

Sondierbohrung Otterbach, Basel : der erste Schritt zur Entwicklung eines geothermischen Heiz-Kraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren

Autor(en): **Häring, Markus O.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **7 (2002)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-223643>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Sondierbohrung Otterbach, Basel. Der erste Schritt zur Entwicklung eines geothermischen Heiz-Kraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren

mit 6 Figuren

VON MARKUS O. HÄRING*

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts DEEP HEAT MINING wurde in Basel eine 2'755 m tiefe Sondierbohrung bis ins Dach des kristallinen Grundgebirges abgeteuft. Der Temperaturgradient über die durchteufte Strecke beträgt $4.0^{\circ}/100$ m was die gesetzten Erwartungen übertrifft. Das granitische Grundgebirge weist die erwünschten Klüftungen und Spannungsverhältnisse auf. Das Salz der Anhydritgruppe im Mittleren Muschelkalk übertrifft mit 176 m die Mächtigkeit der Salzvorkommen in Schweizerhalle um mehr als das Doppelte. Die Entdeckung einer 805 m mächtigen Rotliegend-Sequenz bringt neue Erkenntnisse über die permische Paläogeographie.

Mit der Bohrung wurden sämtliche gesetzten Ziele erreicht, was den Schritt in die nächste Phase des Projekts, eine erste Bohrung auf 5'000 m Tiefe, ermöglicht.

Abstract

The exploration well Otterbach is the first step in the geothermal exploration concept to develop a Hot-Dry-Rock cogeneration plant in Basle, Switzerland. The well drilled in the south-eastern Rhinegraben to a depth of 2'755 m into crystalline basement. The temperature gradient of $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ exceeds expectations. The granitic basement shows the desired natural fractures and stress field. Evaporites of some 176 m in the Middle Muschelkalk exceed all regionally known thicknesses by at least a factor 2. The discovery of a 805 m Rotliegend sequence requires a reassessment of the regional Permian paleogeography.

The positive results of the well allow for the next step in exploration, a 5'000 metre well to the geothermal reservoir depth.

1. Projekt Deep Heat Mining

Erdwärme ist die wohl am meisten unterschätzte Primärenergiequelle: 99% unseres Planeten sind heisser als $1'000^{\circ}\text{C}$. Auch wenn nur ein verschwindend kleiner Anteil dieser Ressource erschliessbar ist schätzt die „World Energy Conference“ (Financial Times Energy World 1998) das geothermische Potential zur Stromproduktion auf das 10-fache des jährlichen Weltenergiebedarfs. Zudem ist Geothermie von den nachhaltigen Ressourcen die einzige, welche ohne Unterbruch, Tag und Nacht, ohne zusätzliche Speicher Bandenergie liefert.

* Häring GeoProject, Im untern Tollacher 2, CH-8162 Steinmaur

Vor diesem Hintergrund wurde in den letzten 6 Jahren mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie, dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft, den Industriellen Werken Basel, dem Kanton Basel-Stadt und der Elektra Basel-land das Projekt DEEP HEAT MINING entwickelt. Unterdessen hat sich DEEP HEAT MINING zu einem Energieprojekt nationaler Bedeutung entwickelt, das auch international, insbesondere auch bei multinationalen Energieproduzenten Beachtung findet.

Ziel ist die Entwicklung des weltweit ersten geothermischen Heizkraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren. Bisherige Experimentieranlagen zu diesem Verfahren – allen voran das EU-Projekt in Soultz-sous-Forêts im Elsass – haben gezeigt, dass bei gezielter Stimulation präexistente Klüfte im heissen Gestein geöffnet werden können und die Bildung grossräumiger unterirdischer Wärmetauscher möglich ist. Die grossen Herausforderungen in diesem Verfahren liegen in der kontrollierten Erzeugung offener Kluftsysteme und deren Ortung, so dass die Zirkulation grosser Wassermengen ohne übermässige Druckverluste möglich ist.

2. Hot-Dry-Rock / Hot-Fractured-Rock

Das Hot-Dry-Rock Verfahren (HDR) basiert auf der Zirkulation von Wasser durch ein künstlich erweitertes Kluftsystem in einem heissen Wirtgestein. Mittels Injektion von Wasser in eine Tiefbohrung werden bestehende Klüfte erweitert und durchlässig gemacht. Weitere Bohrungen fördern das überhitzte Wasser zur Strom- und Wärmeproduktion an die Oberfläche. In einem geschlossenen Kreislauf wird das abgekühlte Wasser wiederum in das heisse Gestein gepresst.

Da in den wenigsten Fällen trockenes Gestein angetroffen wird, bevorzugen wir den neueren, in Industriekreisen gebräuchlichen Ausdruck „Hot-Fractured-Rock“ oder HFR. Diese Bezeichnung hat sich in der Öffentlichkeit allerdings noch nicht durchgesetzt, sowenig wie auch die Bezeichnung „Enhanced Geothermal Reservoir“ abgekürzt EGS, welche in Fachkreisen oft verwendet wird.

Da mit den heutigen Erschliessungstechniken – hier fallen vor allem die Bohrkosten ins Gewicht – die ausschliessliche Erzeugung von Strom noch teuer wäre (Gestehungskosten von 0.4 CHF/kWh), wurde von Anbeginn ein Konzept verfolgt, bei dem auch die Abwärme genutzt werden kann. Dies schränkt die Standortwahl für eine Pilotanlage massiv ein, gibt es doch in der Schweiz nur eine geringe Zahl von grossen Wärmeabnehmern. In Basel ist mit dem grössten Fernwärmenetz der Schweiz ein solcher Abnehmer vorhanden, wobei andere Faktoren, wie eine fortschrittliche Energiepolitik und Weitsicht der Behörden eine mindestens so grosse Rolle in der Standortwahl gespielt haben. Dass die geothermischen Verhältnisse im Rheingraben vermutlich noch besonders günstig sind hat eine untergeordnete Rolle gespielt. Das langfristige Ziel der Hochenthalpie-Geothermie bleibt die Stromproduktion, eine ausschliessliche Anwendung im Verband mit Wärme-Kraft Koppelung würde die Einsatzmöglichkeiten zu stark einschränken.

Die thermische Energie soll aus einem 200 Grad heissen Wirtgestein produziert werden. Solche Temperaturen können auf 5'000 m Tiefe erwartet werden. Die Projektvorgaben sind eine Heisswasserproduktion von minimal 75 kg/s bei einer Temperatur am Bohrlochkopf von 190°C. Vorgesehen sind eine Injektionsbohrung und

zwei Produktionsbohrungen von einem Standort. Zusätzlich benötigt werden maximal drei Beobachtungsbohrungen auf rund 2.5 km Tiefe zur akustischen Ortung des künstlich zu schaffenden Reservoirs.

3. Ziel und Zweck der Sondierbohrung

Im Raum Basel existieren weder eine Tiefbohrung bis ins kristalline Grundgebirge, noch reflexionsseismische Daten, welche die Tiefenstruktur abbilden. Es fehlen somit grundlegende Kenntnisse über die geologische Eignung des Standortes Basel für DEEP HEAT MINING. Allerdings deuten regionale Daten auf einen erhöhten Temperaturgradienten im südlichen Rheingraben hin. Die einzige Bohrung im südlichen Rheingraben, welche das kristalline Grundgebirge erreichte, ist die 1959 abgeteufte Bohrung Knoeringue, 15 km westlich von Basel. Die Geothermiebohrungen Riehen reichen nur bis in den Muschelkalk und liegen im komplexen Flexurbereich des östlichen Grabenrandes, so dass daraus keine Schichtfolge im Graben selbst abgeleitet werden kann.

Die Sondierbohrung verfolgte folgende Ziele:

- Kenntnis über Tiefe der Kristallinoberfläche und Kenntnis der Schichtenfolge im Sedimentstapel.
- Kenntnis zum Spannungsfeld im Dach des kristallinen Grundgebirges.
- Kenntnis zu Temperatur, Wasserverhältnisse, Geochemie und Klüftung im kristallinen Grundgebirge.
- Kenntnis des Isolationseffekts des Sedimentstapels.
- Kenntnis der Laufgeschwindigkeit akustischer Signale im Sedimentstapel.
- Schaffung einer Horchbohrung zur späteren akustischen Überwachung der Reservoirentwicklung.

Der Sondierstandort beim Zoll Otterbach (Fig. 1) wurde so gewählt, dass er in günstiger Distanz zu den beiden möglichen Anlagestandorten Voltaplatz, respektive Kleinhüningen liegt. Dies ist für die spätere Aufzeichnung mikroseismischer Signale von Bedeutung.

Die Sondierbohrung Otterbach 2 (Häring 2001) ist die Fortsetzung einer 1999 begonnenen Sondierbohrung. Die Bohrung Otterbach 1 musste wegen einer technischen Havarie (Gestängebruch) auf einer Tiefe von 1535 m aufgegeben werden. Um eine solche Havarie beim zweiten Versuch auszuschliessen, wurde ein aufwändigeres Bohrkonzzept entwickelt, das grössere Bohrdurchmesser vorsah und damit auch auf ein wesentlich grösseres Bohrgerät angewiesen war. Die Bohrung wurde um 6 m versetzt von Otterbach 1 im März 2001 neu angesetzt (Fig. 2).

Auf eine seismische Erkundung wurde verzichtet, da keinerlei Referenzbohrungen und Daten für ein Geschwindigkeitsmodell im Sedimentstapel existieren. Seismische Untersuchungen hätten wohl zusätzliche Information zu strukturellen Fragen liefern können, wichtige Antworten zum Spannungsfeld und Temperaturfeld wären aber keine gewonnen worden. Die Kosten einer Seismikkampagne standen in keinem Verhältnis zum Nutzen. Die daraus gewonnenen Informationen hätten im besten Falle zu einer genaueren Planung der Verrohrungstiefen genutzt werden können.

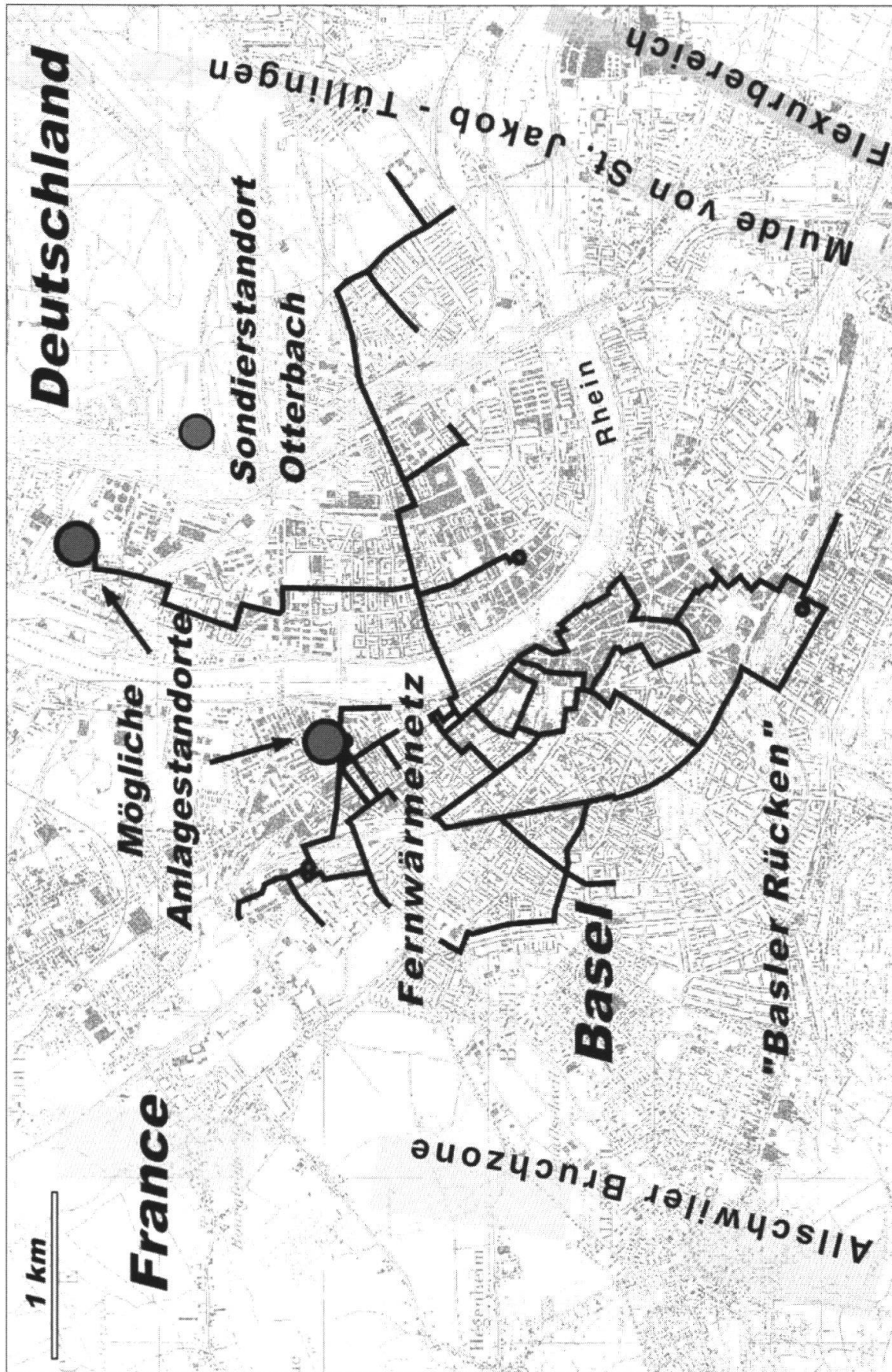


Fig. 1: Standortübersicht des DHM-Projektes Otterbach in Basel mit den wichtigsten strukturgeologischen Elementen.



Fig. 2: Bohrung Otterbach 2, Basel.

4. Prognose

Der Bohrstandort befindet sich im Grenzbereich zwischen dem Basler Rücken und der St. Jakob – Tüllinger Mulde (Fischer et al. 1971). Charakterisiert wird dieser Bereich durch eine 500 m mächtige Tertiärsequenz (Oligozän) über der mesozoischen Schichtenreihe. Sedimente permokarbonischen Alters waren zu erwarten, sind in der Umgebung jedoch schlecht dokumentiert. Bis auf eine Tiefe von 1'535 m war die Schichtenfolge durch die Bohrung Otterbach 1 bekannt. Die Wasser- und Gasführung in einigen kritischen Formationen musste schon aus sicherheitstechnischen Gründen antizipiert werden. Im Muschelkalk wurde eine Wasserführung sogar als wahrscheinlich angenommen, da dies dem thermalwasserproduzierenden Horizont in der 2 km entfernten Geothermiebohrung Riehen 1 entspricht.

Abweichend von der Prognose war besonders die Mächtigkeit des Salzvorkommens. Die Prognose stütze sich auf die 7 km südöstlich liegenden Vorkommen bei Schweizerhalle, dem Salzsohlungsgebiet der Schweizerischen Rheinsalinen.

Die Prognose der Mächtigkeit des Permokarbons, respektive des Rotliegenden, konnte sich auf kein vollständiges Profil abstützen. Auf der östlich angrenzenden Dinkelbergscholle gibt es kein durchgehendes Profil des Rotliegenden (Geyer und Gwinner 1991). Aus diesen Aufschlüssen lässt sich eine minimale Mächtigkeit von 150 m ableiten. Ein vollständiges, aber schlecht dokumentiertes Profil liegt aus der, 15 km westlich liegenden Bohrung Knoeringen vor. Dort beträgt das Permokarbon 600 m. Bei der Bohrung Weiherfeld in Rheinfelden beträgt die Mächtigkeit des gesamten Rotliegenden 283 m und in der Bohrung Wintersingen rund 400 m. Aus kei-

nem dieser Referenzpunkte könnte jedoch auf die hier vorgefundene Mächtigkeit von mehr als 800 m geschlossen werden.

5. Bohrprogramm

Die Vorbohrung für das Standrohr erfolgte bereits im Januar 2001, die eigentlichen Bohrarbeiten begannen am 15. März 2001 und wurden ohne namhafte technische Probleme, unfallfrei nach 92 Tagen vor Ort am 16. Juli 2001 abgeschlossen.

Das Bohrprogramm war so ausgelegt, dass in einem ersten Bohrabschnitt die tonreichen Tertiärschichten sowie die Oxford-Mergel und die dazugehörigen Renggeritone durchbohrt und durch eine 13 ³/₈''-Verrohrung gesichert wurden. Dieser Abschnitt konnte entsprechend der Planung ausgeführt werden.

Der nächste Bohrabschnitt durchteufte die wenig standfesten Formationen des Opalinustons und des Gipskeupers. Diese Abschnitte wurden mit einer 9 ⁵/₈''-Verrohrung bis direkt über dem Salzlager im mittleren Muschelkalk gesichert. Bis auf diese Tiefe konnte mit einer Süsswasserspülung gebohrt werden. Auch dieser Abschnitt wurde entsprechend der Planung ausgeführt.

Geböhrt wurde danach mit einer relativ schweren Salzpülung mit einer mittleren Dichte von 1.3 g/cm³, was ein Eindringen von Gas in die Spülungssäule weitgehend unterdrückt. Andererseits ist bei dieser Spüldichte in wasserführenden Schichten mit Spülungsverlusten zu rechnen. Beides trat nicht ein. Eine Änderung der Spülung zur Behandlung von Zu- oder Abflüssen wurde nie notwendig.

Im nächsten Abschnitt war geplant das Salzlager und die darunterliegenden Schichten bis zum Dach des Kristallin zu durchteufen. Gemäss Bohrprogramm sollte diese Strecke bis ins Kristallin hängend verrohrt werden. Mit der grösseren Mächtigkeit des Salzes wurde die offene Bohrlochstrecke jedoch länger als vorgesehen. Die Identifikation der Kristallinbrekzien-Serie im Top des Kristallins gab den Ausschlag die 7 ¹/₂''-Verrohrung in dieser Tiefe abzusetzen.

Die darunter folgende Rotliegend-Sequenz erwies sich als sehr standfest, wodurch vorerst auf eine zusätzliche Hilfsverrohrung verzichtet wurde. Die Bohrlochvermessung zeigte aber an, dass durch die vorhandenen Gebirgsspannungen Bohrlochausbrüche stattfanden und den Zugang zur Sohle zunehmend versperren.

6. Wireline Logging

Das Schwergewicht des Interesses liegt im kristallinen Bereich. Wichtigstes Kriterium ist die Erkennung von Klüften und ein detailliertes Bild der Bohrlochgeometrie als Grundlage zur Abschätzung der Spannungsverhältnisse. Das STAR/CBIL-Logging Tool von Baker Atlas (STAR: Simultaneous Acoustic and Resistivity Imager; CBIL: Circumferential Borehole Imaging Log) bot sich für diese Aufgabe an. Zur Feststellung akustischer Anisotropien, ebenfalls ein Indiz der Spannungsverhältnisse, kam versuchsweise ein neues Full wave Sonic Tool zum Einsatz. Die Sonde mit annähernd 40 m Länge und einem Durchmesser von 5 ¹/₂'' stand im 6 ¹/₄''-Loch im Rotliegenden wiederholt auf, so dass keine Geschwindigkeitsmessung im Kristallinbereich zustande kam. Die Messung lieferte allerdings verwert-

bare Geschwindigkeitsinformationen (DT) sowie Gamma Ray Daten über den open hole- und den verrohrten Bereich bis 800 m hinauf. Als Nebenprodukt des STAR/CBIL Tools wurde ein erstes Temperaturlog über die offene Bohrlochstrecke aufgenommen.

Ausserhalb des ursprünglichen Logging-Programms wurde im Rahmen der Erdbebenrisiko-Studien des Kantons Basel-Stadt ein Full-Wave Sonic Log im unverrohrten 17 1/2"-Bohrloch von der Oberfläche bis 730 m gefahren.

Für eine sichere Zementation des 7"-Liners im Bereich des Salzlagers wurde eine 4-Arm Kalibermessung durchgeführt. Die Salzsichten heben sich darin deutlich von den Anhydrit- und Anhydrit/Gips- und Tonlagen ab.

7. Resultate

7.1 Struktur

Gemäss der durchteuften Schichtenfolge (Fig. 3) wurde ein vollständiges stratigraphisches Profil durchteuft, d.h. es wurde keine Abschiebung durchfahren. Aufgrund der Logs und Bohrgutbeschreibungen sind auch keine Verdoppelungen, also keine Anzeichen für eine Überschiebung, respektive kompressive Strukturen zu erkennen. Die erbohrten Mächtigkeiten in der mesozoischen Schichtenfolge sind



Fig. 4: Bohrkern aus dem mittleren Ober-Rotliegenden.

geringfügig grösser als prognostiziert. Dies kann mit dem durchschnittlichen Einfallen der Schichten von $15 - 20^\circ$ erklärt werden, woraus eine vermeintlich 4% grössere Mächtigkeit resultiert. Gemäss der Strukturkarte aus Gürler et al. (1987) ist von einem Einfallen in der Grössenordnung von 15° /Ost auszugehen. Die Dipmeter Messungen im Rotliegenden von 2'550 bis 2'647 m deuten tatsächlich ein mittleres Einfallen von 16.4° in Richtung 147° /Ost an. Diese Beobachtung steht durchaus im Einklang mit den bekannten Strukturdaten, wobei einzig die Fallrichtung auf noch eine stärkere NE-SW Orientierung der St. Jakob- Tüllinger Mulde hinweisen. Im unteren Ober-Rotliegenden wird bei 2'593 m aufgrund der Dipmeter-Interpretation ein Bruch postuliert. Da jedoch für diese Sequenz die ungestörte Gesamtmächtigkeit unbekannt ist, und sowohl darüber wie darunter keine lithologische Änderung festzustellen ist, kann die Existenz dieses Bruches nicht bestätigt werden, noch kann über den Bewegungssinn eine Aussage gemacht werden.

7.2 Schichtenfolge

In der Schichtenfolge überraschend ist das 176 m mächtige Salzlager der Anhydritgruppe im mittleren Muschelkalk. Ab 1'553 m wurden sechs Salzhorizonte, unterbrochen durch Anhydritschichten, durchbohrt. Die unterste Salzschieht ist alleine 60 m mächtig und gemäss den Logs auch die homogenste. Damit ist das angetroffene Salzlager um ein vielfaches mächtiger als alle regional bekannten Vorkommen, welche in der Schweizerhalle 40 m, in Rheinfeldern 40 m und bei Knoeringue 20 m betragen (Kündig et al. 1997).

Die grösste Überraschung ist jedoch das unerwartet mächtige Rotliegend-Vorkommen. Nach Durchteufen eines 168 m mächtigen Arkosessandsteins, der als Rotliegend identifiziert wurde, konnten wir im Bohrklein eindeutig Granitbruchstücke identifizieren. Einhergehend mit einem deutlichen Rückgang des Bohrfortschrittes haben wir dies als Top des kristallinen Grundgebirges identifiziert. Der graduelle Übergang von immer unreiferen Sedimenten zu verwittertem Grundgebirge wurde genau so erwartet. Als dann bei geringem Bohrfortschritt kein identifizierbares Bohrgut mehr gefördert wurde, musste eine Kernentnahme Klarheit

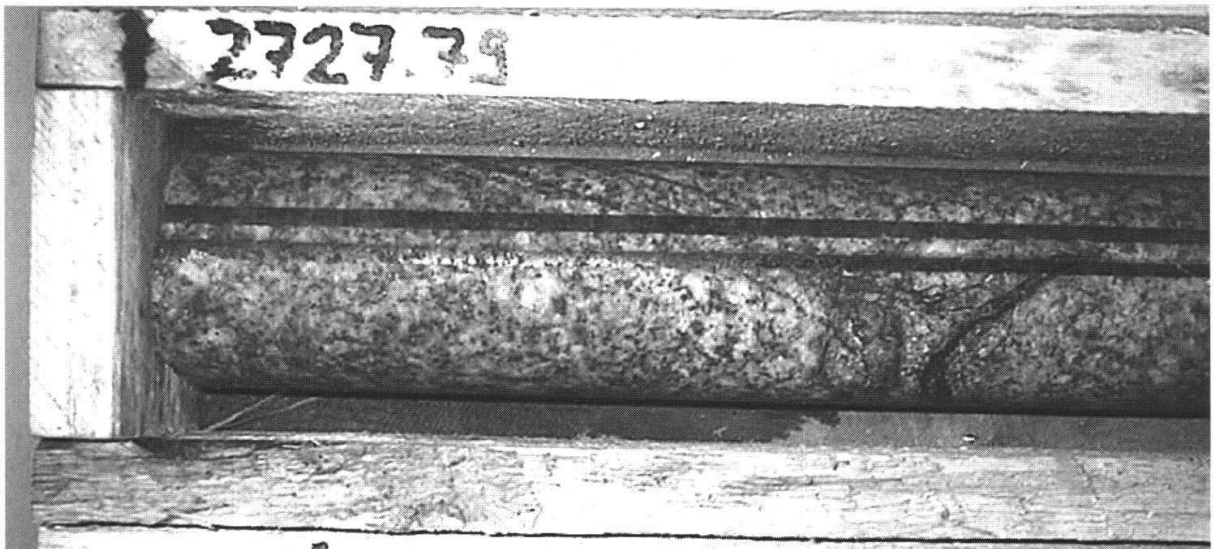


Fig. 5: Granitkern mit offener Kluft.

schaffen. Die Enttäuschung war gross als der Kern nur rote Silt- und Tonsteine mit Gipsnestern zu Tage förderte (Fig. 4) und damit klar wurde, dass man sich in Playa-Ablagerungen des Rotliegend befand. Beim vermeintlichen Grundgebirge hatte es sich also lediglich um ein granitisches Konglomerat gehandelt. Die rote Silt-Tonsteinsequenz des mittleren Ober-Rotliegenden erreicht eine Mächtigkeit von über 260 m. Darunter folgt graduell gröber sandiges Ober-Rotliegend. Hinweise von Ablagerungen karbonischen Alters fehlen. Die Gesamtmächtigkeit des durchfahrenen Rotliegenden beträgt 805 m und übertrifft damit – bis auf die Bohrung Riniken mit einer über 1'000 m mächtigen Rotliegendabfolge (Matter et al. 1987) – alle bisher in der Region bekannten Vorkommen.

Im Kristallin wurden vier Kerne von insgesamt 7 m Länge gezogen. Gefunden wurde ein homogener Granit. Die Kerne weisen Millimeter breite Klüfte auf, die mit aplitischem Material gefüllt sind, jedoch auch offene Zonen aufweisen (Fig. 5). Rötlich gefärbte Feldspäte als Anzeichen von Verwitterung beschränken sich auf die oberen Kerne.

7.3 Gas / Wasser

Gasanzeichen beschränkten sich auf Spuren von H₂S in den Bunten Mergeln des Keupers. Kohlenwasserstoffe wurden keine registriert. Geringe Gasvorkommen wären durch die relativ schwere Spülung auch unterdrückt worden. Hingegen hätte dies auch zu Spülungsverlusten führen können. Erwartet wurden solche vor allem im Oberen Muschelkalk, aus welchem ja bekanntlich bei Riehen Thermalwasser gefördert wird. Es wurden keine Wasserverluste oder -gewinne – auch nicht in den tieferen Formationen – festgestellt. Auf hydraulische Tests wurde verzichtet, um die Stabilität im offenen Bohrlochbereich nicht zu gefährden.

7.4 Temperatur

Drei, um 14 Tage gestaffelte Temperaturmessungen zeigen konsistente Messwerte. Wie erwartet lässt sich eine Angleichung des Temperaturprofils an ungestörte Formationsverhältnisse vor der Bohrung erkennen.

Das Temperaturprofil kann grob in fünf Bereiche unterteilt werden:

Bereich 1:	0 – 170 m	Oberflächennaher Bereich. Beeinflusst durch aktuelles Klima und Pegelschwankungen, resp. Pegelabsenkung. Unzuverlässige Daten.
Bereich 2:	170 – 1'000 m	Mergel und Kalke des Tertiär, Malm und Hauptrogenstein. Gradient: 3.32°/100 m.
Bereich 3:	1'000 – 1'400 m	Tone und Mergel des Opalinuston und Keuper Gradient: 4.52°/100 m.
Bereich 4:	1'400 – 1'800 m	Evaporite (Salz, Anhydrit) und Karbonate (Kalk, Dolomit) des Muschelkalkes Gradient: 2.54°/100 m.
Bereich 5:	1'800 – 2'400 m	Klastika des Buntsandstein und Rotliegenden. Gradient: 4.50°/100 m.

Die stark unterschiedlichen Temperaturgradienten widerspiegeln deutlich die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Lithologien: Eine relativ hohe Wärme-

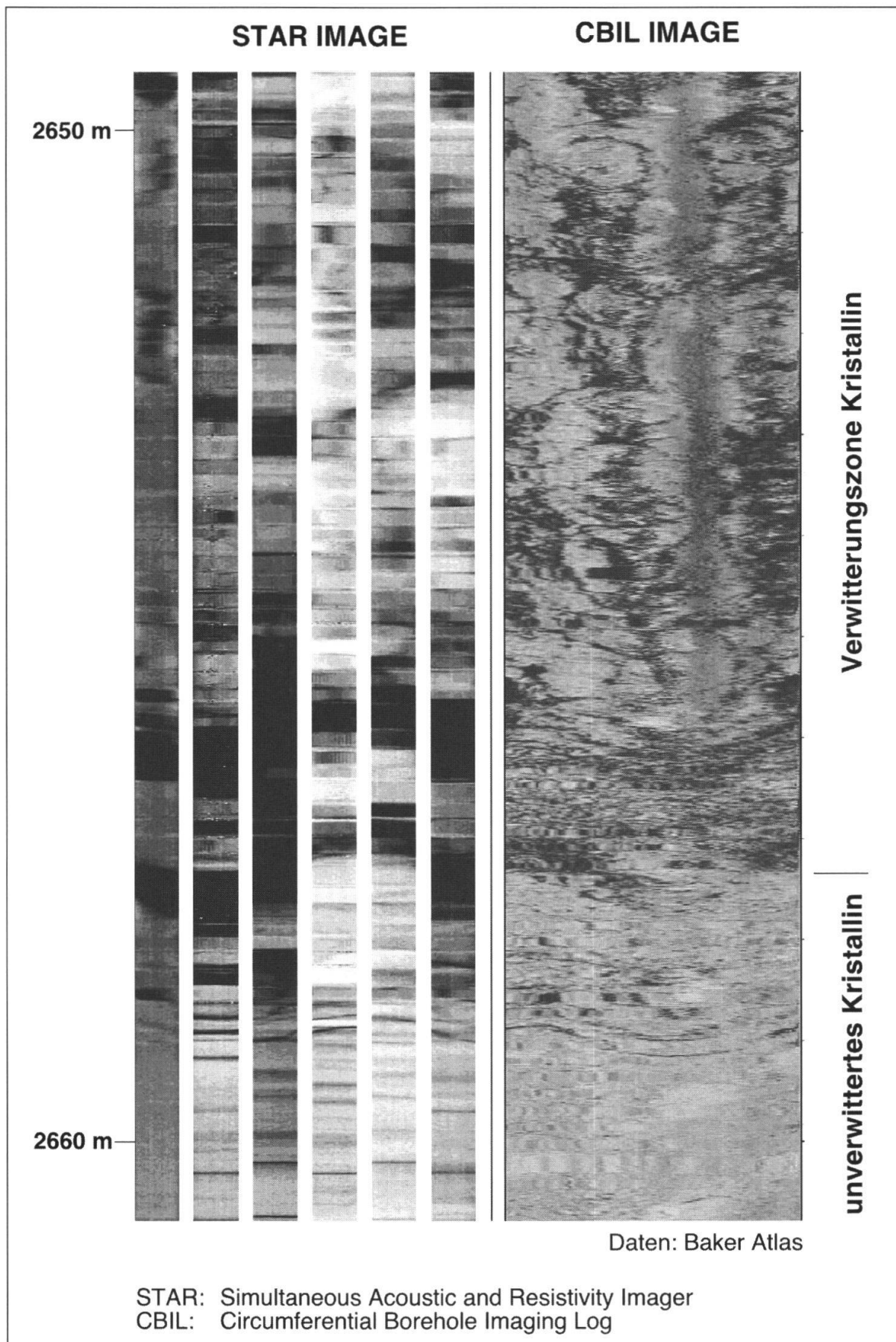


Fig. 6: Abbildung der Bohrlochwand im Top des Kristallins.

leitfähigkeit in Kalken, vermutlich noch begünstigt durch Wasserführung mit einer konvektiven Komponente. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit in den Tonen und eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit in den Evaporiten. Die geringe Leitfähigkeit im Rotliegenden unterstreicht den hohen Tonanteil der Formation und deutet auch eine geringe Wasserführung an. Die stark variablen Gradienten machen deutlich, dass eine lineare Extrapolation der Temperaturzunahme in ein Reservoir auf 5'000 m unzulässig ist, insbesondere da aus dem Wirtgestein, dem kristallinen Grundgebirge, keine direkten Messungen vorliegen. Rybach (2002) errechnete aus den Messungen einen Wärmefluss von 95 mW/m^2 , was einem erhöhten, aber für den Rheingraben charakteristischen Wert entspricht. Er erwartet aufgrund der Wärmeproduktion, wie sie in den Kristallinkernen gemessen wurde (Schärli 2001), in 5 km Tiefe Temperaturen von $210^\circ\text{-}220^\circ\text{C}$, sofern keine konvektiven Störeffekte auftreten.

7.5 Spannungsfeld

Die wichtigsten Informationen zum Spannungsfeld im Grundgebirge stammen aus den STAR/CBIL Logs (Fig. 6). Daraus sind vorerst keine quantitativen Aussagen, sondern ausschliesslich Aussagen über die Orientierung der horizontalen Hauptspannungsrichtung möglich. Diese äussert sich in der Bohrlochgeometrie, dokumentiert durch den Bohrlochquerschnitt, als Resultat von Bohrlochwand-Ausbrüchen (induced break-outs) und in Bohrungs-induzierten Klüften (induced fractures).

Generell ist eine horizontale Hauptspannung (Sh_{max}) in Richtung NW-SE erkennbar, wobei Unterschiede zwischen der Rotliegend- und der Kristallin-Sequenz auffallen. In der Rotliegend Sektion fällt eine grössere Störungszone bei 2'592 m auf. Aufgrund der starken Abweichung von Sh_{max} in Richtung NE-SW im Nahbereich der Störung wird diese als aktiv interpretiert.

Von Interesse für das Projekt ist die Richtung von Sh_{max} im unverwitterten Teil des Kristallins ab 2'657 m: Sh_{max} rotiert von oben (2'657 m) nach unten (2'740 m) von NNW-SSE nach NW-SE und wiederum zurück nach NNW-SSE. Diese Richtung stimmt sehr gut mit dem regionalen Spannungsfeld überein, das jedoch bisher nur auf oberflächennahen Daten bekannt war. Weil hier weitgehend übereinstimmende Resultate vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass auch das Spannungsfeld in 5'000 m Tiefe nicht grundsätzlich anders gestaltet sein wird.

In einer ersten Annahme kann deshalb bei einer Klüftstimulation in 5'000 m Tiefe auch von einer Ausbreitungsrichtung der Klüfte in NW-SE Richtung ausgegangen werden.

Ausstehend ist noch eine Aussage über die Kräfte, resp. Drücke welche zur Erzeugung offener Klüfte aufgewendet werden müssen. Dies soll mit weiteren Untersuchungen in Form von Drucktests mit einem Doppelpacker erreicht werden.

8. Weiteres Vorgehen

Die Bohrung ist nun mit einem Brunnenkopf verschlossen. Drucktests zur Quantifizierung der Spannungsverhältnisse sind erst mit dem Einbau eines permanenten Messstranges geplant. Dieser wird mit Seismometern, Geophonen und Temperaturfühlern bestückt sein. Die Instrumentierung soll sowohl einem völlig neuartigen

seismischen Überwachungsnetz als auch der Ortung stimulierter Klüfte im Reservoirbereich dienen. Die Herausforderung besteht hier in der Installation zuverlässiger und langlebiger Instrumente.

Mit den positiven Resultaten der Bohrung ist nun der Weg frei zum nächsten Schritt des Projekt, einer 5'000 m tiefen Bohrung in den zukünftigen Reservoirbereich.

Literaturverzeichnis

- Financial Times Energy World, FT, Finacial Times Ltd. London, UK. February 1998.
- HÄRING, M. 2001: Technischer Bericht Geothermie-Sondierbohrung Otterbach 2, Basel. Geothermal Explorers Ltd, unveröffentlicht.
- FISCHER, H., HAUBER, L., WITTMANN, O. 1971: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1047, Basel. Schweizerische Geologische Kommission.
- GEYER, O., GWINNER, M. 1991: Geologie von Baden-Württemberg. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GÜRLER, B., HAUBER, L., SCHWANDER, M. 1987: Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen für die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Landeshydrologie und -geologie und Schweizerische geologische Kommission.
- KÜNDIG, R., MUMENTHALER, TH., ECKHARDT, P., KEUSEN, H.-R. et al. 1997: Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich.
- MATTER, A., PETERS, T., ISENSCHMID, CH., BLÄSI, H.-R., ZIEGLER, H.-J. 1987: Sondierbohrung Riniken. NAGRA Technischer Bericht 86-02.
- RYBACH, L. 2002: Geothermische Resultate der Sondierbohrung Otterbach 2; Bericht zuhanden des DHM Projekts. Unveröffentlicht.
- SCHÄRLI, U. 2001: Thermische Messungen an Bohrproben Otterbach 2; Bericht zuhanden des DHM Projekts. Unveröffentlicht.