

# Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland – Landesteil Baden-Württemberg

Development of an Internet Based Geothermal Information System for Germany – Region Baden-Württemberg

Von M. JODOCY und I. STOBER\*

## Abstract

Renewable energies as a part of the total energy supply of the Federal Republic of Germany are to be extended in the next years. In terms of geothermal resources the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) supports the project "Development of an Internet Based Geothermal System for Germany" (GeotIS). The total duration of the project is three years. Lead-managed by the Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institute) it is realized in a country wide joint venture project with different partners [8]. Initially the geothermal information system will contain data only about hydrogeothermal resources. The object of the project is to improve quality in the planning stage of geothermal plants and to minimize explorations risks. Key parameters are production rate and temperature. The District Authority (Regierungspräsidium) Freiburg has been assigned to attend to the areas of the Upper Rhine Graben and the North Alpine Foreland Basin (Molasse Basin) both situated in Baden-Württemberg. First intermediate results are presented.

## Kurzfassung

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland soll in den nächsten Jahren ausgebaut werden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt im Bereich der Tiefen Geothermie das Projekt »Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland« (GeotIS). Die Gesamtlaufzeit des Projektes beträgt drei Jahre. Unter der Leitung des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA-Institut) wird es in einer bundes-

weiten Gemeinschaftsarbeit mit verschiedenen Projektpartnern umgesetzt [8]. Die Projektpartner des GeotIS sind das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) in München, das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover, das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) in Güstrow, die Arbeitsgruppe Hydrogeologie der Freien Universität Berlin (FU), die Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN) und das Regierungspräsidium Freiburg (RPF). Das RPF wurde mit der Bearbeitung der baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und des Molassebeckens beauftragt. Vorgestellt werden erste Zwischenergebnisse aus Baden-Württemberg.

## 1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts *GeotIS* wird ein geothermisches Informationssystem für die hydrogeothermischen Ressourcen im tiefen Untergrund Deutschlands entwickelt. Das System soll eine Qualitätsverbesserung bei der Planung und Vorbereitung von Geothermieprojekten mit hydrothermaler Wärmeenergienutzung ermöglichen. Dazu soll das System einen ersten Überblick über die unter anderem entscheidenden Parameter Aquiferdurchlässigkeit, Tiefenlage, Mächtigkeit und Temperatur sowie die chemischen Eigenschaften der Wässer liefern. Ein weiteres Ziel ist die Möglichkeit zur Auf-

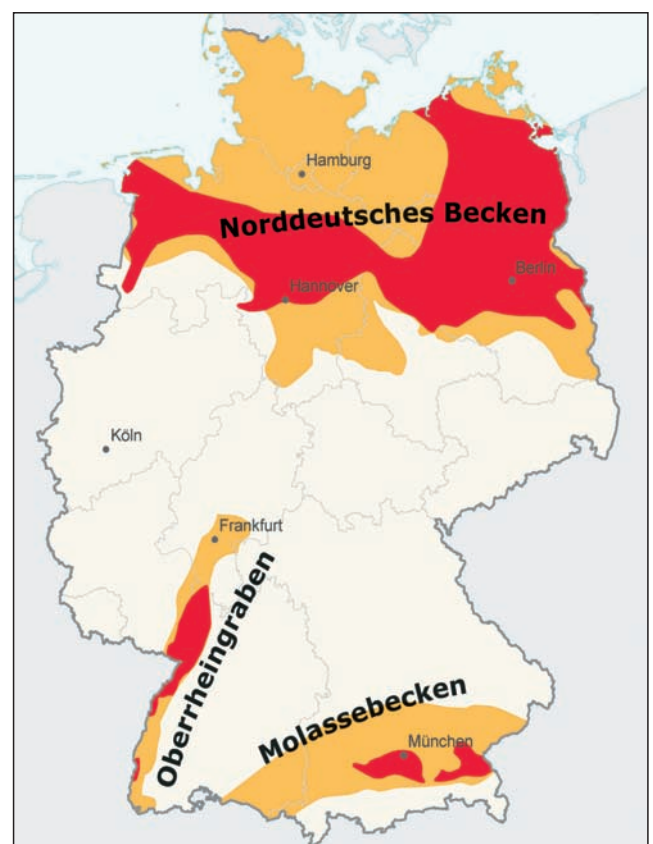


Abb. 1 Übersicht über die Regionen Deutschlands, die für hydrogeothermische Nutzungen in Frage kommen. Dargestellt sind Aquifere mit Temperaturen über 60 °C (orange) und über 100 °C (rot) [8]

stellung von Fündigkeitsvorhersagen. Um diese Ziele zu erreichen, werden vorhandene, zu erweiternde und/oder neu aufzubauenen Datenbestände und Datenbanken miteinander vernetzt. Der Zugriff auf den Inhalt dieser Datenbanken und der daraus abgeleiteten Parameter wird der Öffentlichkeit über ein kostenloses Internetportal ermöglicht. Petrothermale Systeme wie Tiefe Erdwärmesonden oder Hot-Dry-Rock-Vorhaben werden im Rahmen des Projekts GeotIS nicht berücksichtigt.

Deutschlands wichtigste Regionen im Hinblick auf hydrogeothermische Nutzungen sind das Norddeutsche Becken, der Ober-

\* Diplom-Hydrologe Marco Jodocy, Prof. Dr. Ingrid Stober, Regierungspräsidium Freiburg (RPF), Freiburg im Breisgau. (E-mail: ingrid.stober@rpf.bwl.de, marco.jodocy@rpf.bwl.de).

rheingraben und das Süddeutsche Molassebecken (Abb. 1). In diesen Regionen Deutschlands beherbergt der tiefe Untergrund Reservoirs mit heißen Wässern, die mit Temperaturen über 60 °C zur direkten Wärmenutzung, darüber hinaus bereichsweise bei Temperaturen von über 100 °C die grundlastfähige Stromerzeugung ermöglichen. Das Regierungspräsidium Freiburg (RPF) wurde mit der Bearbeitung der baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und des Molassebeckens beauftragt.

Die potenziellen hydrogeothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben sind primär der Obere Muschelkalk und der Buntsandstein, darüber hinaus im südlichen Grabenbereich der Hauptrogenstein sowie im nördlichen Grabenabschnitt bereichsweise sandige Lagen in der tertiären Schichtenfolge. Für den vom RPF zu bearbeitenden westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens wurden primär der Oberjura, ferner der Obere Muschelkalk als Nutzhorizonte festgelegt.

Die Arbeiten im Projekt GeotIS umfassen mehrere Themenschwerpunkte. Zentraler Punkt ist der Aufbau eines Fachinformationssystems (FIS) *Hydraulik*, welches geohydraulische und geohydrochemische Grundlagendaten enthält. Darüber hinaus soll das bereits seit einiger Zeit bestehende und über die Homepage des GGA ([www.gga-hannover.de](http://www.gga-hannover.de)) erreichbare FIS *Geophysik* um neue Datenbestände erweitert werden. Ein weiterer zentraler Punkt ist der Aufbau geometrischer Untergrundmodelle. Daraus abgeleitet umfassen die Aufgaben des RPF in Baden-Württemberg zwei inhaltlich untergliederte Arbeitspakete mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten. Arbeitspaket 1 befasst sich mit der geowissenschaftlichen Bearbeitung von Fachdaten aus den Themenbereichen Geothermie, Geohydraulik und Geohydrochemie. In diesem Arbeitspaket werden Daten aus Tiefbohrungen und bohrlochgeophysikalischen Messungen, insbesondere hydraulische und hydrochemische Informationen zusammengetragen, ggf. ausgewertet und in Datenbanken zusammengestellt. Dazu gehören neben Informationen über die zu erwartenden Temperaturen im Untergrund Angaben über erreichbare Förderraten. Das RPF wertet zu diesem Zweck hydraulische Testdaten aus. Darüber hinaus werden die hydrochemischen Eigenschaften der im Untergrund zirkulierenden Fluide und Gase zusammengestellt. Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die geologische Auswertung reflexionsseismischer Sektionen aus der Erdöl-/Erdgasexploration als Grundlage zum Aufbau von Modellkonzepten über den strukturellen

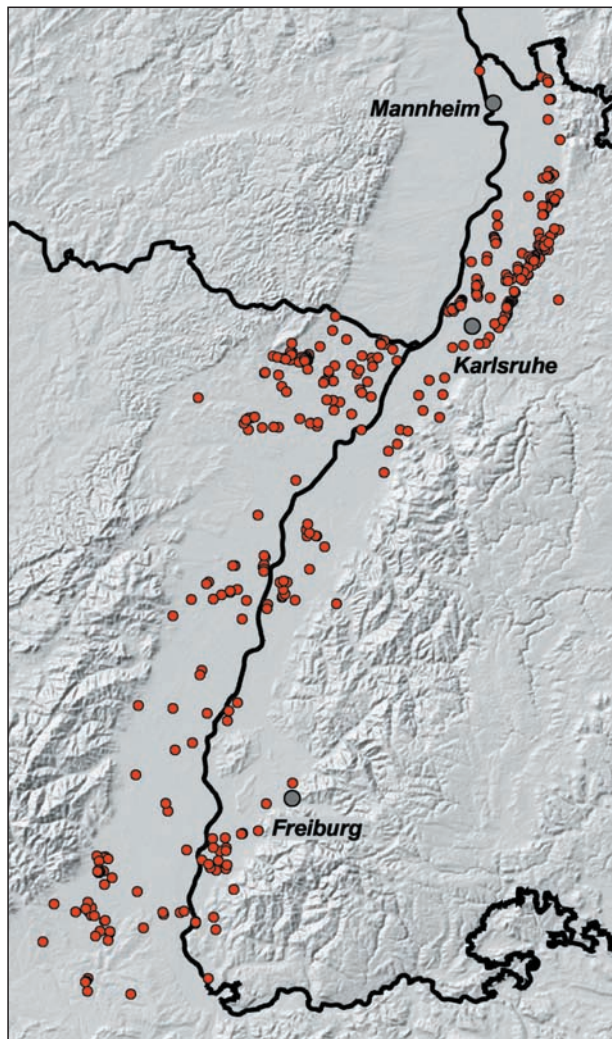


Abb. 2 Lage der Tiefbohrungen mit Bohrteufen über 400 m unter Gelände im Oberrheingraben (Baden-Württemberg und Frankreich)

Bau des tieferen Untergrundes sowie die Tiefenlage und Mächtigkeit potenzieller hydrogeothermischer Nutzhorizonte.

## 2 Datengrundlage

Tiefbohrungen sind in der Tiefen Geothermie das entscheidende Werkzeug bei der Betrachtung des tiefen Untergrundes, zumal mit ihrer Hilfe hydraulische, thermische und hydrochemische Daten erhoben werden. Allein im baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens stehen dem RPF rund 200 Tiefbohrungen mit Bohrteufen von mehr als 500 m unter Gelände zur Verfügung. Die Abbildung 2 zeigt die Lage der Tiefbohrungen im Oberrheingraben. Ein Großteil der Bohrungen wurde im Zuge der Erdöl-/Erdgas-Exploration im Oberrheingraben abgeteufelt. Die Bohrungen der Kohlenwasserstoff (KW)-Industrie werden durch Forschungs- und Erkundungsbohrungen, Bohrungen aus der Thermal- und Mineralwassererschließung sowie durch Rohstoffbohrungen ergänzt. Gemeinsam liefern sie die Datenbasis für die hydrogeothermischen Untersuchungen des RPF. Trotz bereichsweise kumulativer Verteilung werden für die anvisierten Untersuchungen alle Regionen des Oberrheingrabens mit

ausreichender Datendichte abgedeckt. Geologie endet jedoch nicht an Landesgrenzen, so dass darüber hinaus in einer grenzüberschreitenden Kooperation mit dem französischen »Bureau de Recherches Géologiques et Minières« (BRGM) in Straßburg zahlreiche Bohrungsdaten aus dem linksrheinischen Teil des Oberrheingrabens in die Betrachtungen miteinbezogen und erstmalig ausgewertet werden konnten. Auch im Molassebecken findet eine länderübergreifende Zusammenarbeit statt. Für den östlichen Teil des Molassebeckens im Bereich der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern wurde ein projektinterner Austausch mit den zuständigen Projektpartnern durchgeführt. Darüber hinaus kooperierte das RPF für die Bearbeitung des in der Schweiz liegenden südwestlichen Teils des Molassebeckens mit der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle). Auf die Arbeitsschwerpunkte Hydraulik, Hydrochemie und Geologisches Modell des RPF im Projekt GeotIS wird nachfolgend genauer eingegangen. Vorgestellt werden erste Zwischenergebnisse der Datenbearbeitung und Datenauswertung des RPF.

## 3 Hydraulische Tests und Auswertungsergebnisse

Der Bereich Hydraulik beschäftigt sich prinzipiell mit der Bestimmung hydraulischer Kennwerte für die einzelnen potenziellen hydrogeothermischen Nutzhorizonte. Ziel des Projektes ist letztlich die Vorhersage erreichbarer Förderraten. Bei der Bestimmung hydraulischer Kennwerte sind grundsätzlich Daten aus Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie und Daten aus Trinkwasser- bzw. Thermalwasserbohrungen zu differenzieren. Die Daten unterscheiden sich in der Testdauer, der betrachteten Teststrecke und der Registrierung bzw. Datenaufzeichnung. Während in KW-Bohrungen Tests unter hohem Kosten- und Zeitdruck meist im Rahmen von Minuten bis wenigen Stunden durchgeführt wurden, überstreichen hydraulische Tests in Trink- und Thermalwasserbohrungen oft einen Zeitraum von Tagen bis hin zu Wochen. Den in KW-Bohrungen untersuchten Teststrecken von wenigen Metern stehen die untersuchten Bereiche von mehreren 10 m Länge in Trink- und Thermalwasserbohrungen gegenüber. Weitere zentrale Unterschiede zeigen sich im Registrierungsverfahren. Hier wird bei Bohrungen der KW-Industrie eine Druck- und teilweise auch parallel stattfindende Temperaturaufzeichnung direkt im Bereich der zu untersuchenden Teststrecke

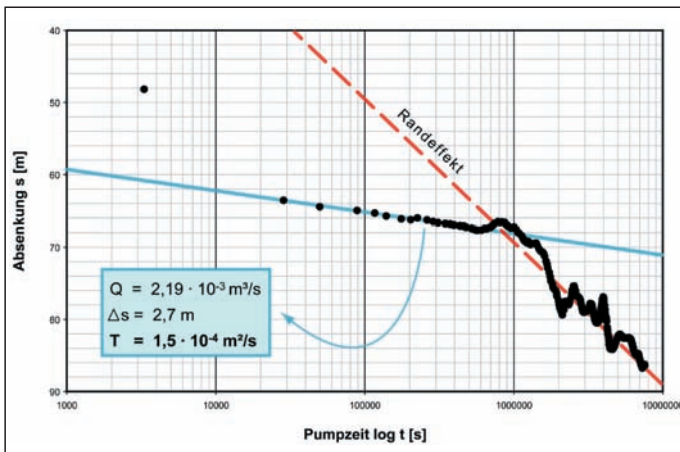


Abb. 3 Beispiel für die Bestimmung einer Transmissivität aus der Absenkungskurve eines Langzeitpumpversuchs nach dem Geradlinienverfahren von [3]

vorgenommen, während bei Trink- und Thermalwasserbohrungen in der Regel oberflächennahe Druckmessungen oder – insbesondere bei Pumpversuchen älteren Datums – klassische Wasserstandsmessungen, z. B. durch den Einsatz eines Lichtlots durchgeführt werden. Insbesondere bei Thermalwässern mit hohen Temperaturen und bereichsweise hohen Mineralisationsgraden ergibt sich dadurch bei der Betrachtung von Wasserständen und Druckdaten die Notwendigkeit zur Korrektur der Messdaten [9].

Ein klassischer Test, wie er in Trink- und Thermalwasserbohrungen durchgeführt wird, beginnt im Zuge eines Brunnentests mit kurzen Pumpphasen unterschiedlicher Förderate. Nach kurzer Erholungsphase wird ein Aquifertest mit einer konstanten Pumprate gestartet. Der Pumpversuch endet mit einer länger andauernden Beobachtung des Wasserspiegelanstiegs im Brunnen [4]. Je nach Datenqualität sind die einzelnen Phasen eines klassischen Pumpversuchs unter Anwendung verschiedener Methoden geohydraulisch auszuwerten. Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Bestimmung der Durchlässigkeit aus der Absenkungskurve eines Langzeitpumpversuchs. In diesem Fall wurde eine Geradenanpassung nach dem Geradlinienverfahren [3] vorgenommen. Dazu wurde die gemessene Absenkung gegen den Logarithmus der Pumpzeit aufgetragen und aus der Steigung der in Abbildung 3 blau dargestellten Anpassungsgeraden in Kombination mit der zugrunde liegenden Pumprate die Transmissivität bestimmt.

Die Auswertung hydraulischer Testdaten aus Bohrungen der KW-Industrie gestaltet sich dagegen gänzlich unterschiedlich. Diese Daten werden vom RPF im Rahmen des Projektes GeotIS im Oberrheingraben erstmalig systematisch erhoben und ausgewertet. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den typischen Verlauf einer analogen Druckaufzeichnung, wie sie während eines so genannten Drill-Stem-Tests in vielen Bohrungen der KW-Industrie durchgeführt wurde.

In der Regel kamen bei der Druckaufzeichnung älteren Datums mit einem Uhrwerk verbundene Trommeln zum Einsatz, auf denen ein Papier mit vorgegebener Druck- und Zeitskala aufgebracht wurde. Ähnlich dem Prinzip eines klassischen Regenschreibers wurde auf dem sich mit der Trommel drehenden Papier ein Schreiber angesetzt, der die Druckdaten des im Testbereich installierten Druckmessgerätes direkt auf das Aufzeichnungspapier übertrug.

Die Interpretation einer solchen Druckaufzeichnung ist in Abbildung 4 ersichtlich. Der zeitliche Druckverlauf ist von rechts nach links zu lesen. Zu erkennen ist am allmählich ansteigenden Druck der Einbau des Testgestänges bis zum Erreichen des zu testenden Zielhorizontes (A–B). In der Tiefe werden anschließend Packer installiert, die den anvisierten Bohrungsabschnitt vom Rest des Bohrlochs hydraulisch abtrennen. Nach Leerpumpen des Testgestänges beginnt der eigentliche Test mit der Ventilöffnung (B–C). Während der nun folgenden Fließperiode findet ein Zustrom aus dem umliegenden Gestein in den Testabschnitt statt. Dabei steigt die Wassersäule im Testgestänge an (C–D). Am Ende der Fließphase wird das Ventil in der Tiefe wieder geschlossen und der Druckanstieg im Testbereich beobachtet (D–E). Im Idealfall findet die Beobachtung während der Schließphase so lange statt, bis sich nahezu konstante Druckverhältnisse ergeben und damit der Aquiferdruck erreicht worden ist. In der Praxis wird die Beobachtung des Wideranstiegs aus Zeit- und Kostengründen meist vor Erreichen des Aquiferdrucks abgebrochen. Mit geeigneten Verfahren kann dennoch auf den Aquiferdruck geschlossen werden. Der Test endet schließlich mit dem Abbau der Packer und dem Aufbau des ursprünglichen Spülungsdrucks. Anschließend wird das Testgestänge demontiert (F–G). Aufgrund der kontinuierlichen Aufzeichnung mit Hilfe einer Trommel, springt im vorliegenden Beispiel die Druckaufzeichnung während des

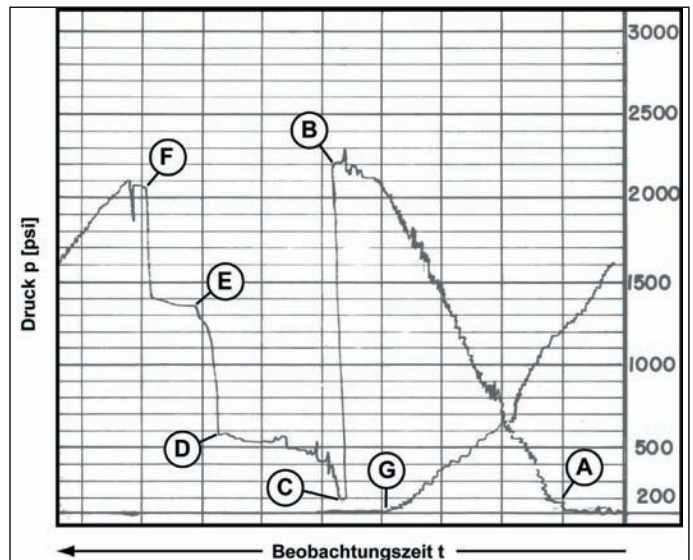


Abb. 4 Beispiel einer analogen Aufzeichnung des Druckverlaufs während eines Drill-Stem-Tests (DST) mit Interpretation

Abschnittes F–G vom linken Ende des Aufzeichnungspapiers auf die rechte Seite und wird dort fortgesetzt. In ungünstigen Fällen kann es aus diesem Grund zu Überlappungen der Aufzeichnungen kommen, die eine Interpretation und das Auslesen der Daten zusätzlich erschweren. Solche sich überschneidenden Druckkurven treten hauptsächlich dann auf, wenn Fließ- und Schließphasen jeweils doppelt ausgeführt wurden.

Die Datenaufbereitung für die Auswertung des Tests konzentriert sich auf die Testabschnitte C–D und D–E, da lediglich die Fließ- und Schließphasen eines Tests für eine geohydraulische Auswertung geeignet sind [7]. Die analoge Vorlage muss zu diesem Zweck gescannt werden. Die digitalen Bilddaten lassen eine Korrektur von häufig auftretenden Achsenverzerrungen zu, wie sie z. B. durch schräg eingesetzte oder feucht gewordenen Aufzeichnungspapiere entstehen können. Nach Anpassung der Daten an ein hoch aufgelöstes Raster, können die Druckinformationen manuell ausgelesen werden.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Auswertung einer Fließphase. Geohydraulisch handelt es sich dabei um so genannte Slugtests, die mit einem geeigneten hydraulischen Verfahren ausgewertet werden können. Im Beispiel wurde mit Hilfe des Verfahrens nach [1, 2, 6] eine theoretische Kurve (Typkurve) an die gemessenen Druckdaten angepasst und ausgewertet.

Das RPF hat in zahlreichen Bohrungen auf deutscher und französischer Seite des Oberrheingrabens und im baden-württembergischen Teil des Molassebeckens geohydraulische Auswertungen durchgeführt und Transmissivitäten ( $T [m^2/s]$ ) ermittelt. Die Transmissivitäten wurden auf die Länge des getesteten Bohrlochabschnittes ( $H [m]$ ) normiert ( $T/H$ ), d. h. sie wurden in so genannte Gebirgsdurchlässigkeiten umgerechnet. Häufigkeitsverteilungen sind eine Möglich-

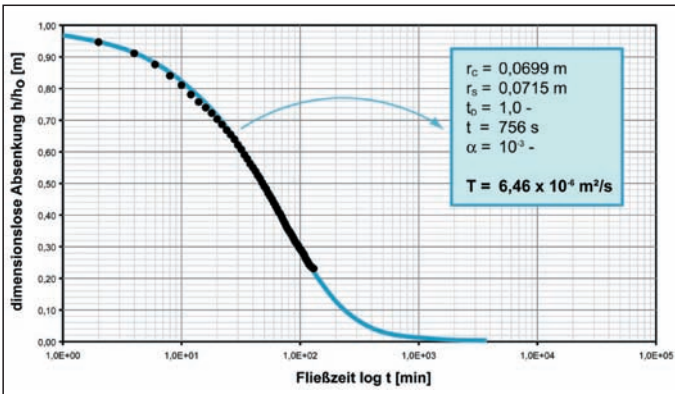


Abb. 5 Beispiel für die Auswertung der Fließphase eines Drill-Stem-Tests (DST) anhand von Typkurven zur Auswertung von Slugtests nach [1, 2, 6]

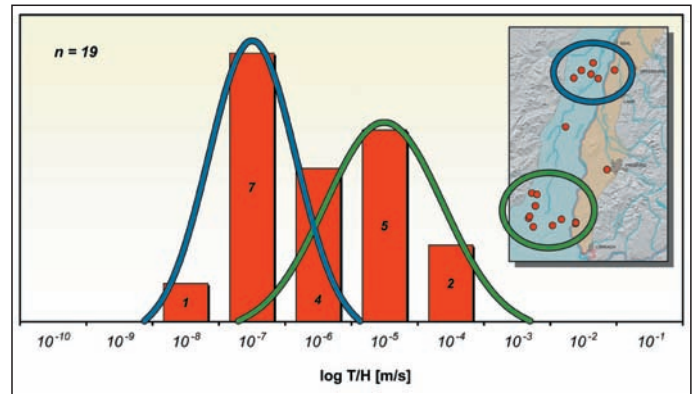


Abb. 6 Häufigkeitsverteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten in der Hauptrogenstein-Formation (Oberrheingraben)

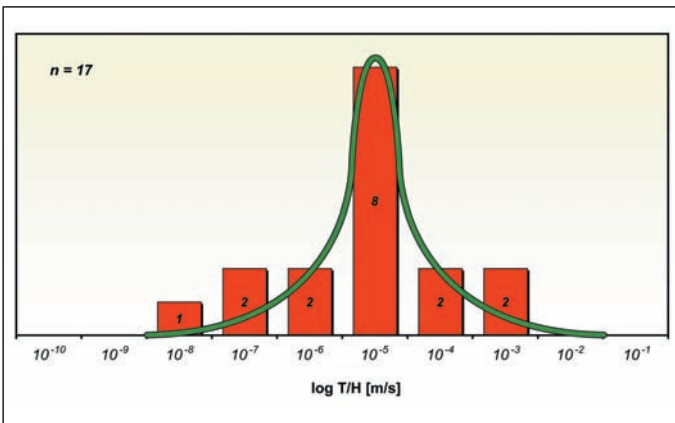


Abb. 7 Häufigkeitsverteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten in der Oberen Muschelkalk-Formation (Oberrheingraben)

keit, die Ergebnisse aus diesen Auswertungen summarisch darzustellen und daraus weitere Rückschlüsse zu ziehen. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Häufigkeitsverteilung der normierten Gebirgsdurchlässigkeiten im Hauptrogenstein. Auffallend ist die Tatsache, dass die Gebirgsdurchlässigkeiten im Hauptrogenstein einer zweigipfligen Verteilung folgen. Diese bimodale Verteilung äußert sich in zwei deutlich zu differenzierenden Maxima. Die Mittelwerte dieser beiden Verteilungen betragen  $T/H = 1,79 \times 10^{-6}$  m/s im südlichen und  $T/H = 1,43 \times 10^{-8}$  m/s im nördlichen Bereich. Die beiden Verteilungen lassen sich zwei unterschiedlichen Regionen zuordnen. Während tendenziell niedrigere Durchlässigkeiten auf der Höhe Offenburg–Lahr auftreten, sind höhere Werte in den südlich davon gelegenen Regionen angesiedelt und korrelieren mit einem Fazieswechsel im Hauptrogenstein (Übergang zur so genannten Schwäbischen Fazies im Raum nördlich von Strassburg–Kehl mit zunehmender Vermergelung des Hauptrogensteins). Im südlichen Bereich liegen die höchsten Durchlässigkeiten bei  $T/H = 2,4 \times 10^{-5}$  m/s, aber es können auch hier vereinzelt geringe Durchlässigkeiten von unter  $10^{-8}$  m/s auftreten. Im nördlichen Bereich wurden die höchsten Werte zu  $T/H = 10^{-6}$  m/s bestimmt und die niedrigsten zu  $10^{-8}$  m/s. Hohe Durchlässigkeiten wie im Süden vereinzelt angetroffen mit Größen-

ordnungen von über  $10^{-5}$  m/s wurden im Norden nicht beobachtet.

Ganz anders sieht die Verteilung der Durchlässigkeiten im Oberen Muschelkalk des links- und rechtsrheinischen Oberrheingrabens aus (Abb. 7). Die ermittelten Werte folgen einer eingipfligen Log-Normalverteilung mit Mittelwert  $T/H = 1,83 \times 10^{-6}$  m/s und einer Standardabweichung, die in einem engen Bereich zwischen  $1,05 \times 10^{-7}$  und  $3,17 \times 10^{-5}$  m/s liegt (Abb. 7). Damit entspricht die mittlere Durchlässigkeit im Oberen Muschelkalk in etwa den Werten, wie sie für die Hauptrogenstein-Formation im südlichen Oberrheingraben ermittelt wurden.

Für die Buntsandstein-Formation ergibt sich eine größere Streuweite der Durchlässigkeiten mit Werten zwischen  $2,9 \times 10^{-11}$  m/s und  $1,2 \times 10^{-5}$  m/s. Der Mittelwert liegt bei  $2,43 \times 10^{-7}$  m/s und ist damit um eine Dekade niedriger angesiedelt als die mittlere Durchlässigkeit im Oberen Muschelkalk. Aufgrund der höheren Tiefenlage, ist der Umfang der Eingangsdaten gegenüber den Formationen des Hauptrogensteins und Oberen Muschelkalks mit 12 Einzelwerten etwas geringer.

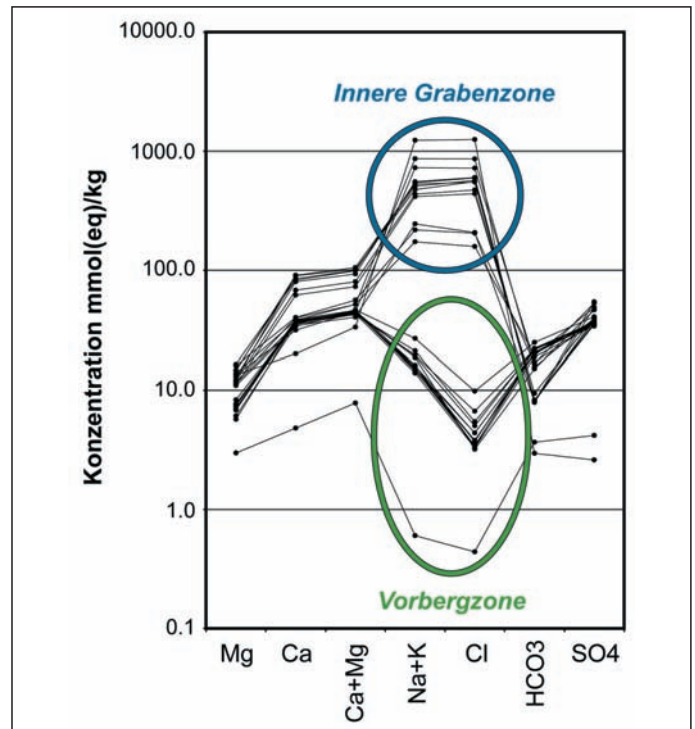


Abb. 8 Schöller-Diagramm verschiedener hydrochemischer Analysen aus der Oberen Muschelkalk-Formation (Oberrheingraben)

#### 4 Hydrochemische Eigenschaften der tiefen Wässer

Neben den hydraulischen Auswertungen bildet die Hydrochemie einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten im Projekt Geot-IS. Der Bereich Hydrochemie behandelt die Fragestellung einer hydrochemischen Charakterisierung der im Untergrund anzutreffenden Fluide und Gase. Diese ist insbesondere für die Planung und den Betrieb geothermischer Anlagen unter den Aspekten Lösung, Fällung und Korrosion von großer Bedeutung.

Die Analysedaten wurden zusammengestellt, einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und in einer Datenbank erfasst. Die Tiefenwässer im Oberrheingraben sind durchweg hochmineralisiert und Na- und Cl-reich. Abbildung 8 zeigt die Hauptinhaltsstoffe verschiedener Analysen aus dem Oberen Muschelkalk in einem Schöller-Diagramm. Die jeweiligen Konzentrationen der dargestellten Inhaltsstoffe sind logarithmisch dar-

gestellt. Der Feststoffinhalt (TDS) als Summenparameter der im Wasser gelösten Inhaltsstoffe schwankt in den einzelnen dargestellten Analysen in weiten Grenzen zwischen rund 14 und 74 g/kg. Der Feststoffinhalt ist an die Tiefenlage des Aquifers gekoppelt und nimmt mit der Tiefe zu [5]. Gleichzeitig verdeutlicht das Schoeller-Diagramm, dass im Aquifer des Oberen Muschelkalks zwei verschiedene Wassertypen vorliegen können. Die niedriger mineralisierten Wässer im Bereich der Vorbergzone sind reich an Calcium, Sulfat und Hydrogenkarbonat (Abb. 8). Die tiefer liegende Wässer in der inneren Grabenzone sind höher mineralisiert und reich an Natrium und Chlorid. Der Anteil an Sulfat ist höher als der von Hydrogenkarbonat. Beide Wassertypen im Oberen Muschelkalk sind für sich genommen sehr einheitlich. Unabhängig von der schwankenden, insgesamt jedoch generell sehr hohen Gesamtmineralisation in der inneren Grabenzone, lässt die Darstellung im Schoeller-Diagramm damit Aussagen über die zu erwartende relative Zusammensetzung der Fluide des Oberen Muschelkalks im Oberrheingraben für geothermische Projekte zu und liefert wichtige Informationen für die Projektierung einer geothermischen Anlage.

Die Wässer im Hauptrogenstein zeigen ein ähnliches Verhalten. Die flacher lagernden Aquifere enthalten geringer mineralisierte Calcium-Hydrogenkarbonat-reiche Wässer. Die tiefen Wässer sind dagegen Natrium-Chloridreich und zeigen eine höhere Konzentration von Feststoffinhalten mit zum Teil deutlich über 100 g/kg. Entsprechende Beobachtungen gelten auch für die Wässer der Buntsandstein-Formation.

### 5 Geologisches Untergrundmodell

Grundlage für die Gewinnung einer Vorstellung über den Bau des geologischen Untergrundes bilden seismische Messungen. Das Regierungspräsidium Freiburg (RPF) hat im Rahmen des Projektes GeotIS für die baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und des Molassebeckens reflexionsseismische Daten aus der Erdöl- und Erdgasexploration zusammengetragen und erstmalig umfassend digital aufgearbeitet.

Die seismischen Sektionen stammen aus zahlreichen seismischen Messkampagnen

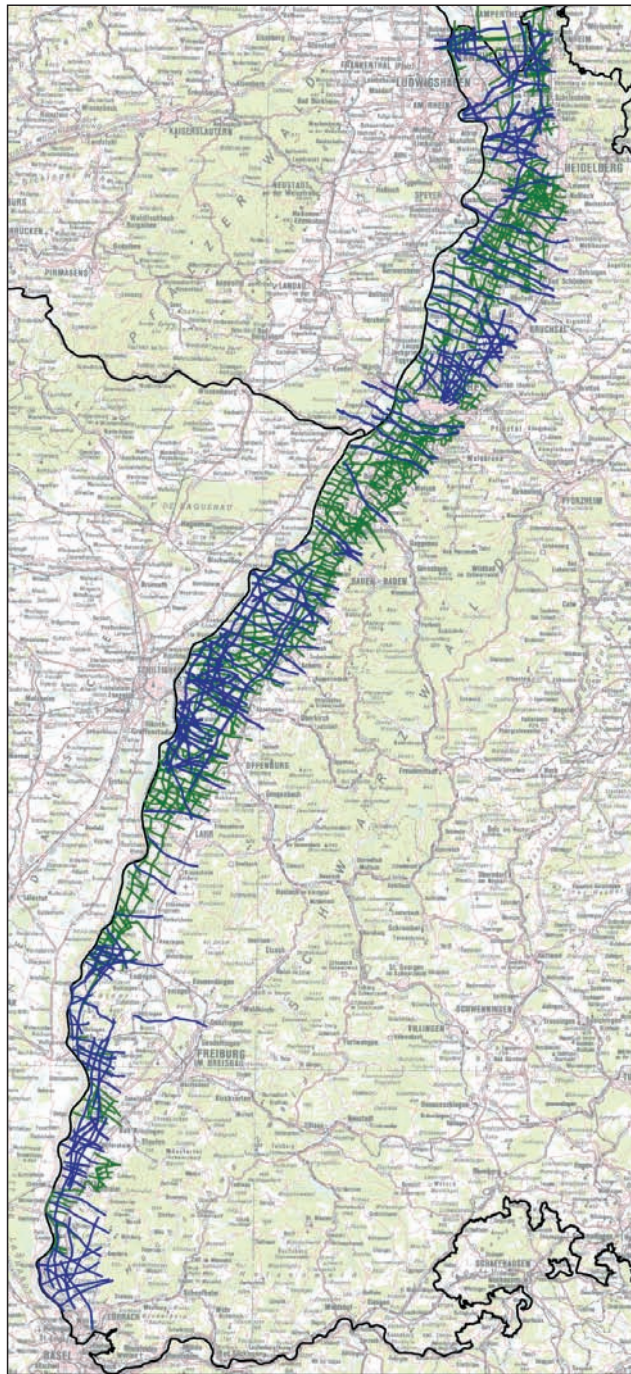


Abb. 9 Übersicht über die im RPF digital erfassten reflexionsseismischen Sektionen im baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens. Dargestellt sind Daten aus den Jahren vor 1975 (grün) und nach 1975 (blau)

der Kohlenwasserstoffindustrie, beginnend in den 1950er Jahren und anhaltend bis Anfang der 1990er Jahre. Aus qualitativer Sicht sind dabei seismische Daten aus den Jahren vor 1975 und Sektionen aus Kampagnen der Jahre nach 1975 zu unterscheiden. Diese Unterschiede sind hauptsächlich auf die während der 1960er Jahre einsetzende Einführung der Digitaltechnik und die damit verbundenen Fortschritte in der digitalen Datenaufnahme und Datenaufbereitung zurückzuführen.

Die seismischen Daten aus den Jahren vor 1975 mit Schwerpunkt der 1950er Jahre basieren in der Regel auf dem Verfahren der so

genannten Sprengseismik, bei der mit Hilfe von Sprengladungen ein Impuls mit breitem, jedoch nicht kontrollierbarem Frequenzspektrum in den Untergrund eingebracht wird. Die Datenaufnahme beruhte auf der reflexionsseismischen Methode der Einfachüberdeckung (»continuous profiling«). Erst zu Beginn der 1960er Jahre kam mit zunehmender Verbreitung digitaler Aufnahmeverfahren die Methode der Mehrfachüberdeckung zum Einsatz. Der Überdeckungsgrad in den daraus abgeleiteten gestapelten Sektionen ist in den frühen Jahren der Digitaltechnik noch sehr gering, der Signal-/Rauschabstand als Verhältnis zwischen Nutz- und Störsignal entsprechend noch relativ niedrig. Dem RPF liegen diese frühen seismischen Aufzeichnungen bis auf wenige Ausnahmen in Form von so genannten »line drawings« vor. In diesen interpretierten und tiefenmigrierten Darstellungen sind häufig nur einzelne, zum Teil nicht näher identifizierte Hauptreflektoren und tektonische Großstrukturen wiedergegeben. Sie sind aus diesem Grund nur eingeschränkt im Rahmen aktueller Neuinterpretationen und geologischer Modellierungen zu verwenden, liefern jedoch in der Regel wichtige Interpretationsgrundlagen und können je nach regionaler Datendichte bedeutende ergänzende Informationen bereitstellen.

Seismische Sektionen aus den Jahren nach 1975 liegen dem RPF als seismische Abspielungen (Seismogramme) vor. Parallel zur Einführung der Mehrfachüberdeckung sowie der digitalen Aufnahme und Bearbeitung seismischer Daten wurde das so genannte Vibroseis-Verfahren etabliert. Dabei wird dem Boden statt eines instantanen Impulses durch eine Sprengladung ein kontrollierter Schwingungszug aufgeprägt. Der Vorteil der damit erzeugten Datensätze gegenüber

älteren seismischen Daten liegt in den deutlich gesteigerten Überdeckungsgraden mit einer einhergehenden Verbesserung der Signal-/Rauschabstände und gleichzeitig erhöhter Auflösung. Darüber hinaus bilden seismische Abspielungen im Vergleich zu »line drawings« tektonische Strukturen und lithostratigraphische Grenzflächen detaillierter ab und ermöglichen eine vollständige geologische Interpretation. In sehr seltenen Fällen konnte das RPF auf migrierte und damit teufen- und neigungsgerecht dargestellte Sektionen zurückgreifen.

Die Daten aus den seismischen Erkundungen der KW-Industrie stehen dem RPF aus-

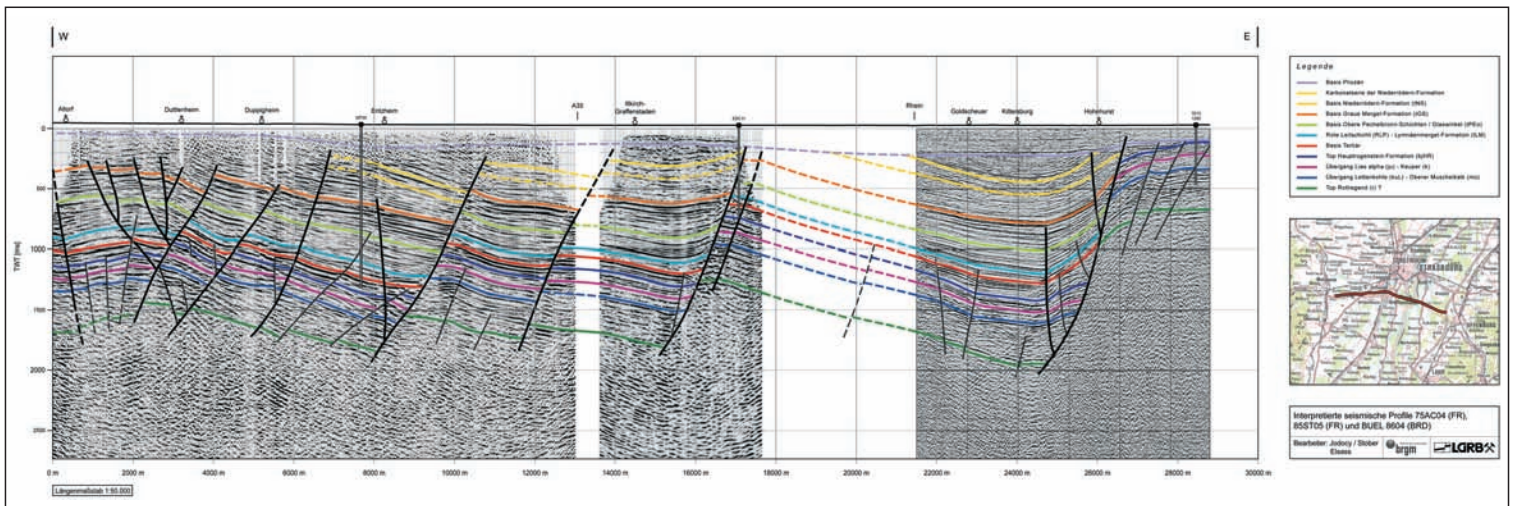


Abb. 10 Querprofil durch den Oberrheingraben im Bereich Strassburg – Kehl auf der Basis reflexionsseismischer Daten

schließlich analog in Form von Akquisitions- und Processingberichten, Lageplänen und seismischen Abspielungen bzw. »line drawings« Form zur Verfügung. Methodisch gestaltet sich die Vorgehensweise zur digitalen Aufarbeitung der analogen seismischen Daten für beide Datenarten identisch. Zur korrekten Lokalisation der einzelnen seismischen Linien ist eine georeferenzierte manuelle Digitalisierung der analogen Lagepläne notwendig. Sämtliche Lokalisationspunkte einer seismischen Sektion wurden im Anschluss in einem geographischen Informationssystem attribuiert. Parallel dazu wurden die seismischen Sektionen mit hoher Auflösung gescannt und anschließend einer umfangreichen Nachbearbeitung unterzogen. Abbildung 9 zeigt beispielhaft den vorliegenden und aufgearbeiteten Datenbestand im Oberrheingraben. Die Jahre vor 1975 sind in Abbildung 9 grün, die Jahre nach 1975 blau dargestellt. Der Datenumfang mit rund 1.350 digitalisierten Linien bzw. rund 1.000 gescannten Sektionen ist erheblich. Der Datenumfang für das Molassebecken liegt mit rund 1.400 seismischen Sektionen in einer vergleichbaren Größenordnung. Die seismischen Daten des Molassebeckens werden vom RPF ebenfalls digital aufgearbeitet.

Die digitalisierten Lagepläne und gescannten Seismiksektionen bilden in Kombination mit Tiefbohrungen die Datengrundlage für die Erarbeitung zweidimensionaler geologischer Tiefenschnitte durch den Oberrheingraben und das Molassebecken. Für eine plausible Auswertung müssen die seismischen Reflexionshorizonte mit punktuellen lithostratigraphischen Bohrprofilen korreliert werden. Die seismischen Sektionen liefern Informationen über den strukturellen Bau des geologischen Untergrundes, die Lage von Störungen sowie die Tiefenlage und Mächtigkeit potenzieller hydrogeothermischer Nutzhorizonte.

Bei der Konstruktion eines Untergrundmodells stellen Daten aus den Jahren nach 1975 die primäre Datenquelle dar. Die Abbildung

10 zeigt die Interpretation von mehreren, zu einem Querprofil aneinander gereihten seismischen Sektionen durch den Oberrheingraben auf der Höhe Straßburg–Kehl. Anhand der Daten von drei im Profilschnitt liegenden Tiefbohrungen war die Identifikation von Schichtgrenzen in der seismischen Sektion möglich und über die gesamte Ausdehnung der Sektion zu verfolgen. Einen Leithorizont für geringe Tiefenbereiche bildet im rechtsrheinischen Abschnitt des Profils die Basis der Lockergesteine, die sich als deutliche Diskordanz zu den darunter liegenden tertiären Sedimenten abzeichnet. Diese Diskordanz ist linksrheinisch nur vereinzelt in dieser Deutlichkeit ausgebildet, kann jedoch andeutungsweise über die gesamte Profilausdehnung verfolgt werden. Ein weiterer zentraler Leithorizont ist die Basis der Grauen Mergel-Formation (Tertiär). Die Basis der tertiären Sedimente deutet sich im Vergleich zu den darunter anstehenden Schichten des Mitteljura mit einer reichsweit leicht diskordanten Lagerung an. In den prätertiären Einheiten des Mesozoikums lassen sich der Top der Hauptrogenstein-Formation sowie die Übergangsbereiche zwischen Unterjura- und Keuper-Formation sowie Lettenkeuper- und Oberer Muschelkalk-Formation abgrenzen. Darunter dürfte das Dach der paläozoischen Rotliegend-Formation erkennbar sein, welches mit rund 3100 mNN seine größte Tiefenlage in der östlich abgebildeten Halbgrabenstruktur der Kehler Mulde erreicht. Bei einer erwarteten Mächtigkeit der Rotliegend-Formation zwischen 50 und 60 m ergibt sich im Querschnitt eine maximale Tiefenlage der Oberfläche des Kristallinen Grundgebirges von rund 3.150 mNN.

Darüber hinaus konnten Störungen unterschiedlichen Alters und Versatzbetrages identifiziert werden. Strukturgeologisch lassen sich zahlreiche antithetische Verwerfungen mit teilweise hohen Versatzbeträgen von einigen hundert Metern über das gesamte Profil erkennen. Markant bilden sich im Schnitt zwei dominierende Strukturen ab.

Im Westen im Bereich Duttlenheim ist eine negative »Flower-Structure« erkennbar, die auf Scherbewegungen und eine damit verbundene Ausbildung von Pull-Apart-Strukturen hindeutet. Im Osten ist bei Hohnhurst eine markante Störung erkennbar, die die bereits erwähnte Halbgrabenstruktur der Kehler Mulde gegen die sich nach Osten in Richtung Schwarzwald anschließende Hochlage abgrenzt und einen Versatz von über 1000 Metern aufweist.

Insgesamt steht der Querschnitt exemplarisch für die im gesamten Oberrheingraben anzutreffenden komplizierten geologischen Strukturen, die auf ein äußerst komplexes Bruchschollensystem zurückzuführen sind, welches während der wechselnden Phasen der Grabenbildung und den damit verbundenen Änderungen im regionalen Spannungsfeld entstand. Aus der Kenntnis des regionalen geologischen Baus des Untergrundes lassen sich anhand von geologischen Profilschnitten Hinweise auf erreichbare Temperaturen, Förderraten sowie auf Kompressions- und Dehnungsstrukturen ableiten. Geologische Schnitte tragen damit entscheidend zum Erfolg oder Misserfolg einer Bohrung bei.

**6 Zusammenfassung und Ausblick**  
Im Rahmen des Projektes GeotIS wurden durch das Regierungspräsidium Freiburg für die baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und Molassebeckens hydraulische, hydrochemische und geothermische Daten zusammengetragen und ausgewertet. Darüber hinaus erstellt das RPF anhand seismischer Sektionen zahlreiche tiefegeologische Profilschnitte. Die zusammengestellten Daten und Profilschnitte bilden die Grundlage zur Abschätzung von zu erwartenden Förderraten und Temperaturen in potenziellen hydrogeothermischen Nutzhorizonten. Sie dienen als Basis für eine verlässliche Abschätzung des Fündigkeitsrisikos bei der Projektierung hydrogeothermischer Anlagen. Die Arbeiten des RPF im

Projekt GeotIS werden im Frühjahr 2009 abgeschlossen sein. Mitte 2009 wird das Informationssystem online gehen. Auf der Homepage des Projektes GeotIS sind unter [www.geotis.de](http://www.geotis.de) aktuelle Informationen über den Stand der Arbeiten in Form von Abbildungen, Ergebnisberichten und Tagungsbeiträgen abrufbar. Bereits voll funktionsfähig ist die Internet-Recherche für das Verzeichnis geothermischer Standorte.

Unser Dank gilt dem BMU für die Bereitstellung der Fördergelder (Fördernummer: 0327542). Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei der Projektleitung des GGA und den bundesweiten Projektpartnern für die sehr angenehme und produktive Zusammenarbeit. Den Kollegen des »Service Géologique Régional Alsace« des »Bureau de Recherches Géologiques et Minières« (BRGM) in Straßburg sei an dieser Stelle herzlich gedankt, allen voran Herrn Directeur Dr. Phillip Elsass. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hans-Jürgen Brauner vom LBEG für seine Unterstützung bei der Beschaffung seismischer Daten. Dem Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e. V. (WEG) danken wir für die Genehmigung zur Verwendung einer seismischen Sektion. Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei den studentischen Hilfskräften Kathrin Panschar und Joachim Tibi vom Regierungspräsidium Freiburg.

#### Literatur

- [1] Black, J. H. (1985): The Interpretation of Slug Tests in fissured Rocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 18, 2, S. 161–171.
- [2] Cooper, H. H., Jr., Bredehoeft, J. D., und Papadopoulos, I. S. (1967): Response of a finite-diameter Well to an instantaneous Charge of Water. *Water Resources Research*, 3, 1, S. 263–269.
- [3] Cooper, H. H. und Jacob, C. E. (1946): A Generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Trans. Am. Geoph. Union*, 27, S. 526–534.
- [4] DVGW-Arbeitsblatt W 111 (1997): Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn.
- [5] He, K., Stober, I. und Bucher, K. (1999): Chemical evolution of thermal waters from limestone aquifers of the Southern Upper Rhine Valley. *Applied Geochemistry*, 14, S. 223–235.
- [6] Papadopoulos, S. S., Bredehoeft, J. D. und Cooper, H. H., Jr. (1973): On the Analysis of »Slug Test« Data. *Water Resources Research*, 9, 4, S. 1087–1089.
- [7] Ramey, H. J., Jr., Agarwal, R. G., Martin, I. (1975): Analysis of »Slug Test« or DST Flow Period Data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 3, S. 37–47.
- [8] Schulz, R., Agemar, T., Alten, J.-A., Kühne, K., Maul, A.-A., Pester, S. und Wirth, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. *ERDÖL ERDGAS KOHLE*, 123, 2, S. 76–81.
- [9] Stober, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. *Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42*, 204 S., Hannover.

