

# Die Erkenntnisse aus dem Geothermieprojekt

Im Verlauf von über zwei Jahrzehnten hat das Projekt in Soultz wichtige Erkenntnisse geliefert. Schwerpunkt war die nachhaltige Nutzung von geothermischer Wärme aus einem geklüfteten Speicher in großer Tiefe. Manche wissenschaftliche Idee oder Annahme konnte am Standort bestätigt werden. Es kam aber auch vor, dass strategische Neuorientierungen erforderlich wurden, die Forscher und Ingenieure vor spannende Herausforderungen stellten.

## Maßgebende Ergebnisse zum Untergrund

### Streben nach weniger tiefen Bohrungen: Traum oder Realität?

Die Ergebnisse von Tiefbohrungen haben gezeigt, dass es nicht zwingend notwendig ist, große Tiefen zu erschließen, um geothermische Energie zur Stromproduktion zu nutzen. Diese Erkenntnis nimmt natürlich großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Geothermieprojekts. Schließlich sind die Kosten der Bohrarbeiten abhängig von der Bohrteufe und nicht selten machen diese Kosten weit mehr als 50 % der Gesamtinvestition bei einer Geothermieranlage aus. Im Einklang mit den Prognosen, die auf Ergebnissen von Bohrungen bis 3.600 m Tiefe beruhten, beträgt die Temperatur in Soultz in 5.000 m Tiefe etwa 200 °C. Für die Nutzung der Geothermie zur Stromerzeugung ist die Temperatur aber nur eine wichtige Kennzahl. Es erfordert auch eine beachtliche Förderrate, um eine ausreichende thermische und damit auch elektrische Leistung des Kraftwerks zu gewährleisten. Die Fähigkeit einer Gesteinseinheit Thermalwasser zu leiten, kann mit der „Durchlässigkeit“ („Permeabilität“) beschrieben werden. In Soultz wurde die Durchlässigkeit des Granitreservoirs in großer Tiefe in mehreren Experimenten durch hydraulische und chemische Stimulation stark verbessert.

Die Bruttoleistung einer Geothermieranlage ergibt sich aus dem Produkt von Volumenstrom (an die Oberfläche geförderte Wassermenge in Kubikmetern pro Stunde) und der Temperaturdifferenz zwischen gefördertem und reinjiziertem Thermalwasser und einem Faktor (der Wärmekapazität), die den Wärmeinhalt des geförderten Thermalwassers und dessen Dichte berücksichtigt. Anders ausgedrückt: niedrigere Fördertemperaturen können durch erhöhte Förderraten kompensiert werden. Fortschritte bei der Umwandlung von thermischer Energie in Elektrizität durch den Einsatz von Zwei-Kreis-Systemen (Kalina, ORC) gestatten heute die sinnvolle Nutzung von mittleren Thermalwassertemperaturen zwischen 100 und 150 °C.

Messergebnisse aus Soultz zeigen, dass am Standort bereits im Tiefenintervall zwischen 1.400 und 3.500 m große Wasservorkommen mit Temperaturen bis zu 160 °C und eine vergleichsweise hohe Gesteinsdurchlässigkeit vorliegen. Der tiefere Untergrund in 5.000 m Tiefe ist dagegen deutlich trockener und undurchlässiger. Dieser Umstand ist das Resultat des lokalen Spannungsfelds, welches vom Gewicht des Untergrunds, seinem Verdichtungsgrad und den tektonischen Gegebenheiten abhängt, und komplexe geologische 3D-Strukturen wie Klüfte und Störungen entstehen lässt. Diese Erkenntnis wird in verschiedenen Geothermieprojekten im Oberrheingraben bereits berücksichtigt: Das Projekt Roquette Frères ca. 10 km östlich von Soultz in Rittershoffen, bei dem geothermische Wärme zur industriellen Trocknung von Stärke genutzt werden soll, ist mit zwei Bohrungen und 170° C Thermalwassertemperatur bei einer Tiefe von lediglich 2.500 m geplant. In Landau in Rheinland-Pfalz wurde ein geothermisches Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 3 MWe gebaut. Die zugehörigen Bohrungen fördern natürliches Thermalwasser aus etwa 3.300 m Tiefe. Und auch das Geothermiekraftwerk in Bruchsal (Baden-Württemberg) nutzt ein natürliches Heißwasservorkommen, dessen Temperatur bei ca. 130 °C liegt. Mit der heute verfügbaren Technologie lässt sich Geothermie in diesen Tiefen also sowohl zur Wärmeversorgung als auch mit akzeptablem Wirkungsgrad zur Stromproduktion nutzen und übertiefe Bohrungen sind keine zwingende Notwendigkeit. Außerdem sinken mit geringerer Bohrtiefe auch die Instandhaltungskosten der Bohrungen: Flachere Bohrungen sind leichter zu warten. Positiv wirkt sich eine geringere Bohrtiefe auch auf die spezifische Wärmebilanz der Förderbohrung aus, da sich über die vergleichsweise kürzere Förderstrecke geringere Energieverluste einstellen. Und ein ganz besonders wichtiger Vorteil: In der Region um Soultz wurde mit zunehmender Tiefe mehr mikroseismische Aktivität beobachtet.

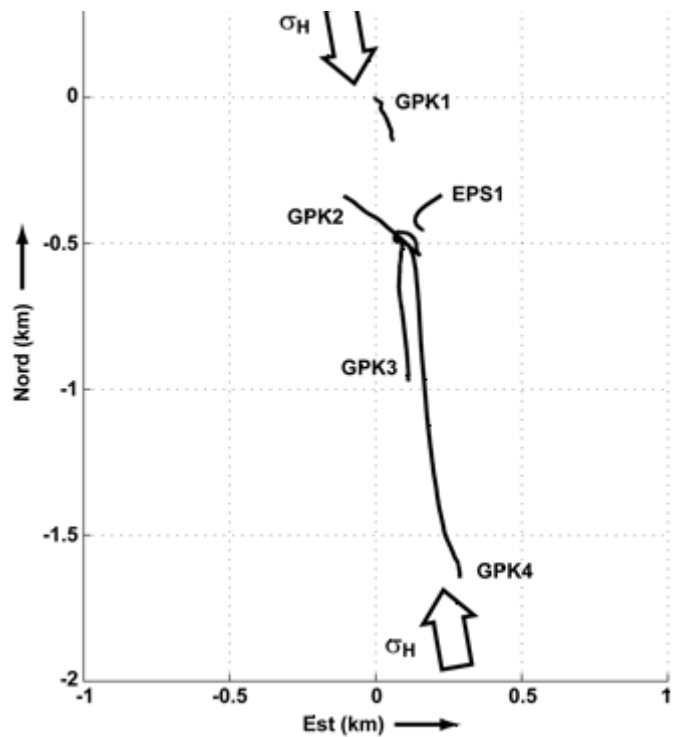
### Vertikalbohrungen vs. abgelenkte Bohrungen

Die Untersuchungen an den Bohrungen in Soultz haben gezeigt, dass zahlreiche vertikale Klüfte und Klüftzonen im Grenzbereich



zwischen kristallinem Grundgebirge und der Sedimentüberdeckung – also in einer Tiefe zwischen 1.400 und 3.500 m – gut durchlässig sind. Dies legt geringere Bohrtiefen im Oberrheingraben nahe. Gleichzeitig wirft es die Frage nach der richtigen Bohrstrategie auf: Vertikale oder geneigte bzw. abgelenkte Bohrungen? Schon aus einfachen geometrischen Überlegungen wird deutlich, dass mit vertikalen Bohrungen ein wasserführendes und ebenfalls vertikal ausgerichtetes Kluftsystem kaum optimal auf-zuschließen ist. Ist das Kluftnetzwerk dagegen aus der Vertikalen geneigt, kann eine Vertikalbohrung große Vorzüge aufweisen. Beim Projekt Roquette Frères in Rittershoffen wird beispielsweise die erste Bohrung vertikal abgeteuft, da das Kluftnetzwerk eine westwärts gerichtete Neigung von etwa 45° aufweist.

Es ist einleuchtend, dass mit der Anzahl an die Bohrung angeschlossener Klüfte die potentielle Förderleistung steigt. Dies kann dadurch erreicht werden, dass das Kluftsystem mehr oder weniger rechtwinklig zu seiner Raumorientierung angeschnitten wird. Diese Konzept wurde am Standort Landau verfolgt: Hier verlaufen sowohl die Förderbohrung als auch die Injektionsbohrung in rechtem Winkel durch ein Kluftsystem. In Soultz selbst wurden die Bohrungen bis ca. 2.500 m Tiefe vertikal abgeteuft und dann in Richtung der größten Hauptspannung und damit parallel zum Kluftsystem abgelenkt (N170°E).



Der Pfad der abgelenkten Bohrungen in Soultz verlaufen in etwa parallel zur maximalen horizontalen Spannung  $\sigma_H$

## Ist Mikroseismizität unumgänglich?

Viel diskutiert wurde und wird die Entwicklung von Mikro-Erdbeben im Zuge der Geothermienutzung. Nach nun mehr als zwei Jahrzehnten mit Experimenten und Tests in Geothermieprojekten, aber auch in der Gas- und Erdölindustrie ist das Wissen heute ungleich größer als früher. Unausweichlich treten Mikro-Erdbeben bei der hydraulischen Stimulation tiefer Heißwasser-, Erdöl- und Erdgasreservoir auf. Auch während der Zirkulation von Thermalwasser unter hohem Druck können sie auftreten. Besonderer Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang einer entsprechenden Überwachung, also einem seismischen Monitoring zu, welches auch zur Steuerung der Injektionsstrategie genutzt werden kann. Chemische Stimulationen bewirken nur sehr moderate oder gar keine seismische Aktivität und sind daher eine interessante Ergänzungstechnik.

Ein wesentliches Ergebnis der Arbeiten in Soultz ist die Erkenntnis, dass die Entwicklung von Mikroseismizität sowohl in Anzahl als auch in der Größe der Magnituden über den Injektionsdruck beeinflusst werden kann. Die prägnantesten seismischen Ereignisse entstehen immer dann, wenn der Injektionsdruck abrupt geändert wird wie etwa beim Stopp der Injektionspumpe. Aus den Untersuchungen konnte für Soultz eine Art „Absorptionsfähigkeit des Untergrunds“ abgeleitet werden. Wird sie unterschritten, sind Mikro-Erdbeben kaum zu erwarten und wenn sie doch auftreten, weisen sie äußerst geringe, gerade noch messbare Intensitäten auf. In 2010 wurde die Thermalwasserzirkulation in Soultz über nahezu elf Monate aufrecht erhalten. Dabei wurden etwa 500.000 m<sup>3</sup> natürliches Heißwasser umgewälzt. In diesem Zeitraum kam es zu über 400 Mikro-Erdbeben, von denen jedoch kein einziges wahrnehmbar war.

## Wahr oder falsch?

### Wasser in Hülle und Fülle!

Die einfache Übertragung der in den 1970er Jahren in den USA und Großbritannien entwickelten Hot-Dry-Rock-Konzepte auf die Verhältnisse im Elsass führte zu Annahmen hinsichtlich der Beschaffenheit des Untergrundes, die nicht der Situation in Soultz entsprachen und die zunächst einen maßgeblichen Einfluss auf das Design der Anlage in Soultz nahmen. So galt der Granit, insbesondere in großer Tiefe, als weitgehend



undurchlässig. Beobachtet wurde jedoch während der Bohr- und Stimulationsarbeiten etwas anderes, nämlich dass das Top der Graniteinheit zerbrochen ist und Wasser enthält und auch mit zunehmender Tiefe systematisch immer wieder natürliche durchlässige Kluftzonen anzutreffen waren.

Bereits aus der Zeit der Erdölexploration war bekannt, dass sich im Soultzer Untergrund eine thermische Anomalie befindet. Temperaturmessungen zeigten bereits in 1.000 m Tiefe unerwartet hohe Temperaturen von mehr als 100 °C. Anhand dieser Informationen gingen einige Wissenschaftler davon aus, dass im Buntsandstein, einer als porös geltenden Gesteinsformation, starke Zirkulationsphänomene existieren müssten. Auch schloss man aus den Messergebnissen, dass in diesem Sedimentspeicher mit rasterartiger Porosität und Permeabilität eine Warmwasserzirkulation stattfinden müsse, die den darunter liegenden Granit aufwärme. Heute wissen wir, dass hohe Durchlässigkeiten in der Sandsteinformation systematisch mit Kluftzonen assoziiert sind. Große Konvektionszellen nutzen das subvertikale Kluftnetz, welches in Soultz die Granitschicht und die darüber liegenden Sandsteinschichten gleichermaßen durchzieht. Dieser Verbund aus Deckschicht und Granitsockel besteht aus hartem, lokal geklüftetem und damit gut wärmeleitendem Gestein, in dem natürliches Thermalwasser fließt, das seine Energie in größerer Tiefe aufgenommen und beim Aufstieg bis in die Deckschichten transportiert hat.



Ein Bohrkern aus dem Buntsandstein von Soultz mit natürlichen Klüften, die teilweise mit Ablagerungen aus Baryt (Bariumsulfat) zugesetzt sind.



Thermalquelle "Les Héliens" in Merckwiller-Pechelbronn, die ihren Ursprung im geklüfteten Buntsandstein nimmt

## Warum eine Triplette ?

Im Hot-Dry-Rock-Konzept geht man davon aus, einen geschlossenen künstlichen Wärmetauscher (Reservoir) im Untergrund zu schaffen.

Dieser Wärmetauscher und die bevorzugten Fließwege richten sich im Untergrund nach dem Gebirgsspannungsfeld aus. Bei der Injektion breitet sich das Wasser daher entlang der Hauptspannungsrichtung zu beiden Seiten der Bohrung aus. Deshalb wurde für Soultz ein Konzept entworfen, bei dem zwei Förderbohrungen, nördlich beziehungsweise südlich der Injektionsbohrung platziert, das verpresste Wasser wieder auffangen sollten. Man ging davon aus, dass ein solches System einer reinen Dublette überlegen ist.

Heute wird jedoch beobachtet, dass es wesentlich einfacher ist, heiße Thermalwässer zu produzieren (artesische Förderbohrung) als Thermalwasser zu reinjizieren. Aus diesem Grund arbeitet die EWIV 'Wärmebergbau' heute mit einer Produktionsbohrung (GPK2) und verpresst gleichzeitig in zwei Injektionsbohrungen. (GPK1/GPK3). Das hat zur Folge, dass der Injektionsdruck sich verringert und damit das mikroseismische Risiko reduziert wird. Hinzu kommt, dass das Thermalwasser nach dem Wärmeentzug an

der Oberfläche vollständig wieder verpresst wird, so dass das Druckregime im Untergrund konstant gehalten werden kann. Die Triplette wird weiterhin benutzt, aber mit einem Funktionsprinzip, das entgegengesetzt den ursprünglichen Ideen arbeitet, weil es einfacher ist, heißes salzhaltiges Thermalwasser zu fördern als es wieder zu verpressen.

## Exploration gestern und heute

Das Geothermieprojekt in Soultz wurde vor über 20 Jahren ohne die heute übliche Explorationsphase mit geophysikalischen und geochemischen Messungen begonnen. Dieses Vorgehen hatte seine Begründung in den umfangreichen Datensätzen, die im Zuge von Erdölbohrungen im Raum Soultz gewonnen wurden und den Wissenschaftlern in der Planungsphase zur Verfügung standen (Temperaturvorläufe, Bohrtechnik etc.). Auch konnte auf seismische Untersuchungen zurückgegriffen werden. Ein Abgleich zwischen den Seismikdaten und den Ergebnissen der Erdölbohrungen gestattete die Entwicklung eines geologischen Modells für die Sedimentüberdeckung, das später nahezu auf den Meter genau mit der Bohrung GPK1 bestätigt werden konnte.

Ausgehend vom Hot-Dry-Rock-Konzept waren anfänglich alle Planungen darauf ausgerichtet, möglichst hohe Temperaturen in vergleichsweise geringer Tiefe zu erschließen. Zudem wurde zunächst angenommen, dass man praktisch keine natürlichen Thermalwässer vorfinden würde. Daher wurden letztlich alle weiteren Bohrungen auf eine Temperatur von 200 °C und damit auf eine Tiefe von etwa 5.000 m ausgelegt, obwohl bereits in lediglich 1.000 m etwa 100 °C gemessen wurden.

Mit dem heute deutlich verbesserten Verständnis der geologischen Verhältnisse im nördlichen Elsass will man neue Kluftreservoirs erschließen. So ist es notwendig, dass man in der Lage ist, Störungen und Kluftzonen in der Nähe des Übergangs vom Sediment zum Kristallinsockel zu identifizieren. Alle Technologien, die in der Lage sind, die Geometrie dieser Fließwege zu identifizieren, erleichtern die Bohrarbeiten. Die Erfassung der die Deckschichten schneidenden Strukturen mit neuen seismischen Verfahren der Erdölindustrie könnte eine Möglichkeit sein, die Nutzung der Geothermie zu erleichtern.

Ebenfalls vielversprechend sind Erkundungsmethoden, mit denen die Zusammensetzung der im Untergrund vorliegenden Gasgemische untersucht werden kann. Verschiedene Spurengase sind Indikatoren für bis in große Tiefen reichende und mit hoher Wahrscheinlichkeit heißwasserführende Klüfte. Zur Kartierung der Grenzfläche zwischen Sedimentauflage und kristallinem Grundgebirge bieten sich dagegen die klassischen geophysikalischen Messverfahren an: Widerstandsmessungen, Magnetik, Gravimetrie und Magnetotellurik sind heute sehr weit entwickelt und können in Koppelung mit 3D-Modellierungen wichtige Informationen liefern.

Erkundungsbohrungen sind die kostspieligste Untersuchungsmethode. Nach wie vor stellen sie jedoch die einzige Möglichkeit der direkten Erkundung dar und gestatten die Ermittlung aller relevanten physiko-chemischen und hydraulischen Parameter.

