallin est constitué d'un granite à biotite dans sa partie supérieure, et de syénites, monzonites et diorites dans sa partie inférieure. Une zone de gneiss peu épaisse est intercallée dans ces roches intrusives, qui d'après les datations radiométriques effectuées ont un âge de 315 millions d'années. Les roches mafiques (syénites, monzonites et diorites) sont traversées par des filons d'aplite et de granite aplitique très inclinés, qu'on peut corréler sur le plan géochimique avec le granite à biotite. Les roches mafiques sont comparables aux durbachites de la Forêt Noire septentrionale.

Le cristallin a été soumis à plusieurs reprises à une déformation rigide, qui a conduit à la cataclase de 90 % du tronçon de granite et 60 % du tronçon de syénite.

Le cristallin a subi une transformation hydrothermale (phase dite "chlorite-séricite") lors de son refroidissement, sous l'influence de la circulation de saumures assez peu minéralisées. Au cours de cette phase, la biotite, la hornblende et le pyroxène ont été transformés en chlorite, et les plagioclases en séricite. Ce métamorphisme rétrograde s'est déroulé sous des températures de 300 à 400°C et un enfouissement assez faible (quelques km).

Une phase de forte imprégnation par des fluides hydrothermaux très salins, de type $CaCl_2$, a eu lieu à des températures plus faibles (100-300°C). Elle a provoqué une albitisation des plagioclases aussi bien dans les granites que dans les syénites et monzonites. Par rapport aux granites des forages de Böttstein et de Leuggern, le cristallin du forage de Schafisheim présente peu de minéraux argileux diagénétiques.

Avant le dépôt du Buntsandstein, le cristallin a été soumis à une faible altération de surface.

Plus de 98 %, des fissures inventoriées dans le cristallin sont colmatées plus ou moins complètement par des néoformations hydrothermales (principalement des minéraux argileux, de la calcite, de la chlorite et de la biotite). On a dénombré en tout 209 fissures ouvertes (ou cavités vacuolaires) dans les granites et les aplites, et 55 dans les dolomies. Toutefois, une partie seulement de ces fissures constitue le réseau d'écoulement actif.

Dans les roches sédimentaires aussi bien que cristallines, on a aussi déterminé de nombreux paramètres tels que la composition des

minéraux argileux, la chimie des roches (éléments constitutifs et éléments traces), le pouvoir d'échange cationique, la densité des grains de la roche et de la roche totale, les surfaces spécifiques des grains et la conductivité thermique de la roche. Ces données ont servi en particulier à définir le pouvoir de rétention des radionuclides dans la roche.

Géophysique du forage

Le programme géophysique du forage de Schafisheim était très étendu. Les résultats acquis ont été comparés à ceux des analyses de carottes et à ceux des tests hydrauliques, ce qui a permis d'obtenir des informations détaillées également sur les portions de forage affectées par des pertes de carotte.

Les diagraphies pétrophysiques effectuées par la société Schlumberger se sont révélées très appropriées en roche sédimentaire, comme on pouvait s'y attendre. Elles ont permis de déterminer in situ les principaux paramètres caractérisant les diverses formations. Elles ont aussi permis la reconstruction d'un profil lithologique détaillé des sections forées au tricône.

Les diagraphies du cristallin se sont rélévées par contre insuffisamment explicites pour une classification lithologique. En effet, on dispose de trop peu de diagraphies basées sur des paramètres indépendants pour une détermination quantitative des 4 à 5 minéraux dominants de cette roche (quartz, plagioclase, feldspath potassique, biotite et hornblende/clinopyroxènes).

A partir des diagraphies de la sonde Dipmeter on est arrivé à calculer l'orientation des joints de stratification et des plans de diaclase. Dans le cristallin, par contre, un tel travail est délicat, car les plans de diaclase ne se distinguent pas forcément des structures cataclastiques et des plans de schistosité.

Les mesures sismiques dans le forage ont fourni les données d'étalonnage des diagraphies soniques. Elles ont ainsi permis une interprétation fiable et précise des données de la sismique réflection de surface.

Fondé sur l'interprétation des données géothermiques, le gradient géothermique moyen à Schafisheim est évalué à 41°C/km.

Hydrogéologie

Au cours des investigations hydrogéologiques du forage de Schafisheim, on a testé les niveaux aquifères des sédiments et du socle cristallin au moyen d'essais de pompage et de tests hydrauliques sur des intervalles isolés entre obturateurs. Ils avaient pour but de définir les pressions statiques, les conductivités hydrauliques (les "perméabilités") et éventuellement les coefficients d'emmagasinnement des intervalles examinés. Ils ont été complétés par des diagraphies du fluide de forage (conductivité électrique, température et vitesse d'écoulement), afin de localiser précisément les niveaux aquifères des tronçons examinés. Ensuite, on a installé dans le forage un système à obturateurs multiples, pour observer les pressions à long terme dans la Molasse d'eau douce inférieure, l'aquifère du Muschelkalk, la zone de transition du Buntsandstein au cristallin, et le cristallin.

Les perforations du tubage, effectuées entre 553 et 563 m, ont permis de tester hydrauliquement la partie basale de la Molasse d'eau douce inférieure. Ce tronçon, constitué de silts et grès, révèle une perméabilité moyenne de $5x10^{-8}$ m/s. On estime ainsi que la perméabilité des niveaux gréseux est supérieure ou égale à 10^{-7} m/s. Pour ce tronçon, le niveau piézométrique non perturbé, calculé pour une colonne d'eau douce de densité 1'000 kg/m^3 (equivalent freshwater head ou niveau piézométrique d'eau douce), se trouve à 375 $\pm$ 5 m s.m. (cote terrain = 421.2 m s.m.).

Dans le Dogger, seule la partie inférieure, riche en argiles (Couches à sowerbyi-sauzei), a fait l'objet de tests hydrauliques (à obturateur double). Tous ont indiqué une perméabilité inférieure à $5x10^{-13}$ m/s.

Le Lias a montré une perméabilité également très faible ($\leq 3x10^{-13}$ m/s), bien qu'on ait observé plusieurs fissures ouvertes dans le Calcaire à Arietites s.l.. On n'a pu déterminer le

niveau piézométrique d'eau douce ni dans le Dogger, ni dans le Lias.

Dans le Keuper, un test hydraulique a été effectué dans la Dolomie de Gansingen et le Grès à roseaux, révélant une perméabilité de 10^{-11} m/s au voisinage immédiat du forage, et de 10^{-13} m/s un peu plus loin dans la roche.

Dans l'aquifère du Muschelkalk situé en-dessus du chevauchement et comprenant la Dolomie à Trigonodus, le Hauptmuschelkalk et la dolomie du Groupe des anhydrites, on a effectué un essai de pompage et un test hydraulique dans le tubage perforé, qui ont fourni des perméabilités de $1x10^{-7}$ respectivement $5x10^{-8}$ m/s. Le niveau piézométrique d'eau douce de cet aquifère, déterminé à l'aide de ces tests et aussi à partir des observations à long terme du dispositif à obturateurs multiples, se trouve à 431 ± 2 m s.m. L'aquifère du Muschelkalk est ainsi en charge et artésien.

Dans la partie du Muschelkalk située en dessous du plan de chevauchement, la Dolomie à Trigonodus, généralement bien perméable, fait défaut. Les trois tests hydrauliques effectués dans cette zone indiquent une perméabilité inférieure à $5x10^{-12}$ m/s.

Le test hydraulique effectué dans le Buntsandstein, incluant également 2.2 m de la Wellendolomit et 10.5 m de cristallin, indique une perméabilité moyenne de $6x10^{-10}$ m/s et une transmissivité de $1.5x10^{-8}$ m^2/s. Ces valeurs sont compatibles avec les valeurs de porosité ouverte relativement faibles (2.2 % et 4.9 %) mesurées sur deux échantillons de grès. L'aquifère du Buntsandstein est en charge mais n'est pas artésien, avec un niveau piézométrique d'eau douce de 364 ± 3 m s.m.

Le cristallin est affecté de nombreuses diaclases ouvertes et zones de failles, auxquelles sont liées des venues d'eau. La transmissivité globale du cristallin, établie à partir de nombreux tests hydrauliques et valant de $1.6x10^{-4}$ à $1.3x10^{-5}$ m^2/s, est due en grande partie à ces zones de perméabilité élevée. C'est pourquoi la perméabilité moyenne de $3.1x10^{-7}$ à $2.6x10^{-8}$ m/s est à considérer avec prudence. Les zones perméables ont une perméabilité allant jusqu'à $5x10^{-6}$ m/s. Entre ces zones, elle reste inférieure à 10^{-11} m/s.

Les niveaux piézométriques d'eau douce établis à partir des observations à long terme, grâce au système d'obturateurs multiples, et à partir des tests hydrauliques en cours de forage, se situent entre 362 et 368 m s.m. et sont ainsi au même niveau ou inférieurs à ceux du Buntsandstein. Pour l'ensemble du cristallin, on peut admettre 362 m s.m. comme valeur la plus probable. Les eaux du cristallin sont ainsi en charge, mais pas artésiennes.

Hydrochimie

Afin de connaître le chimisme et l'âge des eaux souterraines profondes du forage de Schafisheim, on a procédé au prélèvement de nombreux échantillons d'eau provenant des horizons aquifères. On a calculé la contamination des échantillons par le fluide de forage à l'aide de traceurs introduits dans ce fluide. L'utilisation combinée de la fluorescéine de sodium (uranine) et de l'acide méta-trifluormethyl-benzoïque (m-TFMBA) a permi de tirer parti de l'avantage de chacun des traceurs, une analyse rapide d'une part, et une fiabilité optimale d'autre part. En outre, on disposait d'analyses de tritium. La composition chimique des gaz dissous dans les échantillons a été analysée par des laboratoires spécialisés. De plus, de nombreuses analyses isotopiques ont été effectuées. En tout, sur la plupart des échantillons, on a déterminé 9 composants chimiques principaux, 27 composants secondaires ou éléments traces, 14 paramètres physico-chimiques, 13 sortes de gaz et 20 éléments isotopiques. Des analyses spectroscopiques ont encore complété ce programme.

A l'heure actuelle, on peut caractériser comme suit les eaux souterraines rencontrées dans le forage de Schafisheim:

L'échantillon le moins profond provient des niveaux gréseux de la Molasse d'eau douce inférieure, qui représentent un aquifère à porosité d'interstices et porosité de fissures combinées. Cet aquifère contient une eau à minéralisation relativement forte (8.8 g/l), de type NaCl. On admet que cette eau est saturée

en calcite. Elle est saturée en quartz, et légèrement sous-saturée en dolomite. La sous-saturation est nette en ce qui concerne la calcédoine, et très prononcée pour le gypse et l'anhydrite. Malgré sa minéralisation plus élevée, cette eau présente un caractère chimique très semblable à celui des eaux des forages d'Eglisau (Molasse d'eau douce inférieure), de Tiefenbrunnen (Molasse marine supérieure) et de Weiach (calcaires du Malm).

Les valeurs de ^{14}C indiquent une eau très jeune, récemment infiltrée. Toutefois, la forte minéralisation de l'eau, ainsi que les valeurs de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{2}H$, indiqueraient plutôt un contact prolongé entre l'eau et la roche.

L'aquifère du Muschelkalk situé en dessus de la zone de chevauchement (de la Dolomie à Trigonodus à la dolomie du Muschelkalk moyen) a fourni une eau très minéralisée (15.3-16.3 g/l) de type Na-(Ca)-Cl-SO_4. Pendant la phase de forage, on a mesuré sur ce tronçon une concentration accrue en méthane, et çà et là de petites quantités d'hydrocarbures légers et de dioxyde de carbone. Ces gaz sont probablement liés aux traces d'hydrocarbure trouvées dans la zone de chevauchement. On a aussi constaté une teneur accrue en sulfure d'hydrogène. Dans le Muschelkalk, on admet que l'eau est saturée en calcite. Les calculs par modèle indiquent en outre une sous-saturation nette pour la dolomite, et légère pour le gypse et l'anhydrite. L'eau est en outre saturée en calcédoine, et nettement sursaturée en quartz.

D'après les teneurs en gaz rares et les valeurs de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{2}H$ mesurées et aux conditions climatiques actuelles, les eaux du Muschelkalk proviennent d'un bassin versant situé entre 700 et 900 m d'altitude, avec une température d'infiltration de 7°C. Les analyses des isotopes du sulfate révèlent, par rapport aux sulfates typiques du Muschelkalk, des valeurs fortement enrichies en ^{34}S.

On n'a pas tenté de dater ces eaux d'après le ^{14}C. Toutefois, d'après l'activité de ^{39}Ar, on peut conclure à un âge d'environ 800 ans. Comme on ne peut exclure une production de ^{39}Ar dans le sous-sol, il faut considérer cet âge comme un temps de transit minimum.

Les échantillons prélevés dans le Buntsandstein et le cristallin ont révélé un caractère semblable pour l'hydrochimie et l'hydrologie des isotopes.

L'eau provenant de la zone de transition entre le Buntsandstein et le cristallin est très minéralisée (14.9-16.3 g/l) et de type Na-(Ca)-Cl-SO_4. Celle provenant d'une profondeur moyenne de 1'571.1 m, dans le cristallin, est un peu moins minéralisée (8.2-8.3 g/l) et de type Na-(Ca)-Cl-SO_4-(HCO_3). Celle provenant d'une profondeur moyenne de 1'887.9 m est de type Na-Cl-(SO_4)-(HCO_3), avec une minéralisation de 8.3-8.6 g/l.

On admet que l'eau de la zone de transition est saturée en calcite. On y a observé une sous-saturation légère pour l'anhydrite, un peu plus prononcée pour le gypse et la calcédoine, et nette pour la dolomite.

Dans le cristallin, la sousaturation du gypse et de l'anhydrite croît fortement avec la profondeur. Le quartz reste légèrement sursaturé. La calcédoine passe d'une légère sous-saturation à la saturation, et la dolomite conserve une nette sous-saturation.

Les valeurs de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{2}H$ indiquent une interaction eau-roche, comme cela a également été constaté dans la Molasse d'eau douce inférieure. Les teneurs en gaz rares ont fourni des températures d'infiltration de 10.4 et 10.9°C. Ces valeurs sont élevées, par rapport à celles des autres eaux prélevées dans le cristallin du Nord de la Suisse. Les analyses de $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O$ du sulfate dissous des échantillons prélevés à 1'488.2 m (Buntsandstein/cristallin) et 1'571.1 m (cristallin) indiquent une origine sédimentaire de l'eau. Par contre, l'échantillon prélevé à 1'887.9 m de profondeur fournit des valeurs indiquant un mélange de sulfates d'origine sédimentaire et cristalline.

A Schafisheim, les eaux du cristallin ont une forte teneur en chlorures (2.4-6.4 g/l), ce qui est typique des eaux d'origine sédimentaire. Les analyses de ^{36}Cl indiquent également une origine sédimentaire pour les chlorures. On a déterminé pour ces derniers une durée moyenne de résidence dans le cristallin d'au maximum 60'000 ans pour l'échantillon à 1'571.1 m, et de

135'000±60'000 ans pour l'échantillon à 1'887.9 m.

D'après le modèle admis, les analyses de ^{14}C révèlent un âge d'au moins 21'000 ans pour les eaux du Buntsandstein/cristallin, et de plus de 31'000 ans pour les eaux du cristallin à 1'887.9 m. Comme la teneur faible en ^{14}C pourait tout à fait résulter d'une contamination par le fluide de forage, les âges ci-dessus sont à considérer comme des minima.

Au vu des conditions géologiques et hydrochimiques, il est tout à fait possible d'envisager que les eaux du Buntsandstein et du cristallin de Schafisheim proviennent du fossé permocarbonifère de la Suisse septentrionale.

Les systèmes d'écoulement dans le cristallin de Schafisheim

Le cristallin traversé par le forage de Schafisheim est affecté sur pratiquement toute sa longeur par une forte cataclase et fissuration. La transmissivité du tronçon cristallin peut aller de 1.6×10^{-4} m^2/s à $1.3 \times 10^{-5} m^2/s$, correspondant à une perméabilité moyenne de 3.1×10^{-7} à 2.6×10^{-8} m/s. Toutefois, on observe une alternance d'épaisses séquences à très faible perméabilité ($K \leq 10^{-11}$m/s) et de minces zones (20-25 m) à perméabilité élevée, au maximum 5×10^{-6}m/s au voisinage immédiat du forage.

Sur un tronçon total de 517 m, on a localisé 11 zones d'écoulement, dont la transmissivité peut aller jusqu'à $5 \times 10^{-5} m^2/s$. Les observations géologiques et pétrographiques au voisinage des zones aquifères permettent de distinguer en principe deux systèmes d'écoulement (au sens de milieu d'écoulement):

- Le système A comprend les zones aquifères au voisinage des systèmes de failles cataclastiques
- Le système B comprend les diaclases aquifères au voisinage des filons d'aplite.

Le système A se rencontre tout au long du tronçon cristallin. Le système B, par contre, se trouve confiné en dessous de 1'820 m de profondeur, là où les veines d'aplite sont nombreuses et épaisses.

Comme les aplites et les cataclasites, les fissures aquifères montrent une orientation très variable. Cette grande diversité d'orientation permet probablement une bonne liaison hydraulique entre les diverses fissures aquifères. C'est probablement la raison pour laquelle la composition chimique et isotopique des eaux prélevées dans ce milieu est assez homogène.

Les mesures porosimétriques ont montré que les parties du cristallin les plus déformées offrent une porosité ouverte plus élevée, due à la prèsence d'un plus grand nombre de micropores ouverts. Une connection significative pour les processus de diffusion entre les fissures aquifères et la matrice rocheuse environnante ne peut se développer qu'au croisement des zones cataclastiques et des zones à microfissures.

SUMMARY

In 1980, Nagra (the National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste) launched an extensive geological investigation programme covering an area of some 1,200 km^2 in Northern Switzerland. The aim of the programme was to collect the geological information necessary for assessing the suitability of the crystalline basement as a disposal medium for high-level radioactive waste. The wide range of investigations performed can be divided logically into a deep drilling programme, geophysical reconnaissance of the rock formations and structures in the region, a hydrogeological programme for investigating water flow paths deep in the bedrock and a neotectonic programme for identifying active crustal movements in the area.

The Schafisheim borehole was the fourth, and most southerly, in the deep drilling programme. The drill-site (coordinates 653'620/246'760; 421.2 m a.s.l.) lies within the community of Schafisheim in Canton Aargau, some 4 km to the south-west of Lenzburg. The final depth of the borehole was 2,006.5 m.

The aim of the Schafisheim borehole was to drill through the sedimentary overburden and around 500 m deep into the crystalline basement. A wide range of investigations was carried out in the borehole itself, as well as on drillcores and water samples. The most up-to-date methods were used to provide a detailed picture of the geology of the basement and the deep groundwater regime.

Drilling began on 26.11.1983 and continued, with regular interruptions for scientific investigations, until 29.6.1984. Extensive testing continued in the following months and a multipacker system was finally installed between 18.2.-24.2.1985, to allow long-term monitoring of the deep groundwaters. This system had to be replaced since the packers failed after only one month of operation. The definitive multipacker system has now been in operation since 22.6.1987 and allows hydraulic conditions to be observed in the Lower Freshwater Molasse (Untere Süsswassermolasse), the upper Muschelkalk, the Buntsandstein and sections of the crystalline. The investigation programme was carried out more or less completely as planned, and with a considerable degree of success.

The drilling and investigation programmes were planned and managed by Nagra employees with the cooperation of external advisers. More than 40 technical colleges, contractors and service companies from Switzerland, Germany, France, Great Britain, the Netherlands, Canada and the USA, representing a total manpower of more than 150 scientists and technicians, were involved in running the programmes.

This report is a summary of the most important results obtained during the course of the programme at Schafisheim. The series of investigation reports for the deep boreholes (Böttstein, Weiach, Riniken, Leuggern, *Schafisheim,* Kaisten and Siblingen) is structured in such a way that cross-comparisons can be made between the results and datasets for the different locations. The conclusions to be drawn from the data will be reserved for a final synthesis report. Detailed documentation of individual experiments is provided in Nagra's Technical Report series (see NTB list at the end of this report).

Geological overview

The Schafisheim drill-site is located to the south of the Folded Jura, in the region of the Plateau Molasse and the deeply scoured Seetal, the floor of which was encountered at a depth of -224 m. The drill-site also lies to the south of the Permo-carboniferous Trough of Northern Switzerland, which penetrates deep into the crystalline basement.

The sediment section comprise 576 m of Quarternary and Tertiary and more than 900 m

mesozoic sediments. As a result, it was possible to obtain intact drillcores from the slightly deformable Triassic evaporites, which served as the main décollement horizon during the formation of the Folded Jura.

The crystalline was encountered at a depth of 1,490 m and consists mainly of biotite-granites and syenites, monzonites and diorites, all of Variscan age.

Drilling technique

The drilling rig used was an all-electric National 80B, SMG AS 300/40 with Gulliver mast. The conventional rotary drilling system was used more or less without exception in both the sediments and the crystalline. Part of the sediment section and the whole of the crystalline section were cored. In the Dogger, the Lias, the Keuper, the Muschelkalk and the upper crystalline, cores were recovered using the conventional double tube core barrel, while a downhole motor was used in the lower Buntsandstein and the uppermost section of the crystalline. The wire line coring technique was used in the lower crystalline. A clay-freshwater drilling fluid was used in the upper sediment section (down to 1,235 m) and either deionised water or a clay-saltwater fluid in the deeper section (down to 1,490 m). The crystalline was drilled exclusively with deionised water and remained uncased from a depth of 1,694.70 m.

Drilling progress was more or less identical in the sediments and the crystalline with the conventional coring system. However, crowns wore out approximately six times faster in the crystalline than in the sediments. Use of the wire line coring system brought a 30% improvement in drilling progress, together with improved core quality and recovery. Use of the fluid-driven downhole motor gave unsatisfactory results - progress was slow, crowns wore out more quickly, core recovery was low and the quality of cores poor. This situation can be explained by the fact that the annular space was too large for effective operation of the turbine.

Spatial orientation of the drillcores was performed exclusively with sonic televiewer (SABIS) images. On the whole, this method gave good results, with poor image quality generally only in sections with significant overprofiling. Because this occurs mainly in the vicinity of strongly fractured or cataclastic zones, it was often impossible to determine the orientation of such sections, some of which contain water-bearing fractures.

At the final depth of 2,006.5 m, the borehole deviated 7.6 m to the south and 17.3 m to the west.

Investigations during the test phase were originally carried out using the drilling rig. Later in the programme, a "Franks Explorer III/200" workover rig was used on two occasions. The casing was perforated over 4 depth intervals to allow supplementary hydrological tests to be performed.

Geology

The core material from the Schafisheim borehole was the subject of an extensive field and laboratory investigation programme. Besides studies of stratigraphy-sedimentology and mineralogy-petrography, the programme also included investigations of structural geology, petrophysics, geochemistry and isotope geochemistry.

The sediment section can be divided into 576 m of Quaternary and Tertiary sediments and around 914 m of imbricated Mesozoic deposits.

The Quaternary includes "Niederterrassen-Schotter" (sandur gravels), interglacial (?) lacustrine deposits and slumped Molasse packets which overlie fine- to medium-grained gravels of the Riss (?) period. The Tertiary is made up of a 322 m-thick interstratification of sandstones, siltstones and secondary claystones of the Lower Freshwater Molasse (Untere Süsswassermolasse), and deposits of the bean ore (Bohnerz) formation which are around 10 m thick.

The Mesozoic series correlates well with that found in the nearby Aargau Folded Jura. It consists largely of marly and clayey rocks with intercalated carbonate and evaporitic horizons. The series begins with the karstified limestones

of the Wangen beds and was subdivided into 40 formations and members, some of which have been biostratigraphically dated. Particularly worthy of mention is a repetition of the Muschelkalk observed along a fault zone and the presence of a 73 m-thick Hauptrogenstein (roestone) formation, as well as a layer of rock salt around 38 m thick.

Indications of the presence of oil were found in the transition zone between the Keuper and the Muschelkalk (Lettenkohle), as well as within and below the fault zone in the Muschelkalk.

The carbonaceous Malm, the Hauptrogenstein and the whole layer package between the Opalinus clay and the Obere Sulfatschichten (upper sulphate beds) are all strongly fractured. Most of the fractures have incrustations consisting predominantly of clay minerals, anhydrite and/or calcite.

High absolute and open porosities (> 10%) were measured for samples from the Lower Freshwater Molasse, the Schilfsandstein and the Trigonodus Dolomite. The absolute porosities measured in the Opalinus Clay vary from 2.6-6.3%.

The base of the Buntsandstein consists of a 25 cm-thick basal conglomerate. Between this conglomerate and the crystalline, there is a 9 cm-thick horizon of weathering debris from the underlying granite (so-called "Basement grit").

The Schafisheim crystalline is made up of biotite-granite in the upper section and syenites, monzonites and diorites in the lower section. A narrow gneiss zone penetrates these intrusive rocks. According to the results of radiometric dating, the syenites, monzonites and diorites have an age of around 315 Ma and are penetrated by steeply-dipping aplites and aplitic granites; in terms of geochemistry these can be correlated with the biotite-granite. The mafic rocks can be compared with the so-called "durbachites" of the Northern Black Forest.

The crystalline was repeatedly subjected to intensive brittle deformation, which led to cataclasis of 90% of the granite section and 60% of the syenite section.

Under the influence of circulating fluids (relatively salt-depleted H_2O-NaCl solutions), the cooling phase was accompanied by early hydrothermal alterations ("chlorite-sericite phase"), with biotite, hornblende and pyroxene altering to chlorite and plagioclase altering to sericite. The alterations occurred under retrograde conditions, at temperatures of 300-400°C and with a fairly small overburden (a few km).

Extensive circulation of salt-rich $CaCl_2$ hydrothermal fluids at temperatures of 100-300°C led to extensive albitization of the plagioclase, both in the granites and in the syenites and monzonites. Compared with the granites in the Böttstein and Leuggern boreholes, evidence of argillation seems to be secondary at Schafisheim.

Prior to the deposition of the Lower Triassic Buntsandstein, the crystalline was exposed to slight surface weathering.

More than 98% of the crystalline fractures are closed and more or less completely healed by hydrothermal neoformations. The fracture infill materials are dominated by clay minerals, calcite, chlorite and biotite. A total of 209 open fractures and drusy cavities were identified in the granites and aplites, and a total of 55 in the dolomites. Not all of these represent active water flow-paths.

In both the crystalline and the sediments, detailed investigation of clay mineral composition, rock chemistries (main and trace elements), cation-exchange capacity, rock and grain densities, specific surfaces and thermal conductivity completed the data collection process and provided key information on retention of radionuclides in the rock.

Borehole geophysics

A comprehensive geophysical programme was carried out at Schafisheim. The resulting dataset was compared with the results of drillcore analyses and tests carried out downhole. In this way it was possible to provide detailed information, even for sections where core loss occurred or where bits were used for drilling.

As anticipated, the petrophysical logs run by the Schlumberger company proved highly suitable in the sediments for "in situ" determination of important formation parameters. It was thus possible to provide a detailed picture of lithological conditions, even in sections drilled with bits.

Distinguishing the crystalline rocks proved somewhat more difficult. There are too few logs providing independent information to allow a quantitative determination of the 4 or 5 minerals dominating in each rock (quartz, plagioclase, potassium feldspar, biotite and hornblende/ clinopyroxene).

The log data from the dipmeter tool were used to calculate the orientation of bedding planes and fractures in the sediments. A similar analysis is difficult in the crystalline since fractures cannot always be distinguished clearly from cataclasites and cleavage planes.

The borehole seismics measurements provided the basis for calibration of the sonic log, which allowed precise, reliable interpretation of surface seismics data.

Evaluation of the geothermal data again shows a correlation between thermal conductivity and seismic velocity. The mean gradient in Schafisheim can be taken as 41°C/km.

Hydrogeology

The hydrogeology programme at Schafisheim investigated the water-bearing strata and zones of the sediments and the crystalline using pumping tests and packer tests. The aim was to determine the hydraulic heads, permeabilities and, where possible, the storage coefficients of the zones being investigated. This was supplemented by fluid logging (conductivity-, temperature- and spinner-flowmeter-logs) in the Muschelkalk, Buntsandstein and crystalline, in order to locate discrete zones of enhanced permeability within the different borehole intervals. To complete the programme, a multipacker system was installed to allow long-term monitoring of hydraulic conditions in the Lower Freshwater Molasse, the Muschelkalk aquifer, at the Buntsandstein/crystalline transition and in the crystalline itself.

Perforation of the casing between 553 and 563 m enabled hydraulic testing to be carried out in the lowest section of the Lower Freshwater Molasse. This section, which is made up of silt- and sandstones, has an average hydraulic permeability of $K = 5x10^{-8}$ m/s. The permeability of the sandstone horizons can thus be estimated as $K \geq 10^{-7}$ m/s. The corresponding undisturbed hydraulic head is 375 m a.s.l. $\pm$ 5 m (ground surface = 421.2 m a.s.l.).

Only the lower part of the Dogger, which is dominated by clays (Sowerbyi-Sauzei beds to Opalinus Clay), was investigated. All the double packer tests carried out in this section gave very low permeabilities of less than $5x 10^{-13}$ m/s.

Although several open fractures were observed in the Arietenkalk in the broad sense, the Lias also had a very low permeability of $K \leq 3x 10^{-13}$ m/s. It was impossible to determine the undisturbed hydraulic head in both the Dogger and Lias.

The Gansingen Dolomite and the Schilfsandstein (Keuper) were investigated with a double packer test. This provided a K value of $1x 10^{-11}$ m/s for the close vicinity of the borehole and a value of $1x10^{-13}$ m/s for the rock formations at a greater distance from the borehole.

A pumping test and a casing test were performed in the Muschelkalk aquifer (Trigonodus Dolomite to Dolomite of the Anhydrite Group) above the fault zone. These gave permeabilities of $K = 1x10^{-7}$ m/s and $5x10^{-8}$ m/s respectively. The hydraulic head estimated from a combination of these tests and long-term monitoring with the multipacker system lies at 431 m a.s.l. $\pm$ 2 m. The Muschelkalk aquifer is thus confined and artesian.

In the Muschelkalk below the fault zone, the Trigonodus Dolomite, which is generally the most permeable formation in the aquifer, is absent. The three double packer tests carried out in this zone gave mean permeabilities of $K \leq 5x10^{-12}$ m/s.

The single packer test performed in the Buntsandstein, which also included 2.2 m of Wellendolomit (marine dolomite) and 10.5 m of crystalline, gave a mean hydraulic permeability of $6x10^{-10}$ m/s and a transmissivity of T = $1.5x10^{-8}$ m^2/s. This agrees well with the relatively low total open porosities of 2.2% and 4.9% measured for two sandstone samples. The corresponding hydraulic head is at 364 m a.s.l., with a potential error of $\pm$ 3 m. The Buntsandstein aquifer is thus confined but not artesian.

The numerous packer tests performed in the crystalline, together with the results of the fluid logging, gave an average hydraulic permeability of K = $3.1x10^{-7}$ to $2.6x10^{-8}$ m/s. The significance of this value is, however, somewhat restricted since water flow is concentrated at numerous discrete water inflow points along open fractures and disturbed zones. The total transmissivity of the crystalline (T = $1.6x10^{-4}$ - $1.3x10^{-5}$ m^2/s) is largely due to such zones of enhanced permeability. Single hydraulic tests in the more permeable zones gave values of a maximum K = $5x10^{-6}$ m/s and a value of K $\leq$ $1x10^{-11}$ m/s for the sections lying inbetween. The undisturbed hydraulic heads determined from packer tests and long-term monitoring with the multipacker system are between 362-368 m a.s.l. They therefore lie $\pm$ at the same level or below the heads of the Buntsandstein. A best estimate for the hydraulic head in the crystalline as a whole can be given as 362 m a.s.l. The crystalline waters are thus confined but not artesian.

Hydrochemistry

Numerous water samples were collected from the water-bearing zones and horizons of the Schafisheim borehole with a view to investigating the chemistry and the age of the deep groundwaters. The drilling fluid contamination of the samples was determined with the help of tracers. Combined use of the tracers sodium fluorescein (uranine) and meta-trifluoromethylbenzoic acid (m-TFMBA) allowed the advantages of both these marker substances - namely rapid availability and high reliability of results - to be exploited to the maximum. Tritium analyses were also available. Specialised laboratories measured the chemical composition and dissolved gas content of the water samples and extensive isotope investigations were also performed. For the majority of samples, 9 main components, 27 secondary components and trace substances, 14 physico-chemical parameters, 13 different gases and up to 20 isotopes were determined. Spectrometric investigations rounded off the analysis programme.

Based on information available at present, the different deep groundwaters encountered in the Schafisheim borehole can be characterised as follows:

The uppermost sample originated from the sandstone intercalations in the Lower Freshwater Molasse, which represent a combined pore- and fracture-groundwater aquifer. The water is a relatively strongly mineralised Na-Cl water (8.8 g/l) and calcite saturation was assumed. There is also saturation with respect to quartz and slight undersaturation with respect to dolomite. There is clear undersaturation with respect to chalcedony and very marked undersaturation with respect to gypsum and anhydrite. Despite its relatively high level of mineralisation, compared with the waters from the boreholes at Eglisau (= Lower Freshwater Molasse), Tiefenbrunnen (= Upper Marine Molasse) and Weiach (= Malm limestones) this water shows a very similar chemistry.

Analysis of ^{14}C measurements implies a very young, i.e. recently infiltrated, water. However, the high mineralisation of the water would appear to contradict this, as do the δ^2H and $\delta^{18}O$ values which imply a longer-duration water/rock interaction.

The Muschelkalk aquifer sampled above the fault zone (Trigonodus Dolomite to Dolomite of the Middle Muschelkalk) bears a very highly mineralised Na-(Ca)-Cl-SO_4 water (15.3-16.3 g/l). During the drilling phase, increased methane concentrations and, occasionally, low concentrations of hydrocarbons and carbon dioxide were measured. These gases could be linked to the presence of oil, which was observed in the vicinity of the fault zone. An increased presence of hydrogen sulphide was also observed. The Muschelkalk water is assumed to be saturated with calcite. Model calculations have also shown clear under-

saturation with respect to dolomite and slight undersaturation with respect to gypsum and anhydrite. The water from the Upper Muschelkalk is also clearly oversaturated with respect to quartz and saturated with respect to chalcedony.

Assuming present-day climatic conditions, measured δ^2H and $\delta^{18}O$ values and noble gas measurements give an altitude of 790-900 m a.s.l. for the infiltration zone and a recharge temperature of 7°C. The sulphate isotope measurements indicate that, compared with typical Muschelkalk sulphate, the dissolved sulphate in this case is strongly enriched in ^{34}S.

No ^{14}C model age was determined. The ^{39}Ar activity implies a residence time of more than 800 years, which must be seen as a minimum value since underground production of ^{39}Ar cannot be ruled out.

The samples collected from the Buntsandstein and the crystalline gave similar results for hydrochemistry and isotope hydrology.

The water from the transition zone between Buntsandstein and crystalline is a very highly mineralised Na-(Ca)-Cl-SO_4 water (14.9-16.3 g/l). The figure for the water sampled at an average depth of 1,571.1 m in the crystalline is somewhat lower (8.2-8.3 g/l), but still indicates a high level of mineralisation. The water in question was classified as an Na-(Ca)-Cl-(SO_4)-(HCO_3). The water sampled from a depth of 1,887.9 m is an Na-Cl-(SO_4)-(HCO_3) water with a mineralisation of 8.3-8.6 g/l.

Calcite saturation was assumed for the water from the transition zone. There is slight undersaturation with respect to anhydrite and more marked undersaturation with respect to chalcedony and gypsum. There is clear undersaturation with respect to dolomite. In the crystalline, the gypsum and anhydrite undersaturation increases markedly with increasing depth. Quartz is slightly oversaturated, chalcedony is slightly undersaturated to more or less saturated, and dolomite is clearly undersaturated.

Similarly to the case for the groundwater from the Lower Freshwater Molasse, the δ^2H and $\delta^{18}O$ values imply that water/rock interaction has occurred. The recharge temperatures of 10.4 and 10.9°C calculated using the noble gas analyses are relatively high compared to those for the other crystalline waters in Northern Switzerland. The results for $\delta^{18}O$ and $\delta^{34}S$ measurements on dissolved sulphate in samples from depths of 1,488.2 m (Buntsandstein/crystalline) and 1,571.1 m (crystalline) indicate a sedimentary origin. The crystalline water from 1,887.9 m, on the other hand, probably has a mixture of crystalline and sedimentary sulphate.

The crystalline waters of Schafisheim have high Cl contents (2.4-6.4 g/l) which are typical for waters of sedimentary origin. It is also possible to arrive at a sedimentary origin on the basis of the results of ^{36}Cl measurements. The average residence time of these chloride solutions in the crystalline was calculated to be a maximum 60,000 years (sample from a depth of 1,571.1 m) and 135,000±60,000 years (sample from a depth of 1,887.9 m).

The ^{14}C model age gave a value of more than 21,000 years for the Buntsandstein/crystalline sample and more than 31,000 years for the sample from a depth of 1 887.9 m in the crystalline. Since the low ^{14}C content could also be explained by contamination from the drilling fluid, the model age is to be seen as a minimum value.

Based on the geological and hydrochemical conditions encountered, it is possible that the Buntsandstein and crystalline waters originated in the Permocarboniferous Trough.

Water flow systems in the Schafisheim crystalline

The crystalline of the Schafisheim borehole shows evidence of strong cataclasis and fracturing over practically the entire drilled section. The overall transmissivity is 1.6×10^{-4} - 1.3×10^{-5} m^2/s, with an average hydraulic permeability of $K = 3.1 \times 10^{-7}$ and 2.6×10^{-8} m/s respectively. In the near vicinity of the borehole, thick packages of rock with very low permeability ($K \leq 10^{-11}$ m/s) alternate with relatively permeable zones (20-25 m thick) with maximum values of $K = 5 \times 10^{-6}$ m/s.

Over a drilled section totalling 517 m, 11 inflow points were located, with transmissivities up to $5x10^{-5}$ m^2/s. Based on the geological-petrographic conditions encountered in the vicinity of the water-bearing zones, the two following types of flow system can be distinguished:

- Flow system A: comprising water-bearing zones in the vicinity of cataclastic disturbed zones

- Flow system B: comprising water-bearing fractures in the vicinity of aplites.

Flow system A is represented over the whole drilled section. Flow system B, which is associated with the aplites, occurs only at depths below 1,820 m; above this depth only a few insignificant aplites were encountered.

Since the aplites and cataclasites have a very varied spatial orientation, the orientation of the water-bearing fractures also differs considerably. Based on the large variation in directions, it appears likely that there is a good connection between the different water-bearing zones. If this is the case, the chemical and isotopic composition of the waters circulating in these zones will be correspondingly uniform.

Porosimetric investigations indicate that the more strongly deformed crsytalline areas have high open porosities, i.e. they have significantly more open micropores than the less deformed areas. A connection between the water-bearing fractures and the surrounding rock matrix, which would be relevant for diffusion processes, exists only in the intersection zone with cataclastic zones and/or brittle fissures.