



**Baden-Württemberg**  
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG  
ABTEILUNG UMWELT

**Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung  
standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit  
hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg  
(GeoTool)**

**- Endbericht -**

Projektleitung:	Prof. Dr. Ingrid Stober
Auftraggeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Projektträger Jülich (PTJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0325136
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2009 bis 31.03.2013
Berichtsdatum:	12.04.2013
Archivnummer:	4580/1.006

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325136 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

**Autoren (Regierungspräsidium Freiburg (RPF), Abteilung Umwelt):**

Jodocy, M. (Abschn. 4, 9)

Stober, I. (Abschn. 1-8, 10), Herausgeberin

**Inhalt**

Zusammenfassung	3
1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen	4
3. Planung und Ablauf	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn, Datenbestand am Projektende	6
4.1 Gebirgsdurchlässigkeiten T/H (m/s), normierte Produktivitätsindizes PI/H (m/s)	8
4.2 Porositäten und Permeabilitäten	10
4.3 Qualitative hydraulische Daten	10
4.4 Hydrochemische Daten	11
4.5 Temperaturdaten	11
4.6 Reflexionsseismische Daten	12
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
6. Ergebnis	14
6.1 Überblick, wesentliche Grundlagen	15
6.2 Hydraulik – Gebirgsdurchlässigkeiten	16
6.2.1 Gebirgsdurchlässigkeiten aus hydraulischen Tests	18
6.2.2 Produktivitätsindizes, Gegenüberstellung zu den Gebirgsdurchlässigkeiten aus hydraulischen Tests	23
6.2.3 Permeabilitäten/Durchlässigkeiten aus Bohrkernen und geophysikalischen Bohrlochvermessungen, Bewertung	26
6.2.4 Durchlässigkeiten aus Schichtenverzeichnissen	28
6.2.5 Informationen aus seismischen Sektionen im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit	31
6.2.6 Räumliche Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit	38
6.3 Geologie, Temperaturverhältnisse	42
6.4 Hydrochemie der Tiefenwässer	46
6.4.1 Gesamtmineralisation - Wasserinhaltsstoffe	47
6.4.2 Gasgehalte	51
6.4.3 Zur Herkunft und Genese der Tiefenwässer	51
6.4.4 Sättigungszustände der Tiefenwässer	54
6.4.5 Wechselwirkung von Hydrochemie und Hydraulik	55
7. Verwertbarkeit	57
8. Fortschritt Anderer	58
9. Publikationen und Vorträge	58
9.1 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften	58
9.2 Publikationen in populärwissenschaftlichen Zeitschriften	59
9.3 Tagungsstände	59
9.4 Vorträge und Abstracts	60
9.5 Poster und Abstracts	61
9.6 Berichte (unveröffentlicht)	61
9.7 Zwischenberichte (unveröffentlicht)	63
10. Im Endbericht zitierte Literatur	63
Dank	68
Anlagen: Inhaltsverzeichnis CD-ROM ( <i>Anhang, Homepage</i> )	68

## Zusammenfassung

Der Faktor des Fündigkeitsrisikos stellt bei der Projektierung geothermischer Anlagen eine der entscheidenden Planungsgrößen dar. Die ausschlaggebenden Kenngrößen im Rahmen der Vorbereitung von Geothermieprojekten mit hydrothermalen Wärmeenergienutzung sind hierbei die erreichbare Förderrate, die Fördertemperatur sowie Dichte und spezifische Wärmekapazität des heißen, z.T. hochkonzentrierten Tiefenwassers. Darüber hinaus sind Informationen über die Zusammensetzung der im Untergrund zirkulierenden Fluide unverzichtbar, da sie Rückschlüsse auf deren technische Handhabbarkeit unter dem Aspekt Lösung/Fällung geben, aber auch auf die o.g. Dichte und Wärmekapazität zulassen. Nur bei Kenntnis dieser Größen kann eine Vorerkundung qualitativ bewertet und das Fündigkeitsrisiko abgeschätzt werden.

Mit dem Projekt GeoTool hat das Regierungspräsidium Freiburg ein geothermisches Prognosetool zur standortbezogenen Abschätzung der Fündigkeit relevanten Parameter für alle potentiellen geothermischen Nutzhorizonte in den Baden-Württembergischen Teilen des Oberrheingraben und des Molassebeckens wie im Projektantrag beschrieben entwickelt. Das Prognosetool ist über ein Internetportal (<http://www.rp.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1337770/index.html>) für Jeden frei zugänglich. Das Prognosetool im engeren Sinn setzt sich aus einzelnen Algorithmen, d.h. aus mathematischen Beziehungen zwischen verschiedenen Größen, zusammen, um den harten Datenbestand der für die Abschätzung des Fündigkeitsrisikos relevanten Daten zu vergrößern. Zur Entwicklung und Kalibrierung der einzelnen Algorithmen wurden bestehende, zu erweiternde und durch "unscharfe" Informationen ergänzte Datenbestände verwendet, um eine quantitativ belegte Vorhersage zu ermöglichen, die den von der Wirtschaft gestellten inhaltlichen Fragestellungen und qualitativen Anforderungen gerecht wird. Die anhand der erzeugten Grundlagendaten prognostizierten Größen sind Basisinformationen für ein geothermisches Projekt.

Als weiteres Ergebnis ließen sich aus den Untersuchungen Hinweise auf besser und weniger gut geeignete Untersuchungsverfahren ableiten sowie auch Hinweise darauf, unter welchen Bedingungen auch weniger gute Untersuchungsverfahren akzeptable Ergebnisse liefern (Abschn. 6.2.2, 6.2.3). Auch konnten in Rahmen des Projektes GeoTool neue Untersuchungsverfahren entwickelt werden, die geothermisch bedeutende Informationen über den Untergrund liefern (Abschn. 6.2.4, 6.2.5). In Zusammenarbeit mit dem LIAG wurde ein 3D-Temperaturmodell für Baden-Württemberg entwickelt (AGEMAR et al. 2013) und zusammen mit den Bayerischen Projektpartnern (LfU) eine Karte der Gebirgsdurchlässigkeiten und der hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer im Oberjura des gesamten voralpinen Molassebeckens entwickelt (BIRNER et al. 2012).

Die einzelnen Punkte wurden genau wie im Projektantrag bei den "wissenschaftlichen und technischen Arbeitszielen des Vorhabens" angegeben erarbeitet. Die im Projekt gesetzten Ziele konnten alle realisiert werden. Die durchgeführten Arbeiten sind im Hinblick auf die Bereitstellung wichtiger geowissenschaftlicher Zusammenhänge, die auf der Basis von Grundlagendaten ermittelt wurden, für die hydrogeothermische Ressourcennutzung auch von wissenschaftlichem Interesse.

Die Projektmittel waren für die erbrachten Leistungen notwendig und angemessen. Die Zuwendung wurde ausschließlich für die Aufgabenstellungen im Projekt verwendet.

## 1. Aufgabenstellung

Der Faktor des Fündigkeitsrisikos stellt bei der Projektierung geothermischer Anlagen eine der entscheidenden Planungsgrößen dar. Im Rahmen der Vorbereitung von Geothermieprojekten mit hydrothermalen Wärmeenergienutzung sind die erreichbare Förderrate, die Fördertemperatur sowie Dichte und spezifische Wärmekapazität des heißen, z.T. hochkonzentrierten Tiefenwassers die ausschlaggebenden Kenngrößen, wenn es um die Beurteilung des Fündigkeitsrisikos geht. Darüber hinaus sind Informationen über hydrochemische Analysen unverzichtbar, da sie Aufschluss über die Zusammensetzung der im Untergrund zirkulierenden Fluide geben und Rückschlüsse auf deren technische Handhabbarkeit unter dem Aspekt Lösung/Fällung, aber auch auf die o.g. Dichte und Wärmekapazität zulassen. Nur bei Kenntnis dieser Größen kann eine Vorerkundung qualitativ bewertet und das Fündigkeitsrisiko abgeschätzt werden.

Das Regierungspräsidium Freiburg hatte im Projekt GeoTool die Aufgabe, ein Prognosetool der zur standortbezogenen Abschätzung der Fündigkeit relevanten Parameter für die baden-württembergischen Teile des Oberrheingraben und des Süddeutschen Molassebeckens zu entwickeln. Gemäß Projektantrag (Datum 04.02.2009) sollte sich das Prognosetool dabei aus einzelnen Algorithmen, d.h. aus mathematischen Beziehungen zwischen verschiedenen Größen, zusammensetzen. Zur Entwicklung und Kalibrierung der einzelnen Algorithmen sollten bestehende, zu erweiternde und durch "unscharfe" Informationen gegebenenfalls noch zu ergänzende Datenbestände verwendet werden, um eine quantitativ belegte Vorhersage zu ermöglichen, die den von der Wirtschaft gestellten inhaltlichen Fragestellungen und qualitativen Anforderungen gerecht wird. Die anhand der erzeugten Grundlagendaten prognostizierten Größen sollten hierbei Basisinformationen für ein geothermisches Projekt darstellen.

Die Projektergebnisse sollten in das Internet des RPF eingestellt werden und damit kostenfrei über ein Internetportal potenziellen Interessenten aus Wirtschaft und Forschung zur Verfügung gestellt werden. Ein Andocken an das „Geothermische Informationssystem (GeotIS)“ war damit gewährleistet. Da die meisten Ursprungsdaten der Geheimhaltung unterliegen, sollten die abgeleiteten Informationen auf der Basis der zu entwickelnden Berechnungsansätze frei zugänglich sein.

## 2. Voraussetzungen

Im unmittelbar zuvor durchgeführten Projekt "Geothermisches Informationssystem für Deutschland (GeotIS, Fördernr.: 0327542)" wurden vom Regierungspräsidium Freiburg (RPF) für die Baden-Württembergischen Teile des Oberrheingraben und Molassebeckens bereits geothermisch relevante Datengrundlagen zusammengestellt, validiert und ausgewertet. Abschnitt 4 gibt einen detaillierten Überblick welche Daten bereits mit Abschluß des Projektes GeotIS vorlagen und welche Daten im Projekt GeoTool für die neu zu bearbeitenden und die bereits im Projekt GeotIS bearbeiteten geothermischen Nutzhorizonte neu erhoben und ausgewertet wurden. Bei dem Projekt GeoTool handelt es sich um ein Anschlussvorhaben an das Projekt GeotIS.

Zur Personalausstattung gehörten für die Gesamtlaufzeit des Projekts GeoTool ein wissenschaftlicher Mitarbeiter auf der Basis von „E13“ (TV-L West) sowie zwei studentische Hilfskräfte.

Zur Bewältigung der Aufgabenstellungen wurden als Software die beiden Programme SPSS (Statistics Base 17) und Surfer (Golden Software Surfer 8) und als Hardware zwei 24-Zoll-Monitore sowie ein Notebook erworben.

### 3. Planung und Ablauf

Über den Projektablauf wurde in engem Kontakt zum Zuwendungsgeber (PtJ) im Rahmen von halbjährigen Projekttreffen mit den Kooperationspartnern Bericht erstattet. Für die Jahre 2009, 2010, 2011 und 2012 wurden für den jeweiligen Berichtszeitraum Zwischenberichte mit Darlegung des Arbeits- und Zeitplans sowie Darlegung der erbrachten Leistungen erstellt (Abschnitt 9.7). Von Beginn an wurden die einzelnen Arbeitsschritte, wie im Projektantrag ausführlich dargestellt, festgelegt und gemäß dem beiliegenden Balkenplan (Abb. 1) abgearbeitet. Das Vorgehen gliedert sich in drei Hauptabschnitte: Datenrecherche, Auswertung der erhobenen Daten und Darstellung der Ergebnisse in Karten und Graphiken sowie die Entwicklung statistischer Modellierungsansätze und Prognosetechniken.

Arbeitsschritt	2009		2010			2011				2012		Verlängerung	2012		2013	
	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q		2 Q	3 Q	4 Q	1 Q
1. Erhebung von Grundlagendaten																
1.1 Literaturrecherche																
1.2 Behördeninterne Datenrecherche (Bohrunterlagen, Schichtenverzeichnisse, Geophysik etc.)																
a) Hydraulik (Poro-Perm-Daten, hydraulische Tests)																
Oberheingraben (BW)																
Molassebecken																
b) Hydrochemie																
Oberheingraben (BW)																
Molassebecken																
c) Geothermie (BHT-Werte, Logs, Korrekturparameter, Wärmeleitfähigkeit u. -kapazität)																
Oberheingraben (BW)																
Molassebecken																
d) Qualitative Informationen zur Hydraulik (Klüfte, Spülungsverluste, Bohrtlochausbrüche,...)																
e) Qualitative Informationen zur Hydrochemie (Dichte, TDS, Salzgehalt, Gasgehalte,...)																
1.3 Externe Datenrecherche (Hydraulik, Hydrochemie, Geothermie)																
a) Kohlenwasserstoffindustrie (Oberheingraben und Molassebecken)																
b) Frankreich (BRGM), Oberheingraben																
2. Auswertung der erhobenen Grundlagendaten																
a) Hydraulische Tests																
b) Hydrochemie																
c) Geothermie																
d) Qualitative Informationen																
3. Entwicklung statistischer Modellierungsansätze und Prognosetechniken																
3.1 Einarbeitung in Software																
3.2 Hydraulik																
3.3 Hydrochemie																
3.4 Geothermie																
4. Abschlußarbeiten und Schlußbericht																

Abb. 1: Balkenplan für den Projektablauf

Das Projekt GeoTool wurde unmittelbar nach Zustellung des Zuwendungsbescheids am 10.06.2009 zum 01.07.2009 begonnen, d.h. der Projektbeginn musste aus verwaltungstechnischen und personalrechtlich Gründen gegenüber dem Zuwendungsbescheid um einen Monat auf den 01.07.2009 verschoben werden. Mit Zuwendungsbescheid vom 05.07.2011 wurde das Projekt um 9 Monate verlängert. Damit ergibt sich infolge der Verschiebung gleich zu Beginn des Vorhabens der Abschluss des Projekts zum 31.03.2013.

Die Verlängerung des Projekts war notwendig, da die Datenrecherche in den Archiven des BRGM, des LIAG, des LBEG und bei den verschiedenen Firmen der Kohlenwasserstoff-Industrie (KW) wesentlich mehr hydraulische Testdaten, Poro-Perm-Daten, Produktivitätsindizes, Temperaturdaten und temperaturrelevante Korrekturparameter sowie hydrochemische Analysen erbracht hatte, als bei Projektplanung erwartet werden konnte. Zudem wurden wider Erwarten in großem Umfang zusätzliche Informationen zu den bereits im Projekt GeotIS (Fördernr.: 0327542) abgehandelten Nutzhorizonten gefunden. Bei Projektbeginn wurde von einer vollständigen Datenerfassung für diese Horizonte ausgegangen. Da alle recherchierten Daten ausschließlich in analoger Form

vorlagen, mussten sie mit aufwändigen Methoden aufbereitet (eingescannt, entzerrt, Daten ausgelesen), digital erfasst und anschließend ausgewertet werden. Die Datengrundlage hatte sich damit wesentlich gegenüber den Erwartungen vergrößert, wodurch sich die Aussagekraft des geplanten Prognosetools steigerte. Dem erhöhten Zeitaufwand wurde mit der Verlängerung der Projektlaufzeit Rechnung getragen.

Finanzierungsplan: Die Mittelausgaben erfolgten im Rahmen des Zuwendungsbescheides in Höhe von 292.545,00 Euro. Unerwartet höhere Ausgaben im Personalbereich wurden durch Einsparungen in anderen Bereichen kompensiert. Die Mittel im Zuwendungsbescheid wurden nicht überschritten. Eine detaillierte finanzielle Abrechnung erfolgt separat zwischen den Verwaltungen des RP Freiburg und des PtJ.

#### **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn, Datenbestand am Projektende**

Für die Region des Oberrheingrabens liegen die Geothermischen Synthesen (CEC) für den nördlichen und südlichen Grabenabschnitt aus den Jahren 1979 und 1981 vor. Diese Arbeiten lieferten erste Erkenntnisse über den komplexen geologischen Bau des Oberrheingrabens. In der Geothermischen Synthese wurden zudem Temperaturangaben und Angaben zur Aquifermächtigkeit gemacht. Sämtliche Erkenntnisse von Bohrungen und seismischen Sektionen aus den Jahren nach 1980 sind nicht enthalten. Die Hydrochemie und der Gasgehalt von Tiefenwässern wurden in den Geothermischen Synthesen (CEC) nicht aufgearbeitet.

Im Molassebecken wurden grundlegende Arbeiten für den Oberjura-Aquifer in den 1980er Jahren erstellt. Zu diesen Arbeiten gehören zum Beispiel BERTLEFF (1986), BERTLEFF et al. (1988), VILLINGER (1988), PRESTEL (1990) und STOBER & VILLINGER (1997). Für den Oberjura-Aquifer im Molassebecken wurde damals ein grenzüberschreitendes hydraulisches Modell zusammen mit Kollegen aus Bayern, Österreich und der Schweiz entwickelt.

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes mit dem Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben in Hannover (GGA, heute: LIAG) wurden Temperaturdaten aus Tiefbohrungen für gesamt Baden-Württemberg zusammengetragen und für verschiedene Tiefen (m u.Gel.) als Karten aufbereitet (SCHELLSCHMIDT & STOBER 2008).

Im Zuge des Projekts GeotIS (Fördernr.: 0327542) wurde durch das RPF im Baden-Württembergischen Teil des Oberrheingrabens und des Molassebeckens eine Aktualisierung der hydraulischen und hydrochemischen Datenbestände ausgewählter Tiefenaquifere vorgenommen und Altseismikdaten digitalisiert und gescannt. Im Oberrheingraben waren die im Projekt GeotIS zu untersuchenden geothermischen Nutzhorizonte der Buntsandstein-, der Muschelkalk- und der Hauptrogenstein-Aquifer. Die für die einzelnen Nutzhorizonte erhobenen und digitalisierten hydraulischen und hydrochemischen Daten wurden ausgewertet. Im Molassebecken war der Oberjura-Aquifer Untersuchungsgegenstand. Hier wurden die Karten für das hydraulische Potential sowie die Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten im Oberjura-Aquifer überarbeitet. Im Oberrheingraben wurden sämtliche reflexionsseismischen Altdaten aus den Jahren vor 2000 vollständig von analogen Vorlagen digitalisiert und geologische Quer- und Längsprofile erstellt. Im Molassebecken wurden alle seismischen Altdaten aus den Jahren vor 1975 vollständig digital erfasst und diese um einige gezielt ausgewählte Sektionen aus

den Jahren nach 1975 als Datenbasis für die Konstruktion geologischer Profilschnitte ergänzt. Auch für das Molassebecken wurden aus den seismischen Sektionen geologische Quer- und Längsprofile erstellt. Die Ergebnisse des Projektes GeotIS sind im gemeinsamen Endbericht (SCHULZ 2009) sowie auf der Projekthomepage ([www.geotis.de](http://www.geotis.de)) dokumentiert.



Abb. 2: Lage der Untersuchungsgebiete

Die Bearbeitungen des RPF der baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und Süddeutschen Molassebeckens im Rahmen des Projekts GeotIS bildeten eine erste Datengrundlage für das Projekt GeoTool. Zielhorizonte für das Projekt GeotIS waren im **Oberrheingraben** primär der Obere Muschelkalk und der Buntsandstein, darüber hinaus im Grabenbereich südlich von Straßburg der Hauptrogenstein. Zusätzlich wurden im Projekt GeoTool erstmalig im nördlichen Grabenabschnitt bereichsweise sandige Lagen in der tertiären Schichtenfolge sowie im gesamten Oberrheingraben das Rotliegende und die oberste Zone des Kristallinen Grundgebirges in die Untersuchungen einbezogen. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch die Erhebung und Auswertung entsprechender Daten aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens. Im westlichen **Molassebecken** bildeten der Oberjura (Malm), der Obere Muschelkalk sowie das Kristalline Grundgebirge die hydrogeothermischen Untersuchungsschwerpunkte. Lediglich der Oberjura war bislang im Projekt GeotIS Gegenstand der Betrachtungen (Abb. 2).

Das Projekt GeoTool hatte die Zusammenstellung, Aufarbeitung und Auswertung bestehender und noch zu beschaffender Grundlagendaten zum Ziel, die als gesicherte



Datenbasis für die Entwicklung von verlässlichen Algorithmen unabdingbar sind. Es wurden umfangreiche hydraulische, hydrochemische und thermische Daten für die genannten Nutzhorizonte zusammengestellt und ausgewertet. Zur Erhebung der sogenannten "harten" Datensätze kamen auch "weiche" Datensätze, wie beispielsweise Informationen aus Schichtenverzeichnissen mit qualitativen Angaben zur Durchlässigkeit hinzu. Diese "weichen" Informationen wurden im Projekt GeoTool validiert und wo möglich durch Ermittlung eines Algorithmus quantifiziert, um daraus "harte" Informationen zur Ergänzung der jeweiligen Datenbestände abzuleiten. Sämtliche recherchierten Daten lagen ausschließlich in analoger Form vor und mussten digital erfasst werden. Zudem erfolgte im Projekt GeoTool eine digitale Erfassung sämtlicher reflexionsseismischer Sektionen aus dem baden-württembergischen Teil des Südwestdeutschen Molassebeckens aus den Jahren nach 1975.

Nachstehend werden quantitative Angaben zum Umfang der erhobenen Daten und zur Art der Daten gemacht.

#### 4.1 Gebirgsdurchlässigkeiten T/H (m/s), normierte Produktivitätsindizes PI/H (m/s)

Für die Formationen des **Tertiärs (t)** liegen im Oberrheingraben insgesamt 187 hydraulische Angaben vor. Diese beinhalten neben Gebirgsdurchlässigkeiten Angaben zu Produktivitäten, Zustromraten und Ruhewasserspiegeln. Im Oberrheingraben wurden im Projekt GeotIS 10 Tests ausgewertet, die als Ergebnis der Auswertung eine Gebirgsdurchlässigkeit T/H (m/s) lieferten, wobei "T" die Transmissivität ( $m^2/s$ ) und "H" die Aquifermächtigkeit (m) ist. Die Transmissivität wird aus hydraulischen Tests ermittelt. Neben Daten aus dem baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens, wurden ebenfalls Informationen aus französischen Bohrungen recherchiert und in die Bearbeitungen miteinbezogen. Der Datenbestand konnte auf diese Weise erheblich erweitert werden. Durch die Ausrichtung im Projekt GeoTool auf die tertiäre Schichtenfolge, konnten 136 weitere Tests ausgewertet werden. Für das Tertiär im Oberrheingraben stehen damit 146 Tests aus 49 Bohrungen aus Baden-Württemberg und Frankreich zur Verfügung. Diese Daten konnten durch normierte Produktivitätsindizes PI/H (m/s) aus 50 Bohrungen ergänzt werden. "PI" ist der Produktivitätsindex, der aus der Förderrate und der zugehörigen Druckabsenkung ermittelt wird. Das Tertiär des Molassebeckens war im Projekt GeoTool nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der **Hauptrogenstein (bjHR)** ist im Oberrheingraben südlich von Straßburg anzutreffen und bildet dort einen potenziellen hydrogeothermischen Zielhorizont. 165 hydraulische Angaben verschiedener Art konnten für diesen Horizont zusammengetragen werden. Der Hauptrogenstein war bereits im Projekt GeotIS als Zielhorizont definiert. Damals konnten 25 Tests ausgewertet werden. Die erweiterte Recherche im Projekt GeoTool ergab weitere 58 Tests aus dem Hauptrogenstein, ein großer Teil davon aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens. In der Summe liegen damit 83 Tests aus 32 Bohrungen vor. Diese Tests werden durch PI/H-Werte aus 31 Bohrungen ergänzt, wobei 24 Bohrungen im Projekt GeotIS recherchiert worden sind.

Für den **Oberjura (jo)** im Molassebecken, früher auch mit Malm oder Weißjura bezeichnet, konnten durch umfangreiche Recherchen bei der Kohlenwasserstoffindustrie zu den aus dem Projekt GeotIS vorliegenden 41 Testen weitere 8 Tests hinzugefügt und der Datenbestand nochmals vergrößert werden. Es liegen nun 49 Tests aus 45 Bohrungen vor. Insgesamt konnten 58 hydraulische Angaben für den Oberjura



zusammengetragen werden. Ebenfalls berücksichtigt wurde erstmals im Projekt GeoTool das Auftreten der sandigen **Bausteinschichten (BSS)** (Untere Meeresmolasse), die an der Tertiärbasis bereichsweise auf den Oberjura transgredieren und günstige Speichereigenschaften aufweisen können. Die Wässer in den Sanden der Bausteinschichten können stellenweise mit dem Oberjura-Grundwasserleiter kommunizieren. Die 80 recherchierten hydraulischen Angaben lieferten 62 Teste aus 22 Bohrungen. Neben den Gebirgsdurchlässigkeiten konnten aus den vorliegenden Daten Produktivitätsindizes für 52 Bohrungen in den Bausteinschichten und für weitere 7 Bohrungen im Oberjura berechnet werden.

Die Formation des **Oberen Muschelkalk-Aquifers (mo)** wurde im Projekt GeotIS bislang ausschließlich im Oberrheingraben betrachtet. Die Mächtigkeit des Gesamtaquifers nimmt zu, wenn die überlagernden Schichten des Lettenkeupers und die unterlagernden Schichten der Oberen Dolomit-Formation (Mittlerer Muschelkalk) kalkig dolomitisch ausgebildet sind. Sie werden deswegen als gemeinsamer Komplex in den Oberen Muschelkalk-Aquifer zusammengefasst. Durch die zusätzlichen Recherchen bei den KW-Firmen und insbesondere beim BRGM konnten zu den bereits vorhandenen 31 Testen aus dem Projekt GeotIS weitere 8 Teste hinzugefügt werden, so dass nun 39 Teste aus 23 Bohrungen für den Oberrheingraben vorliegen. 32 dieser Teste stammen direkt aus dem Oberen Muschelkalk, die weiteren sind im Bereich des Mittleren und Unteren Muschelkalks angesiedelt, wo vereinzelt Lagen mit höherer Durchlässigkeit anzutreffen sind. Die Region des Molassebeckens wurde im Projekt GeoTool im Hinblick auf den Muschelkalk erstmalig betrachtet und lieferte 30 Teste aus 24 Bohrungen, von denen 23 Teste im Oberen Muschelkalk-Aquifer angesiedelt sind. Insgesamt wurden 97 hydraulische Angaben für die Region des Oberrheingrabens, weitere 71 hydraulische Angaben für das Molassebecken zusammengetragen. Für 23 Bohrungen im Oberrheingraben liegen zusätzlich PI/H-Werte vor. 8 davon wurden neu im Projekt GeoTool bestimmt. Ausschließlich bezogen auf den Oberen Muschelkalk-Aquifer handelt es sich um 17 PI/H-Werte. Im Molassebecken liegen zusätzlich Produktivitäten für 25 Bohrungen vor, von denen 24 aus dem Oberen Muschelkalk stammen.

Für die **Buntsandstein-Formation (s)** konnten insgesamt 31 hydraulische Angaben ermittelt werden. Aus dem Projekt GeotIS lagen zu Beginn des Projekts GeoTool 15 Teste vor, die um weitere 10 Teste ergänzt werden konnten. Insgesamt liegen für den Buntsandstein im Oberrheingraben damit Gebirgsdurchlässigkeiten für 25 Teste aus 12 Bohrungen vor, die um PI/H-Werte für weitere 10 Bohrungen ergänzt werden konnten. Im Molassebecken gibt es für den Buntsandstein aufgrund seiner beschränkten Verbreitung und Mächtigkeit keine hydraulischen Informationen.

Die **Rotliegend-Formation (r)** wurde im Projekt GeoTool erstmalig bearbeitet. Dennoch lagen zu Beginn des Projekts GeoTool Daten von 3 Testen aus 3 Bohrungen vor, die während der Recherchen im Projekt GeotIS erfasst worden sind. Es konnten im Rahmen des Projekts GeoTool keine weiteren ergänzenden Gebirgsdurchlässigkeiten ermittelt werden, trotz umfangreicher und intensiver Recherchen in Bohrungsunterlagen zahlreicher Archive. Auch für das Molassebecken liegen nach Abschluss der Recherchen und Auswertungen keine auswertbaren Tests vor. Insgesamt handelt es sich um 10 hydraulische Angaben verschiedener Art. Ergänzend zu den 3 Bohrungen mit Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) konnten Produktivitätsindizes (PI) ermittelt werden.

Das **kristalline Grundgebirge (KR)** war bislang nicht Gegenstand der Untersuchungen und wurde erstmalig im Projekt GeoTool bearbeitet. Als Nebenprodukt der

Datenrecherchen aus dem Projekt GeotIS lagen jedoch bereits 2 Teste vor, die um einen weiteren Test im Projekt GeoTool erweitert werden konnten. In der Summe liegen für den Oberrheingraben 3 Teste aus 3 Bohrungen vor. Weitere hydraulische Angaben konnten nicht recherchiert werden. Für das Molassebecken wurden keine auswertbaren Teste aus dem kristallinen Grundgebirge gefunden.

Insgesamt liegen über alle bearbeiteten Zielhorizonte hinweg betrachtet 702 hydraulische Angaben für den Oberrheingraben und das Molassebecken vor. Es wurden 440 hydraulische Teste mit einem verwertbaren T/H-Wert als Ergebnis ausgewertet. Dabei nicht berücksichtigt bzw. mitgezählt wurden fehlgeschlagene Auswertungen sowie Mehrfachauswertungen einzelner Testphasen bzw. die Anwendung verschiedener Auswerteverfahren für einzelne Testabschnitte. Die Summe der einzelnen durchgeführten Auswertungen liegt demnach noch wesentlich höher. Neben den Gebirgsdurchlässigkeiten konnten für 199 Bohrungen Produktivitätsindizes ermittelt werden.

## 4.2 Porositäten und Permeabilitäten

Im **Oberrheingraben** wurden im Projekt GeotIS für die damaligen Zielhorizonte Hauptrogenstein, Oberer Muschelkalk und Buntsandstein insgesamt 30 Datensätze mit Angaben über Porositäten und / oder Permeabilitäten zusammengetragen. Durch die erweiterte Datenrecherche im Projekt GeoTool, insbesondere auch in den französischen Archiven des BRGM und bei den KW-Firmen, konnten für diese Horizonte weitere 84 Datensätze recherchiert werden. Für die weiteren im Projekt GeoTool erstmalig bearbeiteten Horizonte in der tertiären Abfolge, im Rotliegenden und im kristallinen Grundgebirge wurden 494 neue Datensätze zusammengetragen. In der Summe liegen über alle bearbeiteten Horizonte hinweg 608 Datensätze vor, von denen 37 Datensätze aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank des LIAG, weitere 168 Daten aus den Archiven des RPF und der Kohlenwasserstoff-Industrie sowie 403 Datensätze aus französischen Bohrungen stammen.

Für die Region des **Molassebeckens** wurden im Projekt GeoTool erstmalig Porositäten und Permeabilitäten recherchiert. Für den Zielhorizont des Oberjura konnten in der Summe 217 Datensätze zusammengetragen werden. Für die weiteren im Projekt GeoTool definierten Zielhorizonte der Bausteinschichten, des Oberen Muschelkalks und des kristallinen Grundgebirges liegen nach Abschluss der Recherchen 720 Datensätze vor. Insgesamt ergibt sich für die Region des Molassebeckens über alle Horizonte betrachtet ein Umfang von 937 Datensätzen mit Angaben über Porositäten und / oder Permeabilitäten. 537 Datensätze stammen aus der Kohlenwasserstoff-Datenbank des LIAG. Weitere neu recherchierte 400 Datensätze aus den Archiven des RPF und der Kohlenwasserstoff-Industrie haben den bereits großen Umfang der Datenbank nochmals erheblich erweitern können.

## 4.3 Qualitative hydraulische Daten

Informationen aus Schichtenverzeichnissen und Beschreibungen des Bohrguts bzw. Kernaufnahmen wurden erstmalig im Projekt GeoTool aufgenommen und bearbeitet. Insgesamt liegen nach Abschluss der Bearbeitungen für die Regionen des Oberrheingrabens und Molassebeckens 573 ausgewertete Aufnahmen aus 368 Bohrungen vor. Detaillierte Schichtenbeschreibungen von Bohrungen aus dem

französischen Teil des Oberrheingrabens lagen nicht vor und konnten demzufolge nicht berücksichtigt werden.

Werden die einzelnen Zielhorizonte betrachtet, ergibt sich für die Region des **Oberrheingrabens** im Tertiär ein Datenumfang von 200 Aufnahmen aus 86 Bohrungen, 29 Aufnahmen aus 29 Bohrungen im Hauptrogenstein, weiteren 59 Aufnahmen aus 31 Bohrungen für den Muschelkalk sowie 18 Aufnahmen aus 18 Bohrungen aus der Buntsandstein-Formation. Für das Rotliegende und das kristalline Grundgebirge konnten keine verwertbaren Daten recherchiert und aufgenommen werden.

Für das **Molassebecken** liegen 42 Aufnahmen aus 42 Bohrungen für die Bausteinschichten, weitere 98 Aufnahmen aus 98 Bohrungen für den Oberjura sowie 127 Aufnahmen aus 62 Bohrungen für den Buntsandstein vor. Wie auch im Oberrheingraben, konnten keine verwertbaren Bohraufnahmen und Schichtenbeschreibungen für das Rotliegende und das kristalline Grundgebirge ermittelt werden.

#### 4.4 Hydrochemische Daten

Im Projekt GeotIS wurden im **Oberrheingraben** für die damaligen Zielhorizonte Hauptrogenstein, Oberer Muschelkalk und Buntsandstein 196 hydrochemische Analysen unterschiedlichen Umfangs und unterschiedlicher Qualität ermittelt. Die erneute und ausgeweitete Datenrecherche erbrachte insbesondere durch Daten aus französischen Bohrungen im Projekt GeoTool weitere 124 Datensätze. Die im Projekt GeoTool erstmalig bearbeiteten Horizonte in der tertiären Abfolge, im Rotliegenden und im kristallinen Grundgebirge erbrachten weitere 324 hydrochemische Analysen, so dass im Bereich des Oberrheingrabens nun 644 hydrochemische Analysen vorliegen.

Die Erfassung hydrochemischer Analysen für hydrogeothermische Zielhorizonte im Bereich des **Molassebeckens** wurde im Projekt GeoTool erstmals umgesetzt. Für den Zielhorizont des Oberjura konnten 637 Analysen recherchiert werden. Die weiteren Zielhorizonte des Projekts GeoTool (Bausteinschichten, Oberer Muschelkalk, kristallines Grundgebirge) erbrachten 491 Analysen. Damit liegen für das Molassebecken insgesamt 1128 hydrochemische Analysen vor.

In der Summe wurden im Projekt GeoTool 1576 Datensätze mit hydrochemischen Informationen zusammengetragen, digital erfasst und validiert. Zusammen mit den Analysen aus dem Projekt GeotIS ergibt sich Gesamtumfang von 1772 Analysen für die Regionen des Oberrheingrabens und Molassebeckens.

#### 4.5 Temperaturdaten

Im Projekt GeoTool wurden kontinuierliche Temperaturmessungen in den Bohrungen (Temperatur-Logs) erfasst und digital aufbereitet. Daneben wurden BHT-Werte (bottom hole temperature) aus geophysikalischen Bohrlochmessungen mit ergänzenden Angaben über korrespondierende Stillstandzeiten und Bohrloch- bzw. Rohrdurchmesser zusammengetragen. Mit Hilfe dieser Zusatzinformationen ist eine Korrektur der in der Regel durch den Bohrprozess gestörten BHT-Werte möglich. Ergänzend wurden zu den einzelnen Messwerten Datumsangaben erfasst, die neben den expliziten Angaben zur Stillstandzeit ebenfalls alternative Hinweise auf mögliche Ruhephasen zulassen. Daneben

wurden vereinzelt Temperaturmessungen aus vorliegenden hydraulischen Tests und hydrochemischen Probenahmen integriert, genauso wie im Zuge der Erstellung der Geothermischen Synthese für den Oberrheingraben erfasste Daten (CEC 1978, 1981).

Im **Oberrheingraben** wurden in Baden-Württemberg und Frankreich insgesamt 467 Datensätze recherchiert und zur weiteren Verarbeitung und Einarbeitung in des Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) an das LIAG übersendet. Nach Prüfung und Validierung konnten 107 Einzelwerte übernommen und 200 Korrekturparameter berücksichtigt werden. Im **Molassebecken** handelt es sich um 689 Datensätze, die ebenfalls an das LIAG übermittelt worden sind. Insgesamt konnten dort 318 Einzelwerte übernommen und 862 Korrekturparameter berücksichtigt werden. Der Umfang des FIS-GP nach abgeschlossener Einarbeitung der vom RPF übermittelten Temperatur- und Korrekturdaten beläuft sich auf 1343 Bohrungen auf dem Gebiet von Baden-Württemberg. Für 781 Bohrungen liegen Angaben zu Temperaturen vor. Insgesamt handelt es sich um 4671 Datensätze.

#### 4.6 Reflexionsseismische Daten

Im Projekt GeoTool erfolgte durch das RPF eine digitale Erfassung reflexionsseismischer Sektionen aus dem baden-württembergischen Teil des Südwestdeutschen Molassebeckens. Dabei wurden ausschließlich reflexionsseismische Kampagnen aus den Jahren nach 1975 in Form so genannter seismischer Abspielungen bearbeitet. Analoge Unterlagen aus den Jahren vor 1975 (Line Drawings) wurden bereits während des Projekts GeotIS zusammen mit dem kompletten Datensatz aus dem Oberrheingraben digitalisiert.

Der Umfang der seismischen Daten aus den Jahren vor 1974 im Oberrheingraben beträgt 778 Linien mit 623 Scans. Die frühen Daten aus den Jahren vor 1974 umfassen im Molassebecken weitere 1150 Linien mit 1559 Scans. Für die Jahre ab 1975 stehen im Oberrheingraben mit Abschluss der Bearbeitung weitere 584 Linien mit 408 Scans digital zur Verfügung. Im Molassebecken handelt es sich um 314 Linien mit 314 Scans, von denen 291 Linien im Projekt GeoTool mit der digitalen Erfassung von rund 70 seismischen Messkampagnen bearbeitet worden sind.

In der Summe wurden in Baden-Württemberg für die Regionen des Oberrheingrabens und des Molassebeckens 2826 reflexionsseismische Linien bearbeitet. Begleitend zur Erfassung der Linien wurden rund 41.000 Lokationspunkte (common depth point) digitalisiert und attribuiert. Der komplette Datensatz wurde digital an das LBEG übergeben. Mit Abschluss der Bearbeitung und Übergabe ist Baden-Württemberg das erste Bundesland mit einem vollständigen digitalen Datensatz für den Oberrheingraben und das Molassebecken.

Neben der reinen digitalen Erfassung der reflexionsseismischen Sektionen, wurden für den Oberjura des Molassebeckens alle Sektionen nach 1975 auf Unterschiede in der faziellen Ausbildung untersucht, ausgewertet, mit Angaben in Schichtenverzeichnissen verglichen und in Bezug zu den Gebirgsdurchlässigkeiten gesetzt. Entsprechende Untersuchungen im Hinblick auf Kompression und Dekompression wurden für den Oberrheingraben durchgeführt.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Kooperationspartner für die Umsetzung des Projekts „GeoTool“ waren das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik in Hannover (LIAG) sowie die Partner Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie in Hannover (LBEG), Landesanstalt für Umweltschutz Bayern (LfU) und das Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Frankreich (BRGM). Mit den Kooperationspartnern erfolgte unter Einhaltung von erforderlichen Geheimhaltungsverpflichtungen ein regelmäßiger gegenseitiger Informations- und Datenaustausch. Eine Vielzahl der vorhandenen Daten, insbesondere Daten aus der Kohlenwasserstoff-Industrie, ist vertraulich. Kurzfristig wird sich die Rechtslage nicht ändern, so dass die Nutzung dieser Daten nur in anonymisierter, d. h. in generalisierter Form möglich war. Der Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung (WEG.) gab seine Zustimmung zur Publikation der Daten in der auf der Homepage des RPF sowie in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen jeweils vorliegenden Form.

Die Projekttreffen der Kooperationspartner wurden wechselseitig vom RPF und dem LIAG organisiert.

Nr.	Datum	Ort	Teilnehmende Organisationen
1	26.-27.11.2009	Hannover	LBEG, LfU, LIAG, LUNG, PtJ, RPF
2	15.-16.06.2010	Hannover	LBEG, LfU, LIAG, RPF
3	19.-20.01.2010	Freiburg	BMU, LBEG, LfU, LIAG, PtJ, RPF
4	27.-28.09.2011	Hannover	BMU, LBEG, LfU, LIAG, LUNG, PtJ, RPF
5	28.-29.02.2012	Offenburg	LBEG, LfU, LIAG, PtJ, RPF
6	11.09.2012	Hannover	GTN, HLUG, LBEG, LfU, LIAG, LLUR, LUNG, PtJ, RPF
7	27.03.2013	Offenburg	HLUG, LBEG, LfU, LIAG, LLUR, PtJ, RPF

Informationsaustausche mit gleichzeitiger Datenrecherche in den Archiven des BRGM erfolgten am 12.07.2009 sowie in den Zeiträumen 08.-12.02.2010 und 04.-05.03.2010. Das BRGM erhielt einen separaten ausführlichen Bericht der Auswertungsergebnisse der französischen Daten (CD-ROM Anhang Anl. 3).

Datenrecherchen bei den KW-Firmen vor Ort erfolgten in den Zeiträumen 17.-18.05.2010, 31.05.-01.06.2010, 13.-15.10.2010, 25.-27.10.2010 sowie beim LIAG und LBEG im Zeitraum 10.-12.03.2010 und bei der LfU in der Zeit 11.-12.07.2012. Bei drei KW-Firmen war keine eigene Archivrecherche möglich, jedoch wurden die angeforderten Daten von den Firmen soweit vorhanden postalisch übermittelt. Die einzelnen KW-Firmen erhielten jeweils separate ausführliche Berichte der Auswertungsergebnisse.

## 6. Ergebnis

Da der Faktor des Fündigkeitsrisikos bei der Projektierung geothermischer Anlagen eine der entscheidenden Planungsgrößen darstellt, sind die erreichbare Förderrate, die Fördertemperatur sowie Dichte und spezifische Wärmekapazität des heißen, z.T. hochkonzentrierten Tiefenwassers die ausschlaggebenden Kenngrößen im Rahmen der Vorbereitung von Geothermieprojekten mit hydrothormaler Wärmeenergienutzung, wenn es um die Beurteilung des Fündigkeitsrisikos geht. Darüber hinaus sind Informationen über hydrochemische Analysen unverzichtbar, da sie Aufschluss über die Zusammensetzung der im Untergrund zirkulierenden Fluide geben und Rückschlüsse auf deren technische Handhabbarkeit unter dem Aspekt Lösung/Fällung, aber auch auf die

o.g. Dichte und Wärmekapazität zulassen. Nur bei Kenntnis dieser Größen kann eine Vorerkundung qualitativ bewertet und das Fündigkeitsrisiko abgeschätzt werden.

Mit dem Projekt GeoTool hat das Regierungspräsidium Freiburg ein geothermisches Prognosetools der zur standortbezogenen Abschätzung der Fündigkeit relevanten Parameter für alle potentiellen geothermischen Nutzhorizonte in den Baden-Württembergischen Teilen des Oberrheingrabens und des Süddeutschen Molassebeckens wie im Projektantrag beschrieben entwickelt. Das Prognosetool ist über ein Internetportal (<http://www.rp.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1337770/index.html>) für Jeden frei zugänglich. Die einzelnen Komponenten dieser Homepage mit den entsprechenden zur Verfügung gestellten Downloads sind diesem Bericht als Anlage auf der beigefügten CD-ROM beigegeben. Das Prognosetool im engeren Sinn setzt sich aus einzelnen Algorithmen, d.h. aus mathematischen Beziehungen zwischen verschiedenen Größen, zusammen, um den harten Datenbestand der für die Abschätzung des Fündigkeitsrisikos relevanten Daten zu vergrößern. Zur Entwicklung und Kalibrierung der einzelnen Algorithmen wurden bestehende, zu erweiternde und durch "unscharfe" Informationen ergänzte Datenbestände verwendet, um eine quantitativ belegte Vorhersage zu ermöglichen, die den von der Wirtschaft gestellten inhaltlichen Fragestellungen und qualitativen Anforderungen gerecht wird. Die anhand der erzeugten Grundlagendaten prognostizierten Größen sind Basisinformationen für ein geothermisches Projekt.

Als weiteres Ergebnis ließen sich aus den Untersuchungen Hinweise auf besser und weniger gut geeignete Untersuchungsverfahren ableiten sowie auch Hinweise darauf, unter welchen Bedingungen auch weniger gute Untersuchungsverfahren akzeptable Ergebnisse liefern (Abschn. 6.2.2, 6.2.3). Auch konnten in Rahmen des Projektes GeoTool neue Untersuchungsverfahren entwickelt werden, die geothermisch bedeutende Informationen über den Untergrund liefern (Abschn. 6.2.4, 6.2.5).

In den nachstehenden Abschnitten werden die wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnisse des Projektes GeoTool kurz beschrieben und z.T. anhand von Beispielen erläutert, wobei die Hauptergebnisse auf der Homepage des RPF eingestellt und in Publikationen dokumentiert sind.

Die einzelnen Punkte wurden genau wie im Projektantrag bei den "wissenschaftlichen und technischen Arbeitszielen des Vorhabens" angegeben erarbeitet. D.h. zunächst wurden die Grundlagendaten aus physikalischen Parametern, Hydraulik, Hydrochemie, Geothermie, Seismik und Geologie erhoben, aufbereitet, digitalisiert, validiert und ausgewertet (vgl. Vorhabensbeschreibung im Antrag III. 1.1 - 1.5). Sodann wurden die Daten verarbeitet und statistische Modellierungsansätze sowie Prognosetechniken für die einzelnen Datensätze entwickelt (vgl. Vorhabensbeschreibung im Antrag III. 2.1 - 2.3).

Da wesentlich mehr Daten und Informationen angetroffen als zu Projektbeginn erwartet wurden, war eine Verlängerung des Projektes notwendig, die vom Fördermittelgeber bewilligt wurde. Die Projektmittel waren für die erbrachten Leistungen notwendig und angemessen, da der zu bearbeitende Datenumfang sehr groß war. Andererseits konnte dadurch die Aussagefähigkeit für die im Projekt bearbeiteten verschiedenen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken wesentlich gesteigert werden. Die Machbarkeit der im Projekt gesetzten Ziele wurde durch das Regierungspräsidium Freiburg (RPF) hiermit nachgewiesen. Die durchgeführten Arbeiten sind im Hinblick auf die Bereitstellung wichtiger geowissenschaftlicher Zusammenhänge, die auf der Basis von Grundlagendaten ermittelt wurden, für die hydrogeothermische

Ressourcennutzung auch von wissenschaftlichem Interesse. Die Zuwendung wurde ausschließlich für die Aufgabenstellungen im Projekt verwendet.

## 6.1 Überblick, wesentliche Grundlagen

Die Bewertung des **Fündigkeitsrisikos** ist an die zu erwartende thermische Leistung gekoppelt. Im Rahmen der Vorbereitung von Geothermieprojekten mit hydrothormaler Wärmeenergienutzung sind daher die erreichbare Förderrate, die Fördertemperatur sowie Dichte und spezifische Wärmekapazität des heißen, z.T. hochkonzentrierten Tiefenwassers die ausschlaggebenden Kenngrößen, wenn es um die Beurteilung des Fündigkeitsrisikos geht. In diesem Zusammenhang sind natürlich auch die hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer inklusive potentieller Gasgehalte von zentraler Bedeutung, da sie für eventuell zu erwartende Korrosion und Sinterbildung verantwortlich sind.

Die Bestimmung der **erreichbaren Förderrate** ist von der Gebirgsdurchlässigkeit und der Mächtigkeit des geothermischen Nutzhorizontes abhängig. Die Gebirgsdurchlässigkeit ( $T/H$  in m/s) kann nur aus hydraulischen Testdaten unter Berücksichtigung der Länge der Teststrecke ( $H$  in m) direkt ermittelt werden, da aus den Testdaten primär die Transmissivität ( $T$  in  $m^2/s$ ) berechnet wird (Abschn. 6.2). Die Anzahl der hydraulischen Tests für die einzelnen Nutzhorizonte ist jedoch beschränkt und damit auch der Umfang der jeweiligen **Gebirgsdurchlässigkeiten**. Daher wurde im Projekt GeoTool auch nach neuen Möglichkeiten und Verfahren gesucht, um diesen „harten“ Datenbestand zu erweitern. Inwieweit die Gebirgsdurchlässigkeit aus anderen Informationen (z.B. Produktivitätsindizes, Permeabilitäten von Bohrkernen und geophysikalischen Logs, Schichtenverzeichnisse, Reflexionsseismik mit Informationen über Faziesverteilung des Oberjura und Störungszonen sowie Kompressions- und Dekompressionsstrukturen) über Algorithmen ableitbar ist und wie diese Algorithmen mathematisch beschrieben werden können, war Gegenstand der Untersuchungen im Projekt GeoTool.

Die Größe der Gebirgsdurchlässigkeit ist jedoch nicht nur von der Hohlraumverteilung im Gebirge abhängig sondern auch von den physikalischen Eigenschaften (Dichte, dynamischen Viskosität) des z.T. hochmineralisierten und gasreichen Thermalwassers. Diese Abhängigkeiten wurden im Projekt GeoTool untersucht und sind auf der Projekt-Homepage sowie im Anhang dieses Berichts auf der beigefügten CD-ROM (Homepage Downloads 4) detailliert beschrieben.

Die **physikalischen Eigenschaften** des Förderfluids bestimmen maßgeblich die Größe der thermischen Leistung der Geothermieanlage, jedoch auch die Größe der Gebirgsdurchlässigkeit. Zu den in diesem Zusammenhang relevanten physikalischen Eigenschaften gehören die Dichte, die dynamische Viskosität, die Kompressibilität, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität. Alle diese Parameter sind in ihrer Größe abhängig von der Temperatur, dem Druck, der Mineralisation (Gesamtlösungsinhalt, Wassertyp) und vom Gasgehalt (z.B.  $CO_2$ ). So nimmt die thermische Leistung einer Geothermieanlage beispielsweise deutlich mit zunehmender Temperatur und Salinität des Thermalwassers ab, während der Einfluss des Druckes insbesondere im Temperaturbereich  $50^\circ C$  bis  $150^\circ C$  vernachlässigbar ist (Abb. 3).



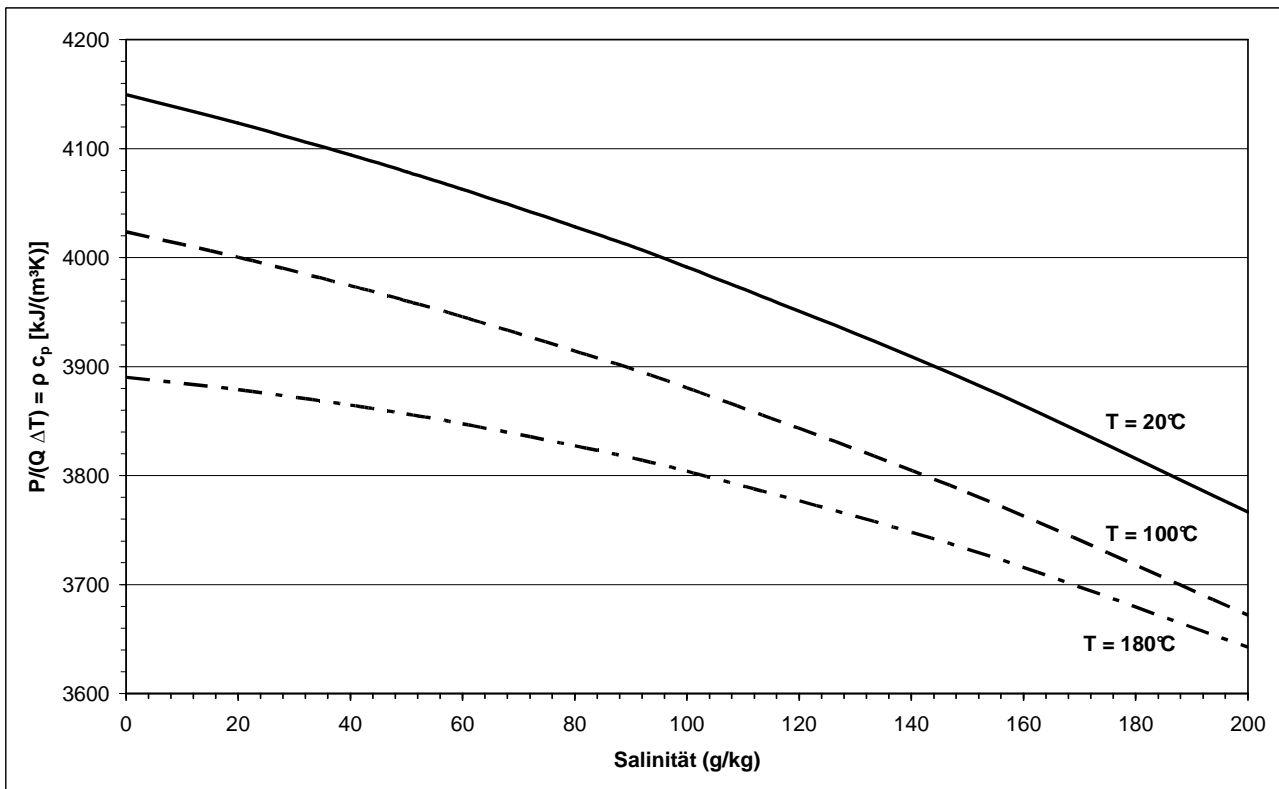


Abb. 3: Abhängigkeit des Quotienten  $P/(Q \Delta T)$  von der Salinität (NaCl) und der Temperatur des Thermalwassers (P - thermische Leistung (kW), Q - Förderrate ( $m^3/s$ ),  $\Delta T$  - genutzte Temperatur ( $^{\circ}C$ )).

Während der Produktion ändert sich beispielsweise der Druck durch die Förderung des Thermalwassers aus großer Tiefe dramatisch, während große Temperaturänderungen bei der Passage durch den Wärmetauscher zu erwarten sind. Dramatische Auswirkungen hat dieser Effekt beispielsweise auf die Injektionsbohrung, deren Gebirgsdurchlässigkeit rein auf Grund der Injektion von abgekühltem Thermalwasser bspw. von  $160^{\circ}C$  auf  $60^{\circ}C$  um den Faktor 0,4 abnimmt.

Zur Beurteilung des Fündigkeitsrisikos sind zudem Kenntnisse über die **Untergrundtemperaturen** von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurden Temperaturdaten aus Tiefbohrungen im Oberrheingraben und im Molassebecken zusammen mit den erforderlichen Korrekturparametern (Bohr- und Casingdurchmesser, Stillstandszeiten) erhoben und validiert. In Zusammenarbeit mit dem LIAG wurde ein 3D-Temperaturmodell für Baden-Württemberg (BW) entwickelt und daraus für 6 verschiedene Tiefenlagen Temperaturkarten für BW erstellt. Außerdem wurden Temperaturprofile in die geologischen Quer- und Längsschnitte durch den Oberrheingraben und das Molassebecken eingetragen und es wurden Temperaturkarten für den Top Oberer Muschelkalk und Top Oberjura erstellt (CD-ROM: Homepage Downloads 5, Profilschnitte, Abb. 16).

Für die Prognostizierung sind ferner die Kenntnis über die **Geologie** wie z.B. die Tiefenlage und die Mächtigkeiten geothermisch relevanter Nutzhorizonte entscheidend. Außerdem ist die Kenntnis von Störungszonen, von Dehnungs- oder Kompressionsbereichen sowie der faziellen Ausbildung von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurden im Projekt GeoTool auch für das Molassebecken die seismischen

Sektionen vollständig erhoben, digitalisiert und eingescannt (CD-ROM: Anhang 2). Darauf aufbauend wurde zusammen mit Informationen aus Schichtenverzeichnissen von Tiefbohrungen die räumliche Verteilung der Mächtigkeiten der jeweiligen geothermisch relevanten Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken ermittelt (CD-ROM: Anhang 4). Dieser Parameter wird zusammen mit der Gebirgsdurchlässigkeit auch für die Bestimmung der erreichbaren Förderraten benötigt. Im Molassebecken konnte zudem das Einfallen der geothermischen Nutzhorizonte sowie die Tiefenlage für den Top Oberer Muschelkalk und Top Oberjura ermittelt werden. Die in Projekt GeoTool untersuchte Verbreitung von Riffstrukturen im Oberjura des Molassebeckens anhand seismischer Sektionen und Schichtenverzeichnisse von Tiefbohrungen liefert wichtige Hinweise auf die zu erwartende Gebirgsdurchlässigkeit (CD-ROM: Anhang 5).

Für alle geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken wurden, soweit nicht bereits im Projekt GeotIS geschehen, die **hydrochemischen Daten** sowie allenfalls gemessene Gasgehalte erhoben und validiert. Im Projekt GeoTool konnten für die einzelnen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und im Molassebecken Algorithmen zur Abhängigkeit des Gesamtlösungsinhaltes von der Tiefe sowie der Hauptinhaltsstoffe von der Tiefe ermittelt werden. Außerdem wurden die Sättigungszustände der Tiefenwässer bezüglich ausgewählter Minerale mit Prognose bei Temperatur- und Druckreduktion bestimmt. Auch war es möglich, Informationen zur Herkunft und Genese der Tiefenwässer sowie Ursachen für die z.T. sehr hohe Mineralisation (Salinität) abzuleiten (Abschn. 6.4).

Im Projekt GeoTool konnten somit verschiedene **Algorithmen** wie im Projektantrag geplant entwickelt werden. Für die Hydraulik konnten einerseits mathematische Beziehungen zwischen den mit den verschiedenen Verfahren für die jeweiligen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken ermittelten Durchlässigkeiten entwickelt werden. Für verschiedene Nutzhorizonte konnten auch Algorithmen zur Tiefenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit aufgestellt werden sowie zur räumlichen Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit. Für den Oberjura konnte anhand der seismischen Sektionen eine Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der faziellen Ausbildung aufgezeigt werden. Für die Hydrochemie konnten Algorithmen zur Abhängigkeit des Gesamtlösungsinhaltes von der Tiefe sowie der Hauptinhaltsstoffe von der Tiefe ermittelt werden. Außerdem konnte ein Zusammenhang zwischen Gebirgsdurchlässigkeit und Gesamtlösungsinhalt für bestimmte geothermische Nutzhorizonte aufgestellt werden.

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes GeoToll sind wie im Projektantrag vorgesehen auf der Homepage des Regierungspräsidiums eingestellt (**Internetportal**) und stehen jedermann zur freien Verfügung (CD-ROM: Homepage). Außerdem wurden der Öffentlichkeit die neuesten Ergebnisse des Projektes auf Tagungen durch Informationsstände (Abschn. 9.3), Vorträge (Abschn. 9.4) und Poster (Abschn. 9.5) sowie durch Publikationen in (Fach)-Zeitschriften (Abschn. 9.1, 9.2) gemäß Projektantrag präsentiert.

## 6.2 Hydraulik – Gebirgsdurchlässigkeiten

Für alle geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken (Abschn. 4.1) wurden hydraulische Testdaten erhoben und daraus Gebirgsdurchlässigkeiten ermittelt und bezüglich ihrer Güte bewertet. Daneben wurden Betriebsdaten zusammengestellt, daraus Produktivitätsindizes ermittelt und untersucht, ob es einen

messbaren Zusammenhang zwischen Produktivitätsindex und Gebirgsdurchlässigkeit gibt. Vorzugsweise in den Archiven der Kohlenwasserstoff-Industrie (KW) fanden sich Hinweise zu Permeabilitäten, die zum einen anhand von Kernproben im Labor ermittelt wurden und zum anderen aus geophysikalischen Bohrloch-Logs bestimmt wurden (Abschn. 4.2). Auch diese Informationen wurden zu den hydraulischen Leitfähigkeiten in Bezug gesetzt. Daneben wurde auf qualitative hydraulische Informationen aus Tiefbohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie und aus Geothermiebohrungen recherchiert. Die qualitativen Informationen umfassen Daten aus Schichtenverzeichnissen und Bohrkernbeschreibungen mit Angaben unter anderem zu Klüften, Spülungsverlusten, Wasserzutritten oder angetroffenen Hohlräumen (Abschn. 4.3). Anhand dieser Datenkompilation wurde nach einem allgemeinen Algorithmus gesucht, um diese qualitativen Daten zu quantifizieren. Für den Oberjura des Molassebeckens wurden die seismischen Sektionen auf Unterschiede in der faziellen Ausbildung untersucht, ausgewertet, mit Angaben in Schichtenverzeichnissen verglichen und in Bezug zu den Gebirgsdurchlässigkeiten gesetzt. Entsprechende Untersuchungen im Hinblick auf Störungszonen, Kompression und Dekompression wurden für den Oberrheingraben durchgeführt (Abschn. 4.6).

In den nachstehenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen jeweils am Beispiel von einzelnen geothermischen Nutzhorizonten exemplarisch vorgestellt. Die vollständigen Ergebnisse für jeden der zahlreichen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und im Molassebecken sind einerseits im Internet auf der Homepage des RPF eigestellt und andererseits auch auf der dem Endbericht beiliegenden CD-ROM enthalten.

### **6.2.1 Gebirgsdurchlässigkeiten aus hydraulischen Tests**

Manche Bohrungen wurden mehrfach hydraulisch getestet, auch waren nicht alle hydraulischen Angaben bzw. Tests geohydraulisch auswertbar. Bei der Ermittlung von Transmissivitäten aus hydraulischen Testdaten ist zwischen Daten aus Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie und Daten aus Trinkwasser- bzw. Thermalwasser-Bohrungen zu differenzieren. Die Daten unterscheiden sich in der Testdauer, der betrachteten Teststrecke und der Datenaufzeichnung. Während in KW-Bohrungen hydraulische Tests meist innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden durchgeführt wurden, überstreichen diese in Trink- und Thermalwasserbohrungen oft einen Zeitraum von Tagen bis Wochen. Den in KW-Bohrungen untersuchten Teststrecken von meist wenigen Metern stehen die untersuchten Bereiche von mehreren 10er Meter Länge in Trink- und Thermalwasserbohrungen gegenüber. Weitere wichtige Unterschiede zeigen sich im Registrierungsverfahren. Bei Bohrungen der KW-Industrie wird eine Druck- und teilweise auch parallel stattfindende Temperaturaufzeichnung direkt im Bereich der zu untersuchenden Teststrecke vorgenommen, während bei Trink- und Thermalwasserbohrungen in der Regel oberflächennahe Druckmessungen oder (insbesondere bei Pumpversuchen älteren Datums) klassische Wasserstandsmessungen mit Lichtlot oder Ultraschall durchgeführt werden (DVGW 1997, PK Tiefe Geothermie 2008). 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 (STOBER 1986).

Hydraulisch aktive Störzonen wurden bei den vorliegenden Versuchen nur in wenigen Fällen bewusst angefahren; dazu gehören wenige Pumpversuche aus Thermalwasser-

und Geothermiebohrungen. Bohrungen der KW-Industrie hatten dagegen generell potenzielle Mutter- und Speichergesteine für Erdöl / Erdgas und geologische Strukturen mit möglichen Erdölfällen zum Ziel.

Die Daten der KW-Industrie lagen als analoge Druckaufzeichnungen vor. Meist handelt es sich um Drill-Stem-Tests (DST). Die graphischen Aufzeichnungen der Schließ- und Fließphasen der DST-Tests wurden gescannt, bei Bedarf entzerrt, an ein hoch aufgelöstes Raster angepasst und manuell ausgelesen. Die so gewonnenen Einzelwerte konnten geohydraulisch als Slugtest (BLACK 1985, COOPER et al. 1967, PAPADOPULOS et al. 1973, RAMEY et al. 1975) behandelt bzw. mit dem so genannten Horner-Plot ausgewertet werden. Das detaillierte Vorgehen ist in STOBBER & VILLINGER (1997) sowie JODOCY & STOBBER (2008) beschrieben. Tests aus Bohrungen der Thermal- und Mineralwassererschließung konnten dagegen in der Regel als klassische Pumpversuche ausgewertet werden (DVGW 1997). Die geohydraulische Auswertung erfolgte nach Stand der Wissenschaft unter Anwendung gängiger Methoden für Poren- und Festgesteinsaquifere. Daher kamen verschiedene, jeweils geeignete Auswerteverfahren zum Einsatz (KRUSEMANN & DE RIDDER 1994, STOBBER 1986, COOPER & JACOB 1946). Aus den hydraulischen Tests wurden die Transmissivitäten (T) ermittelt und mittels der Länge der Teststrecke (H) auf die normierten Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) umgerechnet.

Der schwankenden Güte der Messdaten und der geohydraulischen Auswertungen wurde durch einen Wichtungsfaktor Rechnung getragen. Dazu wurden die ermittelten T/H-Werte in 5 Güteklassen eingeteilt, wobei den besten Werten die Güte 5 und den schlechtesten die Güte 1 zugeordnet wurde. Ganz schlechte Werte wurden nicht berücksichtigt. Mittels Güteklassen wurden Bohrungen, von denen aus demselben Testabschnitt mehrere T/H-Werte vorlagen, ein gewichteter T/H-Wert für diesen Testabschnitt zugeordnet (Gl. 1).

$$\log (T/H) = \Sigma (\log (T/H) * \text{Güte}) / \Sigma \text{Güte} \quad (1)$$

Die mittlere Güte dieses gewichteten Mittelwertes T/H-Wertes wurde mit Gleichung 2 ermittelt.

$$\text{mittlere Güte} = \log (\Sigma 10^{\text{Güte}} / \Sigma \text{Güte} ) \quad (2)$$

Damit konnte jedem für eine Bohrung in einem bestimmten Testabschnitt ermittelten gewichteten T/H-Wert eine adäquate mittlere Güte zugeordnet werden. Anschließend wurden die für einzelne Testabschnitte ermittelten gewichteten T/H-Werte ihrer zugeordneten mittleren Güte entsprechend Gl. 1 gemittelt und diesen gemäß Gl. 2 eine mittlere Güte zugeordnet. Das Resultat ist die Gebirgsdurchlässigkeit für einen bestimmten geothermischen Nutzhorizont aus einer Bohrung mit zugehöriger Bewertung ihrer Güte.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die entsprechenden Auswertungsergebnisse für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und im Molassebecken unter Berücksichtigung der jeweiligen Güten, wobei die dunklen Farben eine hohe Güte belegen und die hellen Farben eine entsprechend geringere. Sehr schlechte Ergebnisse wurden ignoriert. Auf der Internetseite des RPF sowie auf der beigefügten CD-ROM sind entsprechende Ergebnisse für alle anderen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und im Molassebecken aufgeführt (Anhang 3, Homepage Downloads 16-18, 20, 21, 23).

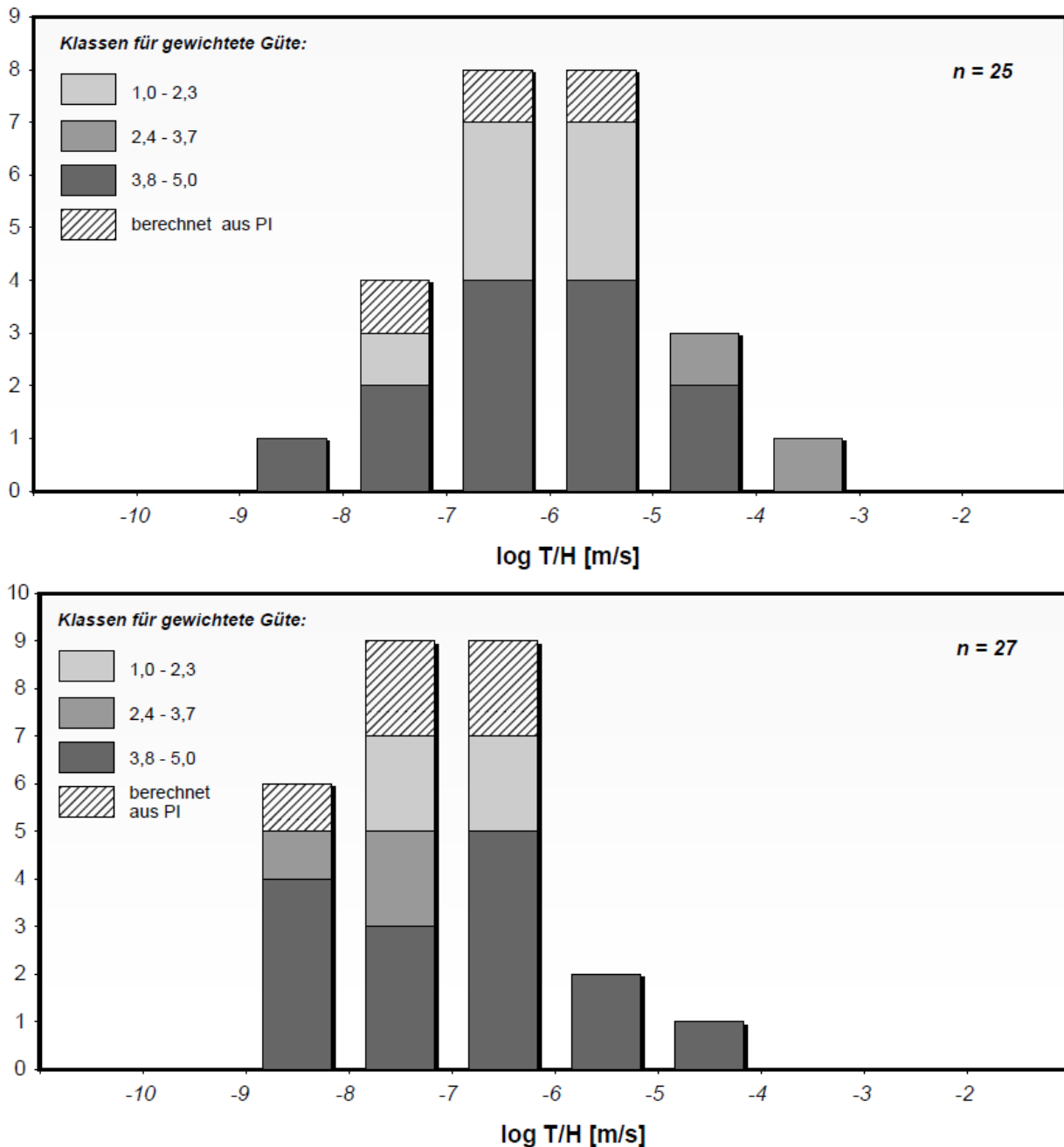


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der für den Oberen Muschelkalk-Aquifer zu den einzelnen Bohrungen berechneten Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) im Oberrheingraben (oben) und im Molassebecken (unten). Die Güte der Gebirgsdurchlässigkeiten wurde bewertet (graue Töne). Eingetragen sind zusätzlich die mit Gl. 4b und 4c aus PI/H-Werten berechneten T/H-Werte

Daneben wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte statistische Kenngrößen, Quartile, der in den einzelnen Bohrungen ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten berechnet, um den Medianwert (2. Quartil) und die „Streubreite“ der Werte (1. und 3. Quartil) zu beschreiben. Die Quartile wurden jeweils anhand der logarithmierten Gebirgsdurchlässigkeiten ermittelt. In Tabelle 1 sind beispielhaft die statistischen Kenngrößen für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben angegeben. Entsprechende Untersuchungen wurden auch für die anderen geothermischen Nutzhorizonte durchgeführt.

Tabelle 1: Quartile der Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) und der normierten Produktivitätsindizes (PI/H) für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken, ergänzt durch Werte für den Unteren Muschelkalk-Aquifer im Molassebecken. Eingetragen sind zusätzlich die Quartile der Gebirgsdurchlässigkeiten, die um die aus den PI/H-Werten berechneten Werte erweitert wurden.

	Oberer Muschelkalk-Aquifer		Unterer Muschelkalk-Aquifer
	Oberrheingraben	Molassebecken	Molassebecken
<b>Gebirgsdurchlässigkeit T/H (m/s)</b>			
Medianwert	$9,65 \cdot 10^{-7}$	$8,37 \cdot 10^{-8}$	$8,32 \cdot 10^{-8}$
1. Quartil	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$3,02 \cdot 10^{-8}$
3. Quartil	$4,62 \cdot 10^{-6}$	$5,75 \cdot 10^{-7}$	$5,86 \cdot 10^{-7}$
Anzahl Werte	22	22	6
<b>Normierter Produktivitätsindex (PI/H) (m/s)</b>			
Medianwert	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$6,59 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$
1. Quartil	$6,33 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-8}$	$8,52 \cdot 10^{-8}$
3. Quartil	$2,18 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	$1,65 \cdot 10^{-7}$
Anzahl Werte	21	24	5
<b>Gebirgsdurchlässigkeit erweitert (Regression PI/H Gl. 4b, 4c)</b>			
Medianwert	$9,03 \cdot 10^{-7}$	$9,49 \cdot 10^{-8}$	-
1. Quartil	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-8}$	-
3. Quartil	$2,14 \cdot 10^{-6}$	$5,57 \cdot 10^{-7}$	-
Anzahl Werte	25	27	-

Das vorstehende Beispiel zeigt, dass die Gebirgsdurchlässigkeiten des Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben im Mittel höher sind als im Molassebecken und mit einem Medianwert von  $T/H = 9,65 \cdot 10^{-7}$  m/s etwa um den Faktor 12 größer ausfallen als im Molassebecken ( $T/H = 8,37 \cdot 10^{-8}$  m/s). Möglicherweise begünstigten die tektonischen Vorgänge bei der Grabenbildung die höhere Gebirgsdurchlässigkeit im Oberrheingraben, so dass im Oberrheingraben auch in größerer Tiefenlage die Gebirgsdurchlässigkeit infolge tektonisch bedingter Auflockerungen des Gesteinsverbandes unabhängig von der Tiefenlage eine generelle Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit bewirkten. Im Molassebecken scheint der Untere Muschelkalk-Aquifer etwa ähnlich hohe Gebirgsdurchlässigkeiten aufzuweisen wie der Obere Muschelkalk-Aquifer (Tab. 1).

Im Projekt GeoTool wurde auch untersucht, ob es für die Gebirgsdurchlässigkeiten der einzelnen geothermischen Nutzhorizonte eine Tiefenabhängigkeit gibt. Beispielhaft wird hier auf den Oberjura-Aquifer im Molassebecken verwiesen. Auf Abbildung 5 sind die logarithmierten Werte der aus den hydraulischen Tests in den einzelnen Bohrungen ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten ( $\log T/H$ ) gegen die mittlere Tiefe des Testhorizontes abgetragen.

Für den Oberjura-Aquifer im Molassebecken konnte zur Beschreibung der Tiefenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit der nachstehende Algorithmus gefunden werden, wobei in Gl. 3 „x“ der Tiefe (m u.Gel.) und „y“ dem  $\log T/H$  entsprechen.

$$y = -3 \cdot 10^{-7} x^2 - 0,0026 x - 3,7349 \quad (3)$$

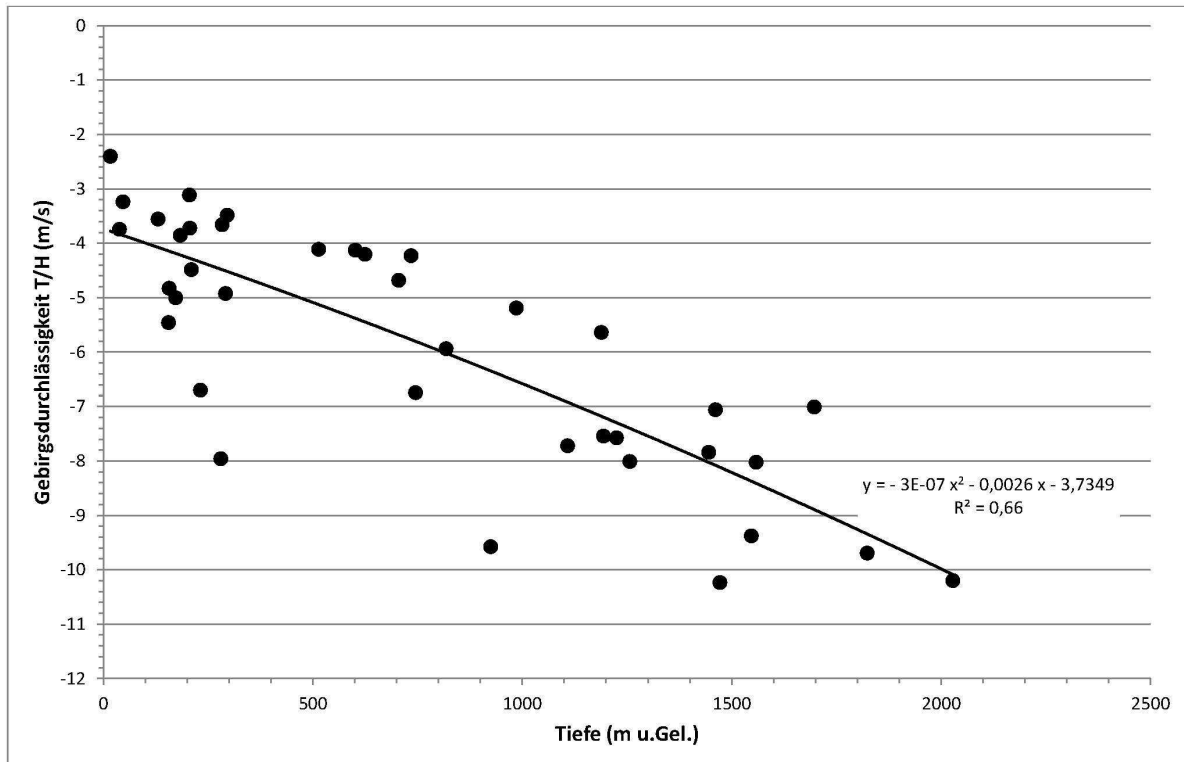


Abb. 5: Gebirgsdurchlässigkeiten (log T/H) im Oberjua-Aquifer im Molassebecken in Abhängigkeit von der mittleren Tiefe des Testhorizontes.

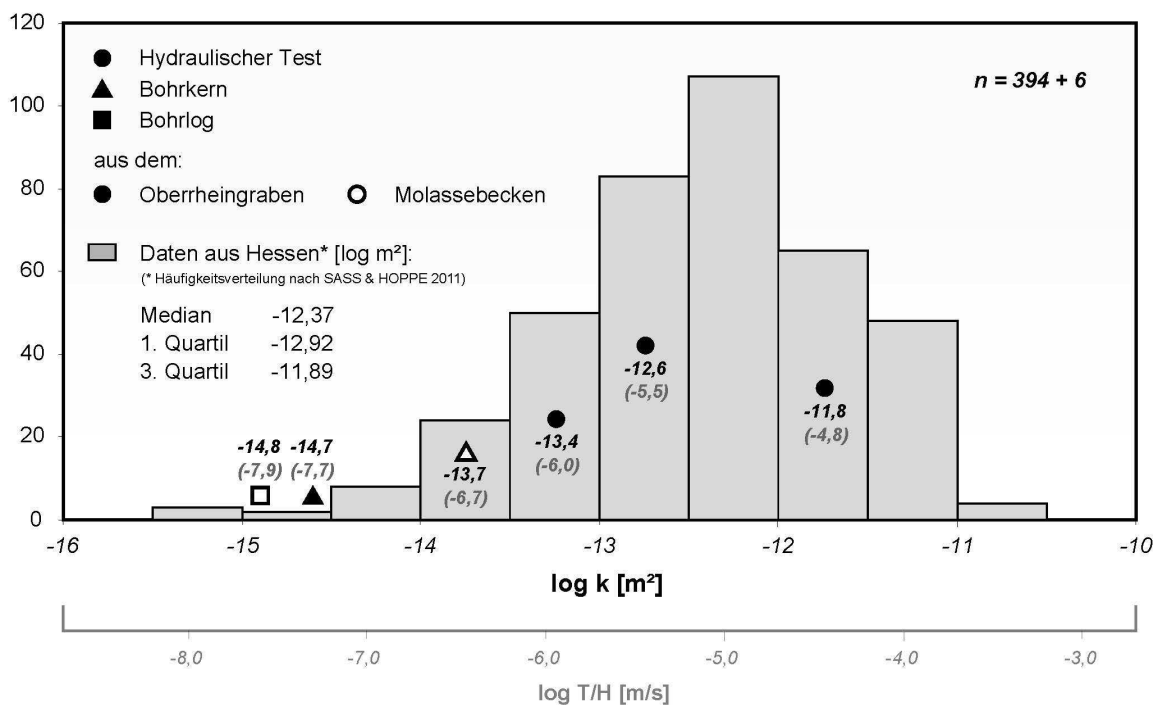


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Permeabilitäten nach SASS & HOPPE (2011) für Hessen. Eingezeichnet sind zusätzlich die Werte von hydraulischen Tests, Bohrkernen und Bohrlochlogs aus Tiefbohrungen im Oberrheingraben und Molassebecken in Baden-Württemberg. Die Werte in Klammern (hellgrau) entsprechen den log T/H-Werten. Auf der 2. horizontalen Geraden sind T/H-Werte zu Vergleichszwecken angegeben; diese Skala wurden mit den Parametern  $\rho = 999,06 \text{ kg/m}^3$  und  $\mu = 1,138 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$  erstellt.



Im Unterschied zu den meisten geothermischen Nutzhorizonten liegen für das Rotliegende und das Kristalline Grundgebirge im Oberrheingraben und Molassebecken wie in Abschnitt 4.1 beschrieben kaum hydraulische Testdaten vor, da das Rotliegende im Untersuchungsgebiet nur sehr begrenzt vorkommt und da das Kristalline Grundgebirge nicht Untersuchungsgegenstand der KW-Industrie war. Aus diesem Grund wurden die im Projekt GeoTool ermittelten Durchlässigkeiten in bereits bestehende Datenkompilationen aus dem näheren Umfeld eingetragen. Für das Rotliegende waren es Werte aus der Arbeit von SASS & HOPPE (2011) für Hessen und für das Kristalline Grundgebirge Werte aus der Arbeit von STÖBER (1995). Abbildung 6 zeigt am Beispiel des Rotliegenden das Vorgehen, das im Detail auf der CD-ROM (Homepage Download 23) beschrieben ist.

### 6.2.2 Produktivitätsindizes, Gegenüberstellung zu den Gebirgsdurchlässigkeiten aus hydraulischen Tests

Aus den Angaben über Entnahmerate und zugehöriger (Druck-) Absenkung können qualitative Angaben zur Gebirgsdurchlässigkeit in Form so genannter Produktivitätsindizes ermittelt werden. Der Produktivitätsindex (PI) wird aus der Förderrate  $Q$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] pro Druckabsenkung  $\Delta p$  [Pa] ( $PI = Q/\Delta p$ ) berechnet (PK Tiefe Geothermie 2008). Um den Produktivitätsindex mit der Gebirgsdurchlässigkeit vergleichen zu können, wurde er durch die Testlänge ( $H$ ) normiert. Die Druckabsenkungen wurde dabei mit Hilfe der Fluidichte in Meter Wassersäule ( $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta s$ ) umgerechnet.

In Tabelle 1 sind beispielhaft die für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken ermittelten Medianwerte sowie das 1. und 3. Quartil des normierten Produktivitätsindex aufgeführt. Tabelle 1 enthält für das Molassebecken die entsprechenden Werte auch für den Unteren Muschelkalk-Aquifer. Die Zusammenstellung zeigt, dass die Medianwerte der PI/H-Werte insbesondere im Oberrheingraben deutlich niedriger ausfallen als diejenigen der T/H-Werte. Im Molassebecken ist der Unterschied geringer. Für den Unteren Muschelkalk im Molassebecken liegen die PI/H-Werte im Mittel geringfügig über den T/H-Werten. Die Zusammenstellung (Tab. 1) zeigt, dass die T/H-Werte nicht einfach durch PI/H-Werte ersetzt werden können.

Ziel der weiteren Untersuchungen war es daher festzustellen, ob der normierte Produktivitätsindex (PI/H) über einen Algorithmus mit der Gebirgsdurchlässigkeit verknüpft werden kann, bzw. unter welchen Bedingungen dies möglich ist. Dazu wurde zunächst untersucht, ob es eine Korrelation zwischen PI/H-Wert und Gebirgsdurchlässigkeit (T/H) gibt. Da es sich hierbei um eine verfahrenstechnische Untersuchung handelt, erfolgten die Untersuchungen anhand der einzelnen hydraulischen Testdaten aus den jeweils getesteten Horizonten im vorliegenden Beispiel also für den Oberen Muschelkalk-Aquifer.

Die Gegenüberstellung beider Werte in Abbildung 7 verdeutlicht eine grundsätzlich vorhandene Korrelation zwischen den auf die Testlänge normierten Produktivitätsindizes (PI/H) und den aus hydraulisch Tests berechneten Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H), hier beispielhaft gezeigt am Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken. Der Gesamtdatensatz wurde in Daten von Tests in KW-Bohrungen und Tests in Mineral-/Thermalwasserbohrungen unterteilt. Die Korrelation bei den Tests in Mineral-/Thermalwasserbohrungen ist sehr gut ( $R^2 = 0,95$ ), während sie bei den Tests in KW-Bohrungen ( $R^2 = 0,30$ ) schlecht ist.

$$\text{alle Bohrungen:} \quad y = 1,08 x + 0,72 \quad (R^2 = 0,73) \quad (4a)$$

$$\begin{array}{llll} \text{KW-Bohrungen:} & y = 1,23 x + 1,81 & (R^2 = 0,30) & (4b) \\ \text{Mineral-/Thermalbohrungen:} & y = 1,01 x + 0,34 & (R^2 = 0,95) & (4c) \end{array}$$

mit  $x = \log \text{PI}/H$  und  $y = \log \text{T}/H$ .

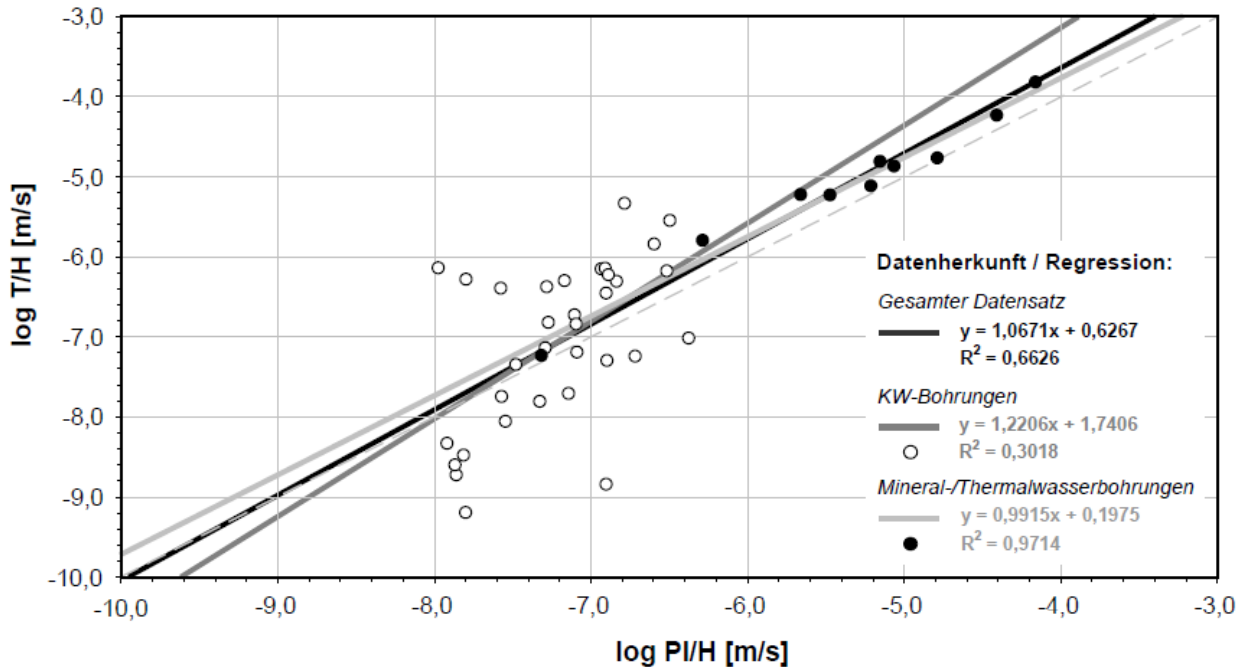


Abb. 7: Gegenüberstellung von Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) und normierten Produktivitätsindizes (PI/H) für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken

Bei einer perfekten Übereinstimmung der Wertepaare (schwarze Linie in Abb. 7) müsste die Gleichung für den gesamten Datensatz  $y = x$  lauten (also:  $m = 1$  und  $b = 0$ ). Die geringsten Abweichungen von dieser Beziehung zeigen die Wertepaare der Mineral-/Thermalwasserbohrungen, bei denen die Geradensteigung mit  $m = 1,01$  und der Achsenabschnitt mit  $b = 0,34$  diesem "Ideal" sehr nahe kommen (Gl. 4c). Die Steigung der Gleichung für die Wertepaare der KW-Bohrungen ist gegenüber der idealen Beziehung mit  $m = 1,23$  deutlich steiler (Gl. 4b). Auch weicht der Achsenabschnitt mit  $b = 1,81$  stärker ab als bei den Mineral-/Thermalwasserbohrungen. Ähnliche Untersuchungsergebnisse wurden auch für die anderen geothermischen Nutzhorizonte festgestellt.

Grundsätzlich liefern alle direkten Abschätzungen der Gebirgsdurchlässigkeit aus PI/H-Werten, die von Tests in Mineral-/Thermalwasserbohrungen stammen, etwas zu niedrige T/H-Werte. Bei den Daten der KW-Firmen können diese direkten Abschätzungen zu niedrig aber auch zu hoch ausfallen. Der positive Achsenabschnitt verdeutlicht, dass auch bei den KW-Bohrungen bei einer direkten Abschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit aus den PI/H-Werten meistens zu geringe Werte ermittelt werden würden.

Die erhaltenen Gleichungen (im Beispiel hier: Gl. 4b, 4c) wurden dazu benutzt, um die Datensätze der Gebirgsdurchlässigkeiten zu erweitern und dadurch das lückenhafte Bild der räumlichen Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeiten zu ergänzen. Vergleichbare Untersuchungen wurden auch für alle anderen geothermischen Nutzhorizonte durchgeführt und entsprechende Algorithmen aufgestellt.

Die Ursachen für die Abweichungen zwischen normiertem Produktivitätsindex (PI/H) und Gebirgsdurchlässigkeit (T/H) sind vielfältig. Beispielsweise können sie auf der kurzen Testdauer beruhen, insbesondere bei Tests in KW-Bohrungen, bei denen selten stationäre Verhältnisse erreicht werden. Liegen der Bestimmung von PI/H-Werten sehr kurz dauernde Tests zugrunde, so ist außerdem davon auszugehen, dass sie in den Einflussbereich der Eigenkapazität der Bohrung fallen (Abb. 8). Diese PI/H-Werte führen dann in der Regel zu einer deutlichen Überschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit, da die Absenkung relativ betrachtet „zu niedrig“ ist. Dieser Umstand würde die relativ hohen PI/H-Werte unterhalb der „schwarzen Linie“ erklären, im vorliegenden Beispiel auf Abbildung 7. Liegt ein positiver Skineffekt vor, d.h. die bohrlochnahe Zone ist geringer durchlässig als der Aquifer, so fallen die ermittelten PI/H-Werte niedriger aus als die tatsächlichen Gebirgsdurchlässigkeiten, da die Absenkung relativ betrachtet „zu groß“ ist (in Abb. 8 mit  $+\Delta s_{\text{Skin}}$  bezeichnet). Dieser Umstand würde die relativ kleinen PI/H-Werte oberhalb der gestrichelten Linie erklären, im vorliegenden Beispiel auf Abbildung 7. Bei Vorliegen eines negativem Skineffekts verhält es sich genau umgekehrt (Abb. 8). Die Absenkung ist um den Wert  $-\Delta s_{\text{Skin}}$  „zu klein“.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei Tests in KW-Bohrungen häufig ein positiver Skineffekt vorliegt, da die Bohrung, resp. der Testabschnitt, vor dem Test in der Regel nicht ausreichend gereinigt wurde. Hinzu kommt, dass Tests in der KW-Industrie in der Regel sehr kurz gefahren werden.

Die Dauer der Eigenkapazität der Bohrung kann mit Gleichung 5 abgeschätzt werden.

$$t_B = r_w^2 / (2T) (60+3,5 s_F) \quad (5)$$

Bei den vorliegenden Daten ist zwar der Radius im Testbereich ( $r_w$ ) meist bekannt, auch wurde die Transmissivität (T) aus den Testdaten, wie vorstehend erläutert, ermittelt, jedoch ist der Skinfaktor ( $s_F$ ) unbekannt. Daher lässt sich die Dauer ( $t_B$ ) der Eigenkapazität der Bohrung nur für einen angenommenen Skinfaktor von  $s_F = 0$  abschätzen. Der Vergleich von  $t_B$  mit der Fließzeit des jeweiligen hydraulischen Tests zeigte, dass viele hydraulische Tests der KW-Industrie noch deutlich innerhalb der Dauer der Eigenkapazitäten liegen. Entsprechend zeigen viele Tests auch deutliche Abweichungen zwischen den PI/H- und den T/H-Werten. Eine eigentliche Systematik konnte aus diesen Untersuchungen jedoch nicht abgeleitet werden, zumal der Skinfaktor unbekannt ist.

Nur bei geohydraulischen Auswertungen können bohrlochspezifische Einflüsse wie Skineffekt oder Eigenkapazität der Bohrung adäquat berücksichtigt werden. Zur Identifikation des Strömungsmodells sind hydraulische Tests erforderlich, die über einen längeren Zeitraum mit konstanter Rate durchgeführt wurden (STOBER 1986). Diesen Anforderungen konnten bei dem vorliegenden Datensatz nur die Versuche in den Mineral-/Thermalwasserbohrungen genügen. Die Tests der KW-Industrie hatten i.d.R. eine sehr kurze Testdauer. Bei der Ermittlung von Produktivitätsindizes können insbesondere bei diesen Tests die bohrlochspezifischen Einflüsse integrativ im PI-Wert enthalten sein, d.h. der PI-Wert gibt streng genommen keine direkte Information über die Güte des Aquifers, sondern eine indirekte ganzheitliche Charakteristik, die Skin, Eigenkapazität und Gebirgsdurchlässigkeit umfasst.

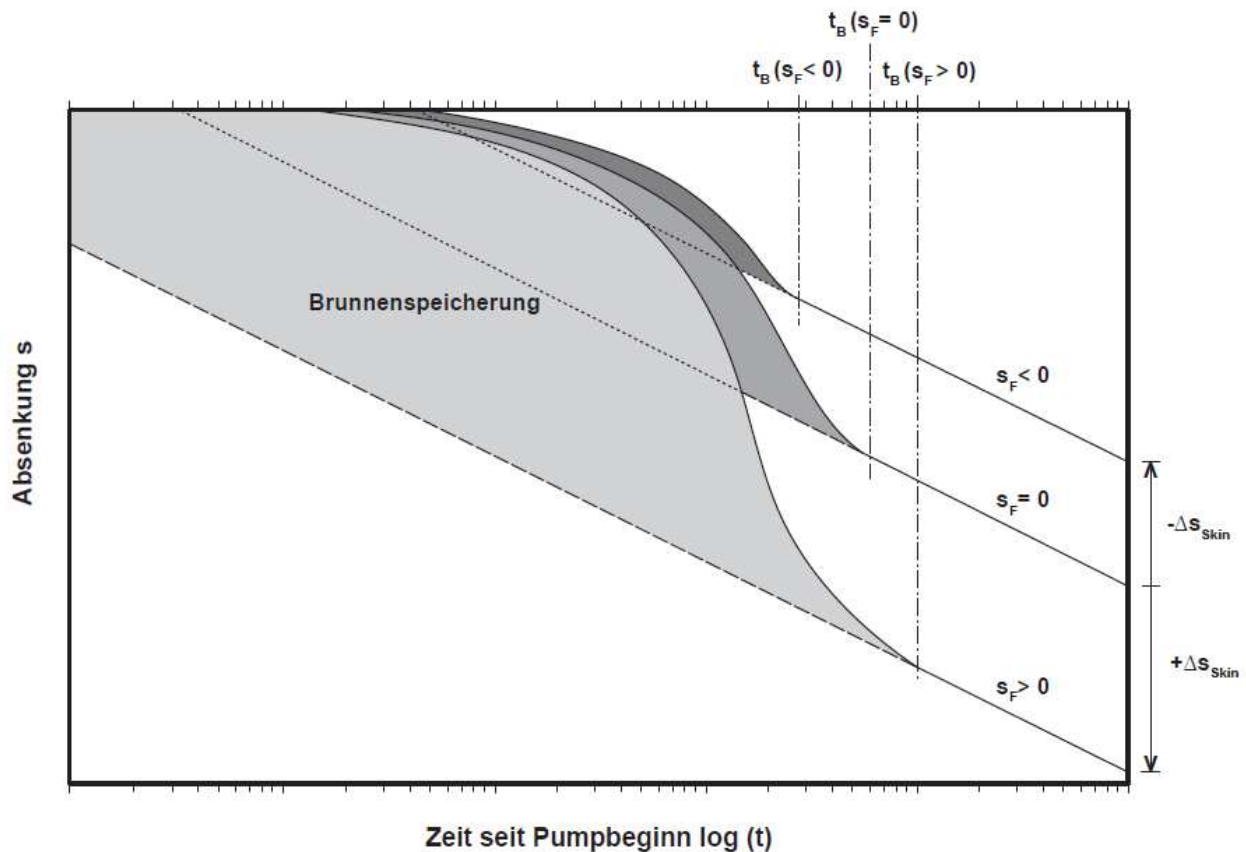


Abb. 8: Einfluss der Eigenkapazität einer Bohrung und des Skineffektes auf den Absenkungsverlauf während eines Pumpversuchs und damit auf die Ermittlung von PI-Werten

Aus den aufgeführten Gründen ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass die Abweichungen der PI/H-Werte von den tatsächlichen Gebirgsdurchlässigkeiten insbesondere bei den Tests der KW-Industrie größer sind und die Korrelation mit den T/H-Werten damit deutlich schlechter ist als bei den in der Regel wesentlich länger andauernden Pumpversuchen in Mineral-/Thermalwasserbohrungen. Die in den einzelnen geothermischen Nutzhorizonten durchgeführten Untersuchungen bestätigen dies.

### 6.2.3 Permeabilitäten/Durchlässigkeiten aus Bohrkernen und geophysikalischen Bohrlochvermessungen, Bewertung

Während des Abteufens einzelner Bohrungen der KW-Industrie wurden verschiedene Bohrkerns gezogen. Anhand dieser Bohrkerns wurden im Labor die Permeabilitäten der Gesteine ermittelt (MÜNCH 2005). Diese Werte schwanken in weiten Grenzen. In der Regel stehen nur die Minimal- bis Maximalwerte zur Verfügung, selten weitere Informationen über Mittel- oder Einzelwerte. Die Art der Daten sowie der Datenumfang ist in Abschnitt 4.2 dokumentiert.

Bei den anhand von Bohrkernen ermittelten Permeabilitäten handelt es sich um die Matrixdurchlässigkeit des Gesteins. Sekundäre hohe Permeabilitäten, wie sie u.a. in Kluft- und Karstgesteinen auftreten und die in solchen Fällen die eigentliche Gebirgsdurchlässigkeit eines Grundwasserleiters ausmachen, können durch die

Kernuntersuchungen in der Regel rein versuchstechnisch nicht adäquat erfasst werden. Zudem können aus Gebirgsabschnitten mit starker Verkarstung oder hoher Klüftigkeit meist keine Kernproben gezogen werden. Hinzu kommt, dass die im Labor ermittelten Permeabilitäten lediglich für sehr kleine Teufenabschnitte innerhalb eines Nutzhorizonts bestimmt werden.

Daneben liegen einzelne ergänzende Permeabilitätsangaben vor, die aus geophysikalischen Bohrlochvermessungen stammen und meist als Mittelwerte für größere Teufenabschnitte innerhalb eines Nutzhorizontes angegeben werden (Abschn. 4.2).

Zur weiteren Verarbeitung dieser Daten wurden statistische Kenngrößen (Minimalwert, Maximalwert, arithmetischer Mittelwert und Median) zur Beschreibung ermittelt. Insbesondere bei den Permeabilitätsangaben anhand von Bohrkernen waren die Daten bereits in den herangezogenen Quellen auf einzelne statistische Kenngrößen zusammengefasst worden. Diese Kenngrößen mussten ohne die Möglichkeit einer weiteren Kontrolle 1:1 übernommen werden. Um die zusammengestellten Permeabilitäten ( $k$  [mD]) mit den Durchlässigkeiten ( $T/H$  [m/s]) vergleichen zu können, wurden sie entsprechend mit Hilfe der (temperatur- und druckabhängigen) Dichte und dynamischen Viskosität umgerechnet (Abschn. 6.1).

Hinsichtlich der Datenherkunft wurde zwischen Daten aus geophysikalischen Bohrlochmessungen (Logs) und Labormessungen an Kernproben unterschieden. In einigen Fällen ließ die Datenlage keine eindeutige Quellenzuordnung zu. Detaillierte Informationen zur Datenerhebung und Verarbeitung sind in JODOCY & STOBER (2011) beschrieben.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse am Beispiel des Oberen Muschelkalks im Oberrheingraben und Molassebecken. Den in Tabelle 2 aufgeführten statistischen Kenngrößen (Quartile) sind die arithmetischen Mittelwerte einzelner Kernstrecken (Originaldatenaufschrieb) zugrunde gelegt. Die real vorliegende Schwankungsbreite konnte somit nicht berücksichtigt werden und fehlt bei der Betrachtung. Für die statistische Verarbeitung der Permeabilitäten wurden die Einzelwerte zunächst logarithmiert. Diese logarithmierten Werte wurden zur Bestimmung der statistischen Kenngrößen herangezogen.

Tabelle 2: Quartile der Durchlässigkeiten aus Untersuchungen an Bohrkernen und geophysikalischen Bohrlochlogs im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und Molassebeckens

	<b>Oberrheingraben</b>	<b>Molassebecken</b>
<b>Durchlässigkeiten aus Bohrkernen <math>k</math> (m/s)</b>		
Medianwert	$3,69 \cdot 10^{-9}$	$2,68 \cdot 10^{-9}$
1. Quartil	$4,15 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$
3. Quartil	$9,24 \cdot 10^{-9}$	$1,50 \cdot 10^{-8}$
Anzahl Wertegruppen	8	35
<b>Durchlässigkeiten aus Logs <math>k</math> (m/s)</b>		
Medianwert	$4,63 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-8}$
1. Quartil	-	$3,38 \cdot 10^{-9}$
3. Quartil	-	$2,80 \cdot 10^{-7}$
Anzahl Wertegruppen	1	4

Grundsätzlich weisen die Permeabilitäten eine große Schwankungsbreite auf, auch ist der Datenumfang sehr unterschiedlich. Aus geophysikalischen Bohrlochlogs liegen in der Regel sehr wenig Informationen vor. Die anhand von Bohrkernen ermittelten Durchlässigkeiten sind beispielsweise für den Oberen Muschelkalk im Oberrheingraben um mehr als zwei 10er-Potenzen niedriger als die aus hydraulischen Tests ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten (Tab. 1). Im Molassebecken, das im Vergleich zum Oberrheingraben für den Oberen Muschelkalk-Aquifer um den Faktor 12 niedrigere Gebirgsdurchlässigkeiten aufweist (Tab. 1), sind die Unterschiede zwischen den Durchlässigkeiten anhand von Bohrkernen und von hydraulischen Tests nicht mehr so groß (Faktor 31) wie im Oberrheingraben.

Die Untersuchungen für alle geothermische Nutzhorizonte ließ eine Systematik erkennen und zeigte, dass je niedriger die Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H), desto besser stimmen die aus Bohrkernen ermittelten Durchlässigkeiten (k) mit diesen überein. Für die geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken fallen demnach bei Gebirgsdurchlässigkeiten von  $T/H < 2 \cdot 10^{-8}$  m/s die anhand von Bohrkernen ermittelten k-Werte ähnlich groß aus. Allerdings sind derartig niedrige Gebirgsdurchlässigkeiten für eine hydrothermale Nutzung von geringerem Interesse.

Die Beurteilung der Durchlässigkeit eines für eine hydrogeothermische Erschließung lukrativen Kluft- oder Karstgrundwasserleiters kann anhand von Bohrlochlogs wesentlich besser erfasst werden als anhand von Untersuchungen an Bohrkernen, da das mit diesem Verfahren dokumentierte Volumen größer ist und da auch größere Hohlraumstrukturen in die Untersuchung einbezogen werden können. Daher fallen die aus den Bohrlochlogs ermittelten Durchlässigkeiten größer aus als die Untersuchungen an Bohrkernen. Sie sind jedoch trotzdem i.d.R. niedriger als die aus hydraulischen Tests ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten (in Beispiel für den Oberen Muschelkalk-Aquifer: Tab. 1, 2), zumindest für Gebirgsdurchlässigkeiten, die nicht allzu niedrig sind.

#### **6.2.4 Durchlässigkeiten aus Schichtenverzeichnissen**

In einem weiteren Schritt wurden qualitative Informationen mit Hinweisen auf Wasserwegsamkeiten aus den Schichtenverzeichnissen bzw. Bohrkernbeschreibungen für die einzelnen geothermischen Nutzhorizonte zusammengestellt. Für die Recherche wurden die analogen Bohrkern der geowissenschaftlichen Archive des Regierungspräsidiums Freiburg, Abteilung Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, herangezogen. Die Art der Daten sowie der Datenumfang ist in Abschnitt 4.3 dokumentiert.

Die recherchierten Informationen aus den analogen Bohrkernen wurden getrennt für die einzelnen geothermischen Nutzhorizonte in jeweils für diese Zwecke erstellte separate Vorlagen digital erfasst. Tabelle 3 zeigt am Beispiel des Oberen Muschelkalks die Liste der für jede der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Bohrungen gesuchten Informationen bezüglich Hohlräume. Gesucht wurden hauptsächlich Schlagwörter mit einem Bezug zur hydraulischen Leitfähigkeit. Die Auswahl der Schlagwörter wurde speziell auf die einzelnen geothermischen Nutzhorizonte zugeschnitten, d.h. sie sind bspw. für den Oberen Muschelkalk anders als für den Buntsandstein (Spalte „Hohlraumtyp“). Neben der Anzahl des jeweils vorgefundenen Schlagwortes (Spalte „Anzahl“) wurde auch die in der Kernbeschreibung genutzte halbquantitative Angabe zur Häufigkeit (Spalte „Häufigkeit“) der einzelnen Ausprägungen erfasst. Ebenso erfasst wurden Informationen darüber, ob

Hohlräume in irgendeiner Weise verheilt oder teilverheilt bzw. offen angetroffen wurden. Zur Beurteilung einer ggf. vorhandenen Wasserwegsamkeit wurde daher auch die Art der ggf. vorhandenen Kluftminerale eingetragen und ob es sich um Einzelkristalle, Kristallrasen oder vollständige Verheilungen von Hohlräumen handelt. Diese Kategorisierung erlaubte eine Bewertung, ob die Klüfte bzw. Hohlräume noch aktiv von Wasser durchflossen werden können oder ob sie eher dicht sind. Klüfte und Hohlräume, die gemäß dieser Kriterien als dicht eingestuft wurden, wurden in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die in der Tabelle 3 aufgelisteten Informationen sind in der vorliegenden Form bereits teilweise zusammengefasst wiedergegeben, da sich im Zuge der Bearbeitung ein zu großer Differenzierungsgrad als nicht praktikabel erwies. Trotz dieser Bemühungen war der Versuch einer durchgehenden Erfassung des Bohrkerngewinns aufgrund der sehr unterschiedlichen Datenlage in den betrachteten Bohrungen nur teilweise umsetzbar. Weitere Informationen, die für eine Beurteilung der Wasserwegsamkeit interessant erschienen, jedoch in der Tabelle 3 nicht explizit aufgeführt waren, wurden in ein zusätzliches Bemerkungsfeld eingetragen. Darin aufgeführt sind z.B. Informationen wie „Kernverlust“ oder „brockig zerbohrt“, die jedoch bei der späteren Auswertung nicht berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 3: Geologische Charakterisierung des Aquifers „Oberer Muschelkalk“ sowie quantitative Bewertung der einzelnen Hohlraumtypen

Hohlraumtyp	Anzahl (n)	Häufigkeit	Quantitative Bewertung (q)
Haarrisse, Kluftrisse			-9
Klüftig, einige „mm“ offene Klüfte			-7
> 0,5 cm offene Klüfte, starke Zerklüftung			-6
Größere offene Klüfte (evtl. mit Kristallen)			-6
Porös			-8
Fein kavernös			-8
Kavernös			-8
Größere Kavernen (einige „mm“), große Kavernen (> 1 cm)			-7
Sehr große Kavernen (> 3 cm) und Drusen			-7
Schleichende Spülungsverluste, artesischer Auslauf			-6
Dicht, sehr dicht, massig			-9

Zunächst war für die quantitative Umsetzung eine mathematische Lösung mit Hilfe von Matrizen angedacht, wobei einzelne Bohrungen, von denen sowohl ausführliche Schichtenverzeichnisse als auch aus hydraulischen Tests ermittelte Gebirgsdurchlässigkeiten vorlagen, dazu benutzt werden sollten, um die unbekannt Koeffizienten für die einzelnen „Hohlraumtypen“ (Tab. 3) zu bestimmen. Anzahl bzw. Häufigkeit (Tab. 3) sollten dabei in einfache numerische Werte übertragen werden. Bearbeitungsbasis stellte der Logarithmus der hydraulischen Leitfähigkeit (hier: T/H) dar. Im Zuge der Bearbeitung stellte es sich heraus, dass die beiden Grundgesamtheiten „Bohrungen mit ausführlichen Schichtenverzeichnissen“ und „Bohrungen mit Gebirgsdurchlässigkeiten“ keine ausreichend große Schnittmenge aufwiesen, um über lineare Gleichungssysteme auf der Basis von Matrizen auf die einzelnen Komponenten



der Matrix, d.h. auf die Größe der hydraulischen Leitfähigkeit für die jeweiligen „Hohlraumtypen“ (Tab. 3) zu schließen. Für diese Art der Parametrisierung und Eichung standen bei allen geothermischen Nutzhorizonten zu wenig Bohrungen zur Verfügung.

Das weitere Vorgehen stützte sich daher zum einen auf die relativ kleine, jeweils mehr oder weniger große „Schnittmenge“ und zum anderen auf logistische Überlegungen zur quantitativen Bewertung der „Hohlraumtypen“. Die aus logistischen Überlegungen in einem ersten Schritt festgelegten quantitativen Bewertungen wurden mit Hilfe der Gebirgsdurchlässigkeiten aus den hydraulischen Tests für die einzelnen Bohrungen, zu denen auch ausführliche Schichtenverzeichnisse vorlagen, so lange optimiert, bis sich ein Fehlerminimum einstellte. Die Anzahl (n) bestimmter Hohlraumtypen (Tab. 3, Spalte 2) wurde dabei als Vielfaches des entsprechenden „Hohlraumtyps“ behandelt und zur quantitativen Bewertung addiert. Trat beispielsweise „n“ mal der Begriff „klüftig“ in der Schichtenabfolge auf, dem die quantitative Bewertung „q“ zugeteilt wurde, so wurde mit einer gesamtheitlichen quantitativen Bewertung dieses Merkmals von  $q_t = q + (n-1) \cdot 0,1$  weitergerechnet. Wurde der Begriff jedoch mehr als 10 mal ( $n > 10$ ) beobachtet oder „sehr häufig“, „häufig“ oder „zahlreich“ (Tab. 3, Spalte 3), erfolgte eine Erhöhung der quantitativen Bewertung um +1, im vorliegenden Beispiel also auf  $q_t = q + 1$ . Anschließend wurden die jeweiligen quantitativen Bewertungen der einzelnen „Hohlraumtypen“ im Schichtenverzeichnis einer Bohrung addiert ( $\sum q_{ti}$ ). Das Ergebnis ist die im folgenden als qualitative Durchlässigkeit (D) bezeichnete Größe ( $\log D = \sum q_{ti}$ ). Die qualitative Durchlässigkeit sollte im Idealfall mit der aus hydraulischen Tests ermittelten Gebirgsdurchlässigkeit (T/H in m/s) übereinstimmen.

Die Anwendung des Verfahrens setzt natürlich voraus, dass die Schichtenverzeichnisse der herangezogenen Bohrungen präzise aufgenommen wurden. Grundsätzlich ist daher im Vergleich zu den Gebirgsdurchlässigkeiten eher mit etwas niedrigeren Werten für die qualitative Durchlässigkeit zu rechnen. Manche Bohrungen wurden nur in bestimmten Abschnitten geologisch sehr genau aufgenommen, in anderen Abschnitten gröber. Hinzu kommen die Unterschiede in der Art der geologischen Aufnahme durch die einzelnen Bearbeiter bzw. interessierende Themenfelder (z.B. Paläontologie).

Die qualitativen Durchlässigkeiten wurden wie im ausgewählten Beispiel des „Oberer Muschelkalk-Aquifers“ für den Oberrheingraben und das Molassebecken immer separat und unabhängig voneinander ermittelt. Trotz der unabhängigen Vorgehensweise wurden für die jeweiligen Hohlraumtypen z.T. gleiche quantitative Bewertungen (q) ermittelt (Tab. 3). Für die einzelnen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken wurden aus den Schichtenverzeichnissen qualitative Durchlässigkeiten ermittelt und daraus die jeweiligen Medianwerte (2. Quartil) sowie Abweichungen (1. und 3. Quartil) berechnet. Die Ergebnisse für den Oberen Muschelkalk beispielsweise sind in Tabelle 4 erstellt. Im Anschluss daran wurden die Medianwerte sowie die 1. und 3. Quartile wieder „entlogarithmiert“. Auf der Homepage des RPF sind die detaillierte Vorgehensweise und die jeweiligen Ergebnisse beschrieben. Die entsprechenden Berichte sind auf der dem Endbericht beigegebenen CD-ROM enthalten.

Die aus den jeweiligen Grundgesamtheiten ermittelten Medianwerte der qualitativen Durchlässigkeiten und der Gebirgsdurchlässigkeiten liegen für alle im Oberrheingraben und im Molassebecken untersuchten geothermischen Nutzhorizonte in ihrer Größenordnung relativ dicht beieinander. Für den hier beispielhaft vorgestellten Oberen Muschelkalk-Aquifer fällt der Medianwert aus den qualitativen Durchlässigkeiten im Oberrheingraben etwas niedriger aus als der Wert aus den Gebirgsdurchlässigkeiten (Tab.

4). Im Vergleich zu den Gebirgsdurchlässigkeiten ist eher mit etwas niedrigeren Werten für die qualitative Durchlässigkeit zu rechnen, da die Qualität der geologischen Aufnahme der Schichtenverzeichnisse unterschiedlich präzise im Hinblick auf die hydraulischen Merkmale ist, d.h. bestimmte Durchlässigkeitsmerkmale wurden bei der geologischen Aufnahme ignoriert und fehlen daher in der Bewertung der „Durchlässigkeit“. Im Molassebecken fallen die qualitativen Durchlässigkeiten für den Oberen Muschelkalk etwas größer aus als die Gebirgsdurchlässigkeiten. Unabhängig vom Verfahren resultieren die Unterschiede auch daraus, dass es sich bei der Ermittlung der "Durchlässigkeiten" aus den beiden Grundgesamtheiten nicht um dieselben Bohrungen handelt. Auch ist die Qualität der zur Verfügung stehenden Beschreibungen von Schichtenverzeichnissen zur Ermittlung qualitativer Durchlässigkeiten sehr heterogen und es stehen jeweils unterschiedlich große Grundgesamtheiten zur Verfügung.

Tabelle 4: Vergleich von qualitativen Durchlässigkeiten und Gebirgsdurchlässigkeiten im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und Molassebeckens

	Oberrheingraben		Molassebecken	
	Qualitative Durchlässigkeit D (m/s)	Gebirgsdurchlässigkeit T/H (m/s)	Qualitative Durchlässigkeit D (m/s)	Gebirgsdurchlässigkeit T/H (m/s)
Medianwert	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$9,65 \cdot 10^{-7}$	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$8,37 \cdot 10^{-8}$
1. Quartil	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$
3. Quartil	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$4,62 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$5,75 \cdot 10^{-7}$
Anzahl Werte	34	22	62	22

Die Untersuchungen im Projekt GeoTool haben gezeigt, dass das oben exemplarisch am Beispiel des Oberen Muschelkalkes beschriebene Verfahren zur Abschätzung von Durchlässigkeiten anhand von Hohlraumtypen, die in Schichtenverzeichnissen beschrieben sind, für die geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken für eine grobe Abschätzungen anwendbar erscheint. Vergleiche hierzu die Ausführungen auf der Homepage des RPF sowie die Berichte im Anhang dieses Berichtes auf der CD-ROM. Natürlich kann das Verfahren keine hydraulischen Tests ersetzen, aber es ermöglicht eine Groborientierung über die Untergrundverhältnisse in Gebieten, in denen keine hydraulischen Leitfähigkeiten oder PI-Werte vorliegen, jedoch ein ausführliches Schichtenverzeichnis existiert. Dieses Verfahren wurde im Rahmen des Projektes GeoTool neu entwickelt. Natürlich wurden die in Tabelle 3 exemplarisch für den Oberen Muschelkalk angegebenen quantitativen Bewertungen (q) für jeden geothermischen Nutzhorizont separat ermittelt. Der regionale Informationsgehalt über die Durchlässigkeitsverhältnisse im Untergrund lässt sich durch dieses neu entwickelte Verfahren verdichten (STOBER et al. 2012).

### 6.2.5 Informationen aus seismischen Sektionen im Hinblick auf die Gebirgsdurchlässigkeit

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass auch aus "älteren" seismischen Sektionen quantifizierbare Informationen über "Durchlässigkeiten" ableitbar sind. In der Oberjura-Formation des Südwestdeutschen Molassebeckens ist insbesondere im Bereich eines beckenparallel verlaufenden Gürtels aus Schwamm-Algen-Riffen von einer erhöhten Durchlässigkeit auszugehen (STOBER & VILLINGER 1997). Anhand von Daten aus der Reflexionsseismik aus den Jahren nach 1975 wurde nach Charakteristika im Bereich des Oberjuras im Hinblick auf laterale Differenzierungen gesucht, die möglicherweise als

unterschiedlich ausgeprägte Riffstrukturen gedeutet werden könnten. Zur Überprüfung und Verifizierung wurden Beschreibungen von Schichtenprofilen aus (Tief-) Bohrungen herangezogen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Daten aus der Reflexionsseismik Aussagen zur räumlichen Verbreitung und Ausprägung von Riffstrukturen im Oberjura des Südwestdeutschen Molassebeckens ermöglichen.

Eine wichtige Rolle für die reflexionsseismische Horizontalausprägung des Oberjuras spielen fazielle Einflüsse. Die in nördlichen Beckenregionen anzutreffende Schwäbische Fazies ist aus massigen, teils geschichteten Kalksteinen und Dolomiten aufgebaut (SCHÄDEL 1962, STOBER 1986, STOBER & VILLINGER 1997, VILLINGER 1988). Die Karbonatfolge vom ki2 bis ki4, d.h. von der Unteren- und Oberen Felsenkalkformation sowie der Liegenden Bankkalk-Formation, stellt den eigentlichen Grundwasserleiter im Oberjura dar. Dieser kann stratigraphisch höher reichen, wenn im Hangenden die Zementmergel-Formation (ki5) und Hangende Bankkalk-Formation (ti1) ganz oder teilweise ebenfalls als Massenkalkfazies ausgebildet sind (BERTLEFF et al. 1988). Die Unteren und Oberen Felsenkalke sowie die Liegenden Bankkalke zeichnen sich insbesondere im Bereich eines aus Schwamm-Algen-Riffen aufgebauten beckenparallelen Gürtels durch kavernöse Gesteine bei gleichzeitig im Rahmen der Verkarstung korrosiv erweiterten Hohlräumen aus. Aufgrund der starken Lochfelsbildung in den Riffen bei gleichzeitiger Verkarstung ist in diesem Bereich i. d. R. von einer erhöhten Durchlässigkeit auszugehen (BERTLEFF 1986, BERTLEFF et al. 1988, MEYER & SCHMIDT-KALER 1989, STOBER 1986). Stellenweise sind diese Strukturen bis in die obersten Bereiche des Oberjura zu verfolgen. Die zoogene Fazies ist in Form von kuppelförmigen Schwammriffen mit einem Primärrelief von bis zu 150 m abgelagert worden.

In den größtenteils unmigrierten reflexionsseismischen Sektionen sind immer wieder Diffraktionshyperbeln im Bereich der Oberjura-Formation zu beobachten (Abb. 9). Die Diffraktionen sind auf eine Beugung der seismischen Wellen in Regionen mit starken lateralen Änderungen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten zurückzuführen, wie sie z.B. beim Übergang von massiven Kalksteinen in poröse Riffstrukturen zu erwarten sind (BÖHM et al. 2007). In seltenen Fällen stehen die Daten als migrierte und damit teufen- und neigungsgerecht dargestellte Sektionen zur Verfügung. Im Hinblick auf die Identifikation solcher Diffraktionen besitzen die meist nur gestapelten seismischen Sektionen klare Vorteile gegenüber migrierten Profilen, in denen Diffraktionshyperbeln als ungewollte Darstellungsfehler in den Abspielungen durch spezielle Rechenverfahren eliminiert werden.

Beim Übergang von der Schwäbischen in die Helvetische Fazies im südöstlichen Beckenbereich verändert der Oberjurareflektor allmählich seine typische Charakteristik und verliert an Reflexionsintensität. Dennoch kann der Oberjura auch im Bereich der Helvetischen Fazies größtenteils eindeutig verfolgt werden. Die Helvetische Fazies ist geprägt durch die fein geschichteten karbonatischen Ablagerungen eines ehemals tiefer gelegenen Schelfbereichs (JODOCY & STOBER 2009, STMWIVT 2004).

Auf der Basis digitalisierter Abspielungen (224 Sektionen) wurden reflexionsseismische Auswertungen im Hinblick auf das Auftreten von Diffraktionshyperbeln vorgenommen, die eventuell Rückschlüsse über die faziellen Ausprägungen der Oberjura-Formation gestatten. Die Auswertungen wurden ohne Reprozessierung an den originalen Abspielungen vorgenommen. Die angetroffenen seismischen Signaturen konnten drei Klassen zugeordnet werden. Im Wesentlichen weitgehend horizontale Reflektoren ohne

auffällige Topographie zwischen Top und Basis Oberjura konnten von Regionen mit leichter bis starker Topographie unterschieden werden.

- Klasse 1: Reflektoren Top bis Basis Oberjura meist horizontal, keine erkennbare „Topographie“
- Klasse 2: Reflektoren Top Oberjura weiterhin meist horizontal, erkennbare „Topographie“ bis in den unteren Bereich des Oberjura
- Klasse 3: Reflektoren Top Oberjura unterbrochen, stark ausgeprägte „Topographie“ bis in den unteren Bereich des Oberjura

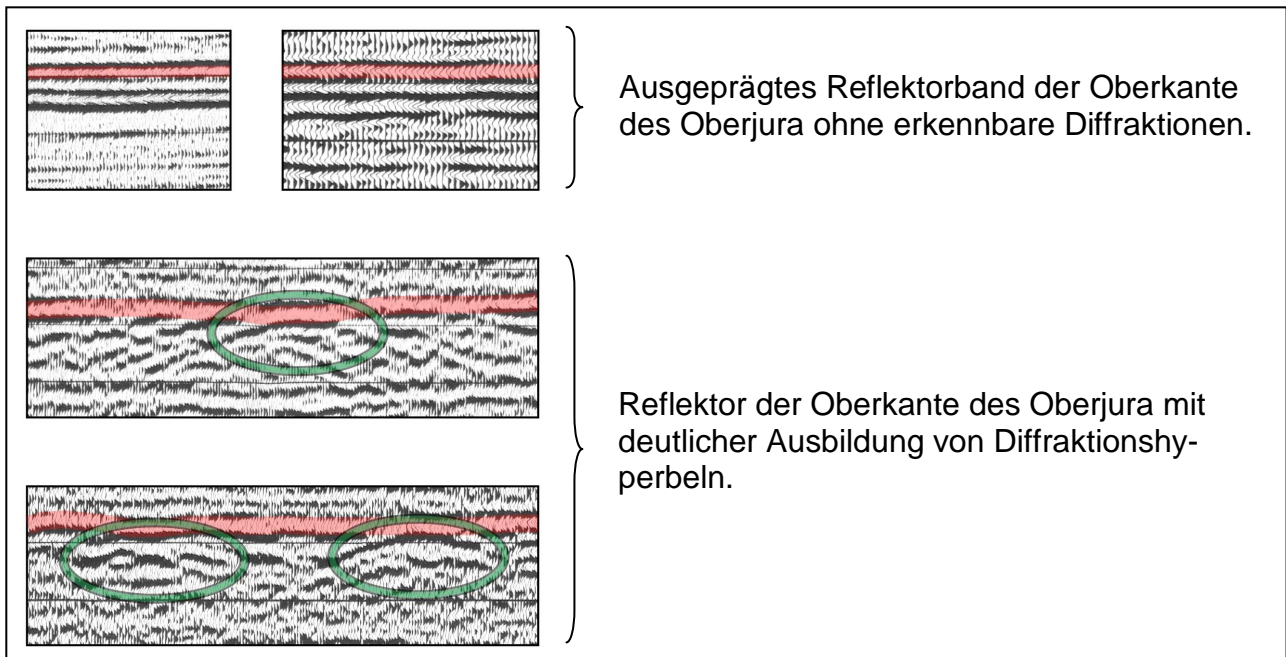


Abb. 9: Diffractionshyperbeln im Oberjura.

Durch diese einfache Klassifizierung sollte eine mögliche Überinterpretation der reflexionsseismischen Daten im Hinblick auf die Ausprägung der Diffractionshyperbeln vermieden werden. Anhand dieser Daten wurde eine Karte zur Verbreitung der Reflektorklassen im baden-württembergischen Teil des Molassebeckens entwickelt. Das Ergebnis der Auswertung der reflexionsseismischen Daten zeigt Abbildung 10.

Im Bereich Stockach - Pfullendorf - Saulgau - Biberach erstreckt sich beckenparallel eine Struktur der Klasse 3. In diesem Bereich sind in den seismischen Sektionen Diffractionen bis in den oberen Oberjura zu verfolgen. Südlich der Nordgrenze der helvetischen Oberjura-Fazies in der oberen Unteren Felsenkalk-Formation nach Meyer & Schmidt-Kaler (1989) sind überwiegend keine Hinweise auf Riffstrukturen erkennbar gewesen (Klasse 1). Jedoch sind westlich von Ravensburg Diffractionen im zentralen und unteren Bereich des Oberjura erkannt worden (Klasse 2), die über die Faziesgrenze hinaus nach Süden reichen. Da in der Bohrung Ravensburg vertikale fazielle Differenzierungen nachgewiesen werden konnten, erscheint diese Beobachtung nicht unplausibel. Weitere Bereiche ohne Diffractionen sind auch nördlich der Faziesgrenze nach Meyer & Schmidt-Kaler (1989) immer wieder anzutreffen. Insbesondere in den Regionen um Aulendorf und Laupheim sowie entlang eines nordöstlich von Bad Waldsee / Bad Wurzach über Ochsenhausen bis

hin zur Iller verlaufenden Arms sind räumlich ausgedehnte Bereiche ohne Diffraktionen zu erkennen.

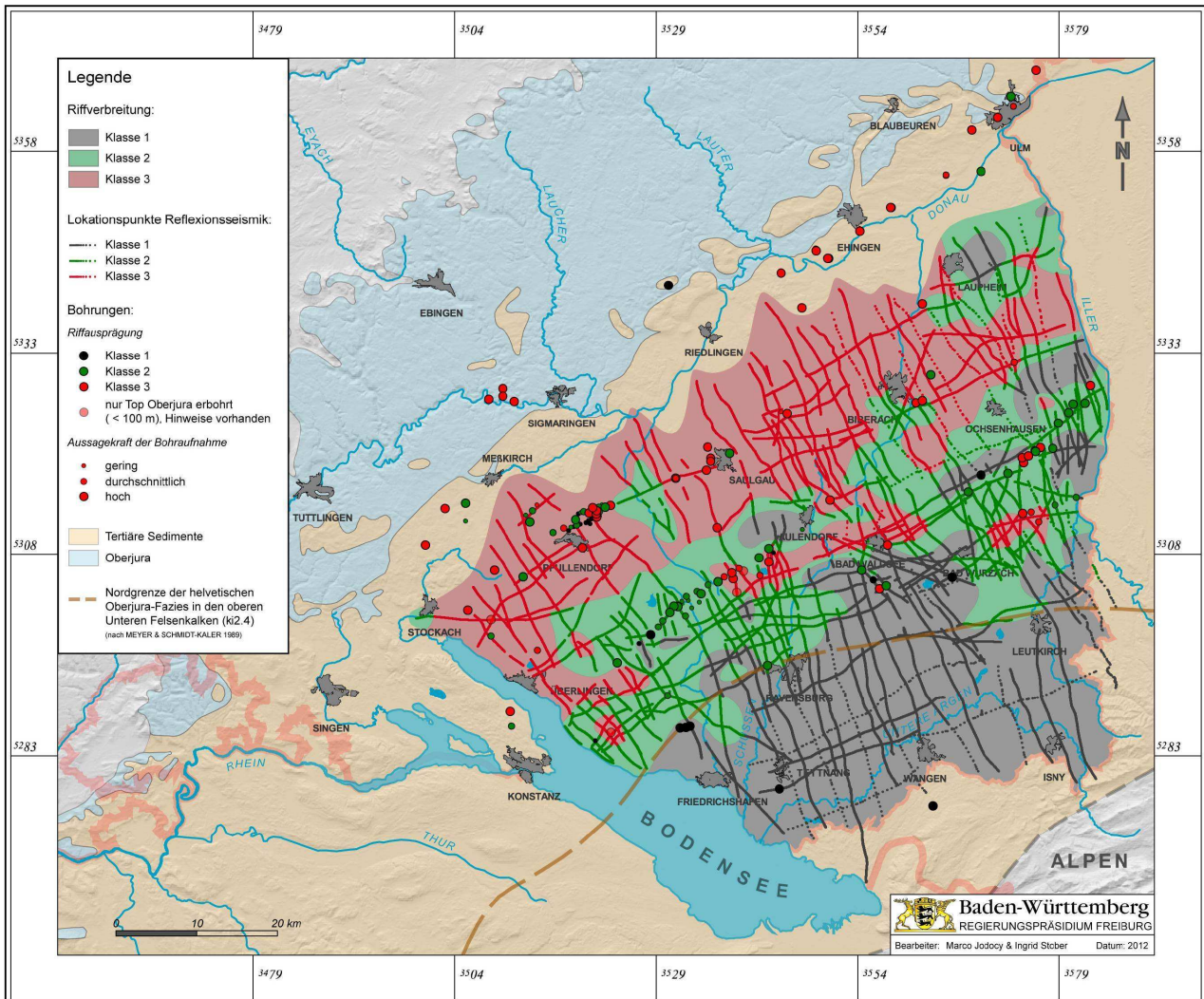


Abb. 10: Verbreitung der Reflektorklassen und der Bohrungen mit Riffklassifizierung im Südwestdeutschen Molassebecken

Anhand zahlreicher Bohrungen der KW-Industrie, sowie Thermal- und (Karst-) Wasserbohrungen wurde versucht, die in der Seismik beobachteten Reflektorklassen zu identifizieren und festzustellen, ob es sich bei den beobachteten Diffraktionen eventuell um Riffstrukturen verschiedener Ausprägung handelt. Zu diesem Zweck wurden Informationen aus Schichtenverzeichnissen und Bohrkernbeschreibungen zusammengestellt, die im Zusammenhang mit dem Vorkommen von Schwamm-Algen-Riffen stehen.

Insgesamt wurden Schichtenverzeichnisse für 304 Bohrungen erhoben. Bei 224 dieser Bohrungen war eine Erfassung von Schlüsselbegriffen anhand der Bohrkarten möglich. Tabelle 5 zeigt die Liste der für jede der vorstehend genannten Bohrungen gesuchten Informationen bezüglich Hinweise auf Riffstrukturen für den Oberjura-Aquifer. Neben der reinen Anzahl des jeweils vorgefundenen Schlagworts (Spalte „Anzahl“) wurden auch ergänzende halbquantitative Angaben und weitere Informationen zur Stärke der



Ausprägung aus der Bohraufnahme in der Spalte „Ausprägung“ erfasst. Weiterhin wurde vermerkt, ob die Bohraufnahme auf Spülproben oder Bohrkernen basiert (Spalte „Art der Aufnahme“).

Tabelle 5: Schlüsselwörter zur Identifikation von Hinweisen auf Riffstrukturen in Bohraufnahmen.

Schlüsselwort	Anzahl (n)	Ausprägung	Art der Aufnahme
Dolomit, dolomitisch			
Zuckerkörnig			
Dolomit abgrusend / absandend			
Umkristallisierter Kalkstein			
Schwammreste, Riffschutt			
Organogener Detritus			
Kavernöses Gestein			
Spülungsverlust			
Durchgefallener Bohrmeißel			

Zur Beschreibung der Stärke der Riffausprägung in den jeweiligen Bohrungen wurden für die Bohraufnahmen Bewertungskriterien entwickelt. Neben einer reinen Bewertung über Anzahl und Art der Schlüsselwörter wurden Daten zur Mächtigkeit und Lage der Hinweise im Bohrprofil erfasst und berücksichtigt. Es wurden insgesamt drei Klassen definiert:

- Klasse 1: Es sind keine Schlüsselwörter in den Bohrbeschreibungen anzutreffen.  
 Klasse 2: Es sind Hinweise auf Riffstrukturen vorhanden, jedoch nur für den zentralen bis unteren Bereich der Oberjura-Formation.  
 Klasse 3: Es sind deutliche Hinweise auf Riffstrukturen bereits innerhalb der ersten 150 m unter Top Oberjura vorhanden.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Bohrungen zu gewährleisten, wurde jede Bohrung in einer Einzelbetrachtung in ihrer Güte bewertet. Dabei spielten neben dem reinen Umfang der Beschreibung (u.a. Seitenzahl) auch vergleichende Betrachtungen der herangezogenen Bohrungen untereinander eine Rolle. Die ausgewerteten Bohrungen wurden in die Karte mit den anhand der Reflexionsseismik kartierten Reflektorklassen eingetragen (Abb. 10). Die Bohrungen zeigen neben der farblich differenzierten Riffausprägung auch die Aussagekraft anhand der Punktgröße. Insgesamt ist eine sehr gute Übereinstimmung mit der seismischen Interpretation zu erkennen. Das detaillierte Verfahren ist auf der Homepage des RPF dokumentiert.

Wird die Charakterisierung der Bohrklassen herangezogen und auf die Reflektorklassen der seismischen Daten übertragen, lassen sich Rückschlüsse bezüglich einer Interpretation der beobachteten Diffraktionen ziehen. Demnach handelt es sich bei der Reflektorklasse 1 mit großer Wahrscheinlichkeit um gebankte Kalke der Schwäbischen und Helvetischen Oberjura-Fazies. In diesen gebankten Bereichen sind keine Diffraktionen und auch keine Hinweise auf Riffe in den Bohraufnahmen anzutreffen. Klasse 2 zeigt dagegen möglicherweise eine geringmächtige Riffverbreitung, die sich vorwiegend auf den zentralen Bereich des Oberjura konzentriert. Diffraktionen in der Seismik sind vornehmlich im zentralen bis unteren Bereich des Oberjura mit einer schwachen bis teilweise klar

erkennbaren Topographie ausgeprägt, die jedoch nie die Oberkante des Oberjura erreicht oder sogar „durchbricht“. In den Bohrungen beschränken sich die Hinweise auf Riffstrukturen ebenfalls auf den zentralen bis unteren Oberjura. Insbesondere innerhalb der Hangenden Bankkalk-Formationen sind keine Schlüsselwörter in signifikanter Anzahl und Ausprägung angetroffen worden. Die Diffraktionen der Klasse 3 sind dagegen möglicherweise als eine mächtige Riffverbreitung über den gesamten Oberjura zu deuten. Die Diffraktionen erstrecken sich in den seismischen Sektionen über den gesamten Oberjura und führen selbst am Top-Reflektor zu einer deutlich ausgeprägten Topographie. Die Verteilung der Schlüsselwörter in den Bohrungen korrespondiert mit dieser Beobachtung. Hinweise auf Riffstrukturen sind über den gesamten Oberjura hinweg zahlreich und deutlich vorhanden. Zudem wurden häufig erhebliche Spülungsverluste und oder Schichtausfälle an Kernproben beobachtet

Grundsätzlich konnte anhand der Bohrungen eine Abgrenzung der seismischen Reflektorausprägungen mit ihren jeweiligen Charakteristika vorgenommen und eine Korrelation mit dem Vorkommen unterschiedlich stark ausgeprägter und unterschiedlich mächtiger Riffstrukturen durchgeführt werden. Größere Abweichungen von Klasse 1 auf Klasse 3 oder umgekehrt, bei denen die Klasse 2 übersprungen wird, sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf kleinräumige Fazieswechsel zurückzuführen, die sich anhand der seismischen Sektionen nicht eindeutig differenzieren und räumlich abgrenzen lassen. Vor allem ältere Sektionen mit geringerem Überdeckungsgrad und schlechterer Auflösung weisen bei der Abgrenzung kleinräumiger fazieller Variationen erhöhte Interpretationsspielräume auf. Die seismischen Abspielungen sind zur Abgrenzung von solchen räumlich sehr begrenzten Strukturen nur bedingt geeignet. Aus Bohraufnahmen abgeleitete Daten liefern in solchen Fällen eine genauere Abbildung der Riffstrukturen. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese aus Bohrungen abgeleiteten und zu den seismischen Sektionen abweichenden Strukturen in ihrer räumlichen Ausdehnung sehr begrenzt sind, während die Seismik eher die grundsätzlichen Tendenzen und großräumigeren Verhältnisse widerspiegelt.

Karten zur Verbreitung von Riffen im Oberjura wurden bereits 1989 von MEYER & SCHMIDT-KALER entwickelt. Vergleicht man die Ergebnisse beider Untersuchungen, so sind die grundsätzlichen Verteilungsmuster zur Riffverbreitung im baden-württembergischen Teil des Molassebeckens vergleichbar. Bereichsweise können dennoch leichte Abweichungen erkannt werden. Den aktuellen Untersuchungen liegen jedoch eine unterschiedliche Datenbasis und ein unterschiedlicher methodischer Ansatz zugrunde. Die Untersuchungen von MEYER & SCHMIDT-KALER (1989) basieren auf Bohraufnahmen und Aufschlüssen an der Erdoberfläche, z.B. Steinbrüchen. Das Bohrgut und / oder die Bohrkerne der herangezogenen Bohrungen wurden mikrofaziell im Detail untersucht. Auf dieser Basis konnten MEYER & SCHMIDT-KALER (1989) mehrere Karten über die Riffverbreitung für die einzelnen Unterformationen des Oberjura entwickeln. Die im Rahmen des Projektes GeoTool neu entwickelte Karte (Abb. 10) verfolgt einen davon abweichenden Ansatz. Sie basiert auf der Auswertung seismischer Sektionen und beschreibt eine in den seismischen Abspielungen erkannte Riffausprägung auf Grundlage charakteristischer reflexionsseismischer Signaturen. Bohrungen wurden lediglich zum Zweck der Verifizierung der seismischen Interpretationen herangezogen. Eine Differenzierung für einzelne Unterformationen konnte anhand der seismischen Sektionen nicht erfolgen, u.a. aufgrund von Einschränkungen bei der Auflösung der seismischen Abspielungen. Es handelt sich demnach tendenziell um eine summarische Betrachtung der grundsätzlichen Riffmächtigkeit über alle Unterformationen des Oberjura hinweg von der Basis bis zur Oberkante.



Die weiteren Untersuchungen zielten darauf ab festzustellen, ob es eine Korrelation zwischen Riffklasse und Gebirgsdurchlässigkeit gibt. Es zeigte sich, dass Bohrungen, die in Riffklasse 3 liegen, eine Gebirgsdurchlässigkeit von  $T/H > 3 \cdot 10^{-6}$  m/s aufweisen, während Bohrungen in Riffklasse 2 Gebirgsdurchlässigkeiten von  $T/H < 3 \cdot 10^{-7}$  m/s besitzen (Abb. 10). Mangels Bohrungen können für Riffklasse 1 keine Angaben über die Größe der Gebirgsdurchlässigkeit gemacht werden. Da die Ausprägung von Riffstrukturen nicht das alleinige Kriterium für das Erzielen von Durchlässigkeit ist, sondern in gebankter Fazies die Durchlässigkeit vom Grad der Klüftung bestimmt wird, ist davon auszugehen, dass Riffverbreitung und Massenkalkfazies nur notwendige Voraussetzungen für hohe Durchlässigkeiten sind. Hinzu kommt allerdings, dass die Gebiete mit mächtigen Riffen bzw. Massenkalken bei tektonischer Beanspruchung Schwächezonen darstellen und das Gebirge somit genau dort bevorzugt mit Klüftbildung bis hin zur Ausbildung von Störungszonen reagiert. Damit sind genau diese Bereiche prädestiniert für eine intensive Verkarstung.

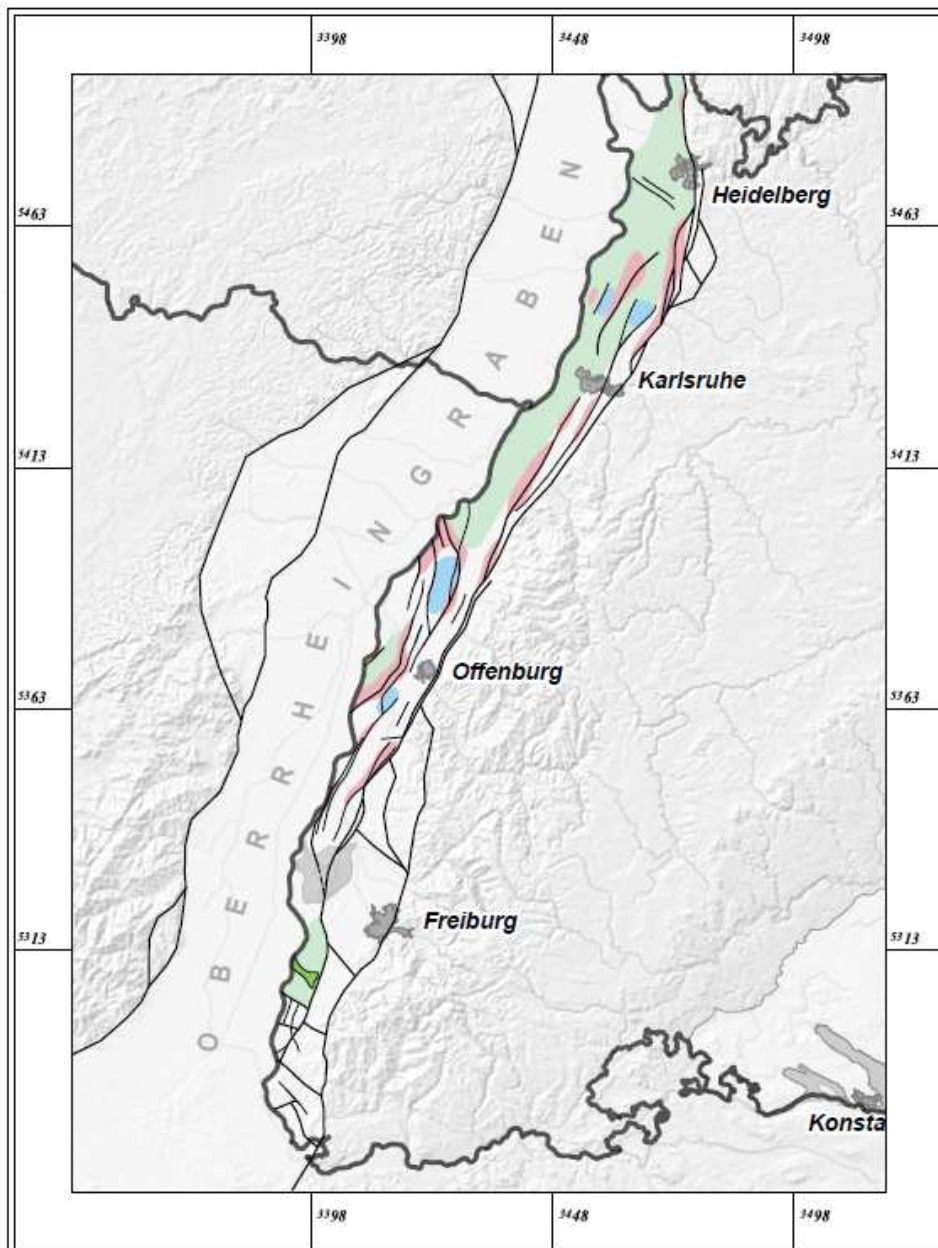


Abb. 11: Hauptstörungen im Oberrheingraben, Bereiche mit Hinweisen auf Kompression (rot) und Extension (blau) sowie tief liegende Bereiche (grün).

Für den Oberrheingraben wurden die seismischen Sektionen, auf deren Basis die geologischen Quer- und Längsschnitte der Homepage des RPF sowie einige zusätzliche Schnitte erstellt wurden, dazu benutzt, um relevante Hauptstörungen mit Versatzbeträgen von mehreren Zehnermetern zu identifizieren. Die Geothermischen Synthesen (CEC 1979, 1980) wurden dazu benutzt, um den Verlauf der Hauptstörungen zwischen den geologischen Schnitten zu korrelieren. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Hauptstörungen im Oberrheingraben. Zusätzlich wurde untersucht, ob es in den seismischen Sektionen Hinweise auf Kompression bzw. Transpression oder auf Extension bzw. Transtension gibt.

Im Hinblick auf Kompression bzw. Transpression wurden die seismischen Sektionen unter folgenden Aspekten gesichtet:

- Überschiebungen bzw. reaktivierte Normalabschiebungen (reverse faults).
- Hebungen / Faltungen in der geologischen Abfolge im Umfeld von Störungen, z.T. verbunden mit Synklinalen und / oder erosiven Prozessen.
- Positive Flowerstructures als transpressive Strukturen im Bereich transversaler Störungssysteme.

Im Hinblick auf Extension bzw. Transtension wurden die seismischen Sektionen unter folgenden Aspekten gesichtet:

- Ausgedehnte Beckenstrukturen und die Ausbildung von Depotzentren infolge extensiver Bewegungsvorgänge.
- Negative Flowerstructures als transtensive Strukturen im Bereich von Transversalverschiebungen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt Abbildung 11, in der Hinweise auf Bereiche mit überwiegend extensiver oder kompressiver Charakteristik eingetragen sind. Ziel dieser Untersuchung war es, erste Hinweise zu erhalten, ob von diesen Störungen eine verbesserte Wasserwegsam ausgeht oder ob sie eher dicht sind. Die Untersuchungen zeigten, dass im Bereich von Störungszonen sich offensichtlich auf engstem Raum Kompression und Extension ablösen können. Diese Vorgänge scheinen somit relativ komplex zu sein und erfordern umfängliche grundlegende Untersuchungen.

### **6.2.6 Räumliche Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit**

Für die tief liegenden geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken wurden, wie in den Abschnitten 6.2.1 - 6.2.5 beschrieben, Daten und Informationen erhoben und ausgewertet, die direkte und indirekte Hinweise zur Durchlässigkeit oder Wasserführung dieser Reservoirs geben. Zur Darstellung der Verteilung der Durchlässigkeiten wurde in den einzelnen geothermischen Nutzhorizonten des Oberrheingrabens und des Molassebeckens auf Box-Plots zurückgegriffen, da diese eine einfache Veranschaulichung der Daten hinsichtlich der angetroffenen Größenordnungen und der Werteverteilung unter Verwendung robuster Streuungs- und Lagemaße ermöglichen. Die den einzelnen Verfahren zugrunde liegenden Grundgesamtheiten sind sehr unterschiedlich.

Am Beispiel des Oberen Muschelkalk-Aquifers werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuche und Verfahren zur Ermittlung von Durchlässigkeiten einander

gegenübergestellt. Entsprechende Untersuchungen wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte durchgeführt.

Aus hydraulischen Testdaten wurden für die einzelnen geothermischen Nutzhorizonte als sogenannte harte Informationen Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) ermittelt und bezüglich ihrer Güte bewertet (Abschn. 6.2.1). Beispielsweise fallen die Gebirgsdurchlässigkeiten im Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben signifikant größer aus als im Molassebecken (Abb. 12). Der Unterschied wird mit tektonischen Vorgängen bei der Grabenbildung in Verbindung gebracht.

Die aus Bohrungen erhobenen Betriebsdaten wurden in Produktivitätsindizes umgerechnet und sodann in PI/H-Werte überführt. Es wurden verschiedene Algorithmen zwischen den PI/H-Werten und den T/H-Werten aufgestellt (Abschn. 6.2.2). Grundsätzlich ist bei Mineral-/Thermalwasserbohrungen die Korrelation zwischen den beiden Werten sehr gut, bei KW-Bohrungen deutlich schlechter. Die Unterschiede werden auf unterschiedliche versuchstechnische Rahmenbedingungen zurückgeführt (Abb. 8). In der Regel fallen die PI/H-Werte im Mittel kleiner aus als die T/H-Werte (z.B. Abb. 7).

Abbildung 12 veranschaulicht, dass die größten Abweichungen zu den aus hydraulischen Tests ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H) bei den an Bohrkernen bestimmten Permeabilitäten (k) auftreten. Die aus Bohrlochlogs abgeleiteten Durchlässigkeiten (k) fallen durchweg größer aus als die an Bohrkernen ermittelten Werte, jedoch sind auch sie kleiner als die Gebirgsdurchlässigkeiten (T/H). Eine entscheidende Rolle spielt die mit den jeweiligen Auswerteverfahren erfasste Größe des untersuchten Volumens. In einem Kluft- oder Karstgrundwasserleiter ist das repräsentative Elementarvolumen (REV, BEAR 1979) zur Erfassung der quantitativen Hohlraumstruktur offensichtlich immer noch deutlich größer als der Raum, der beispielsweise von geophysikalischen Bohrlochlogs erfasst werden kann (Abschn. 6.2.3).

Erst bei Gebirgsdurchlässigkeiten von  $T/H < 2 \cdot 10^{-8}$  m/s liegen die anhand von Bohrkernen ermittelten k-Werte in einer ähnlichen Größenordnung wie die aus hydraulischen Tests ermittelten Gebirgsdurchlässigkeiten.

Die aus den Schichtenverzeichnissen abgeleiteten qualitativen Durchlässigkeiten (D) liegen größenordnungsmäßig relativ nahe bei den Gebirgsdurchlässigkeiten (Abschn. 6.2.4). Diese Abschätzung der qualitativen Durchlässigkeit liefert deutlich bessere Werte als die Ermittlung anhand von Bohrkernen und liegt in einem ähnlich guten Bereich wie die PI/H-Werte (Abb. 12).

Die halbqualitativen und qualitativen Daten zur jeweiligen Abschätzung von Durchlässigkeiten (PI/H, k, D) wurden dazu benutzt, um den Datensatz der Gebirgsdurchlässigkeit (T/H) für alle geothermischen Nutzhorizonte zu erweitern, d.h. für prognostische Abschätzungen der Gebirgsdurchlässigkeit in Regionen, aus denen keine harte Werte vorliegen. Damit gibt es jetzt auch Anhaltspunkte über Durchlässigkeiten in Gebieten, aus denen zuvor keine Informationen vorlagen. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse beispielhaft für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und im Molassebecken dargestellt. Entsprechende Karten wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte erstellt.

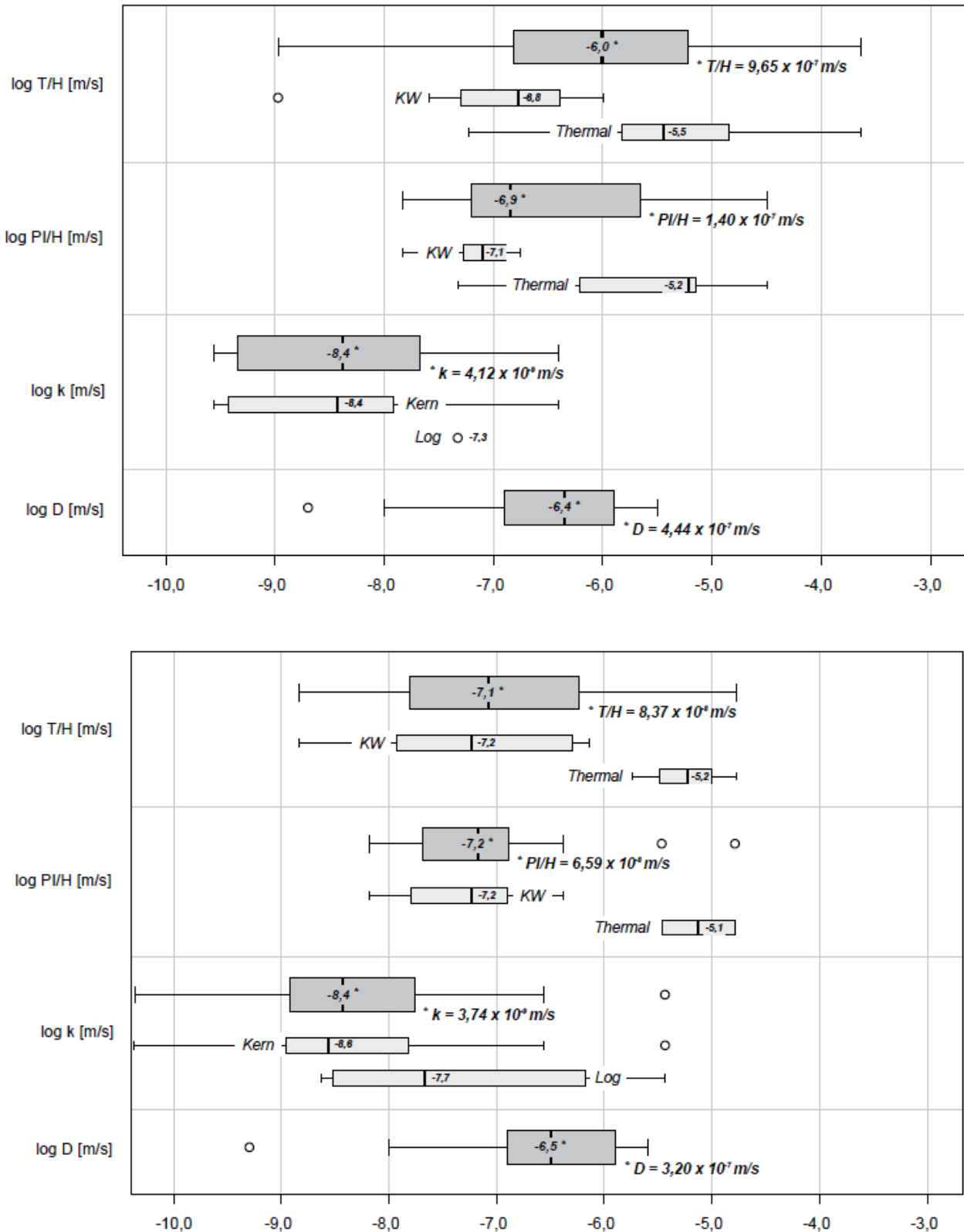


Abb. 12: Vergleich der ermittelten Durchlässigkeiten (m/s) am Beispiel des Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben (oben) und Molassebecken (unten). Dargestellt sind die Quartile (Median, 1. und 3. Quartil) der logarithmierten Durchlässigkeiten als Box-Plots aus hydraulischen Tests (T/H), Produktivitätsindizes (PI/H), Permeabilitätsbestimmungen (k, Bohrkerne und geophysikalische Bohrlochlogs) sowie qualitativen Durchlässigkeiten (D).

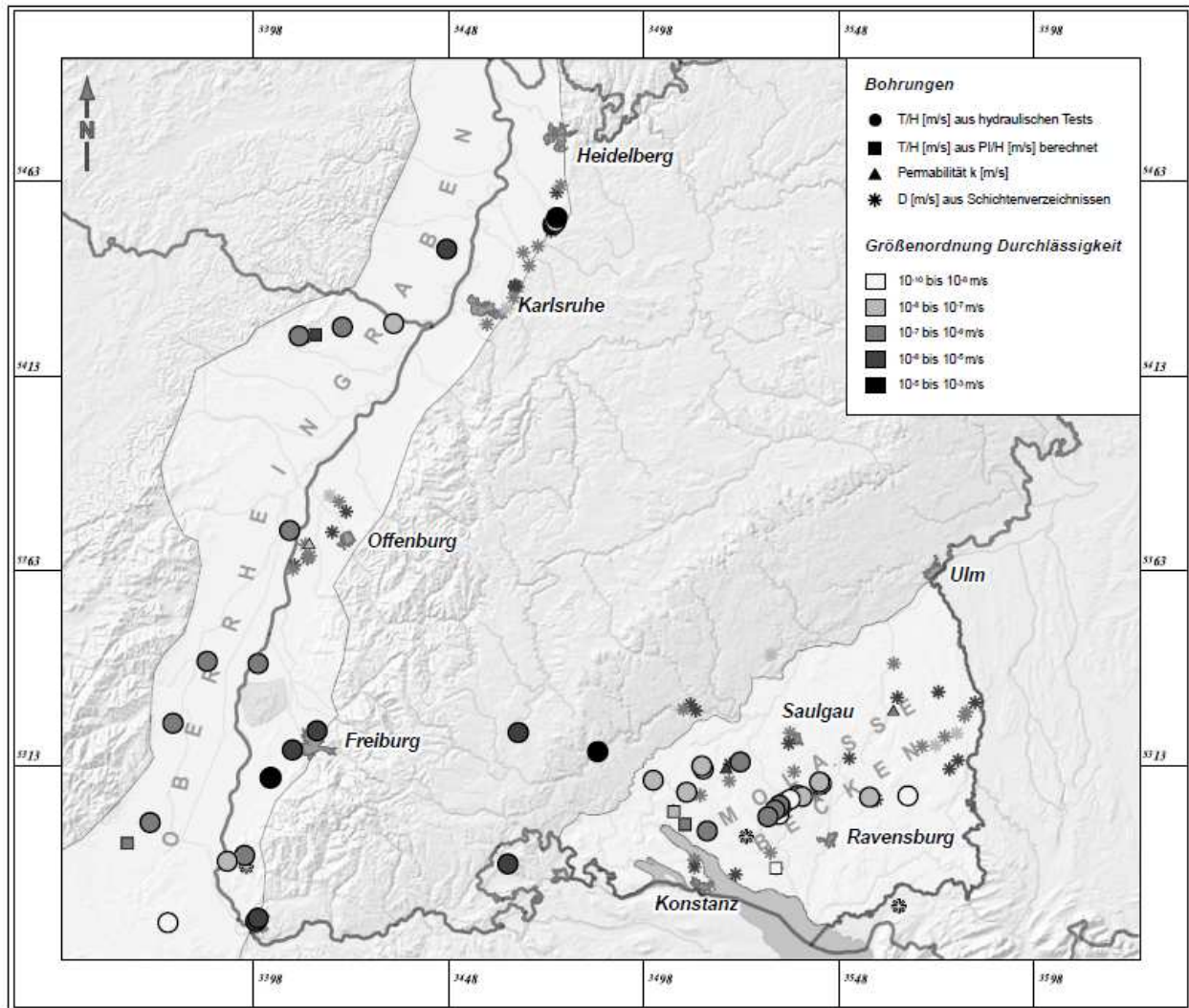


Abb. 13: Zusammenstellung der nach den verschiedenen Verfahren ermittelten Durchlässigkeiten am Beispiel des Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und Molassebecken.

Für den tief liegenden Oberjura-Aquifer im Molassebecken, der sich faziell in einen nördlichen und einen südlichen Abschnitt gliedert, sind innerhalb dieser Schichtenabfolge die größten hydrogeothermischen Potenziale im Bereich eines mächtigen beckenparallelen Gürtels innerhalb der in nördlichen Beckenregionen auftretenden Schwäbischen Fazies anzutreffen. Der Grad der Verkarstung des Oberjuras geht ebenfalls mit zunehmender Distanz zur Donau und mit dem Absinken der Schichten in größere Tiefen im Südosten zurück. In südlichen Beckenregionen nimmt die Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Übergang zur helvetischen Fazies dagegen stark ab und verliert trotz der zu erwartenden höheren Temperaturen (Abschn. 6.3) als potenzieller hydrogeothermischer Nutzhorizont zunehmend an Bedeutung (Abb. 14). Anhand seismischer Sektionen wurde eine Kategorisierung der Riffausprägung im Oberjura vorgenommen, die mit Schichtenverzeichnissen verifiziert werden konnte. Den einzelnen Riffklassen konnten Klassen der Gebirgsdurchlässigkeit zugeordnet werden (Abschn. 6.2.5). Dadurch ließ sich die Karte der Gebirgsdurchlässigkeit für den Oberjura (STOBER & VILLINGER 1997) ergänzen und verfeinern (Abb. 14). Es ist nicht völlig auszuschließen, dass die Gebirgsdurchlässigkeit mit zunehmender Annäherung an die Alpen und



zunehmender tektonischer Beanspruchung wieder zunimmt. Die Riffverbreitungskarte (Abb. 10) kann hierzu natürlich keine Informationen liefern, eher die hydraulische Interpretation der Schichtenverzeichnisse (vgl. entspr. Abb. 13 für den Oberjura). Zusammen mit den Kollegen aus Bayern wurde eine neue Durchlässigkeitskarte für den gesamten süddeutschen Oberjura-Aquifer erstellt (BIRNER et al. 2012).

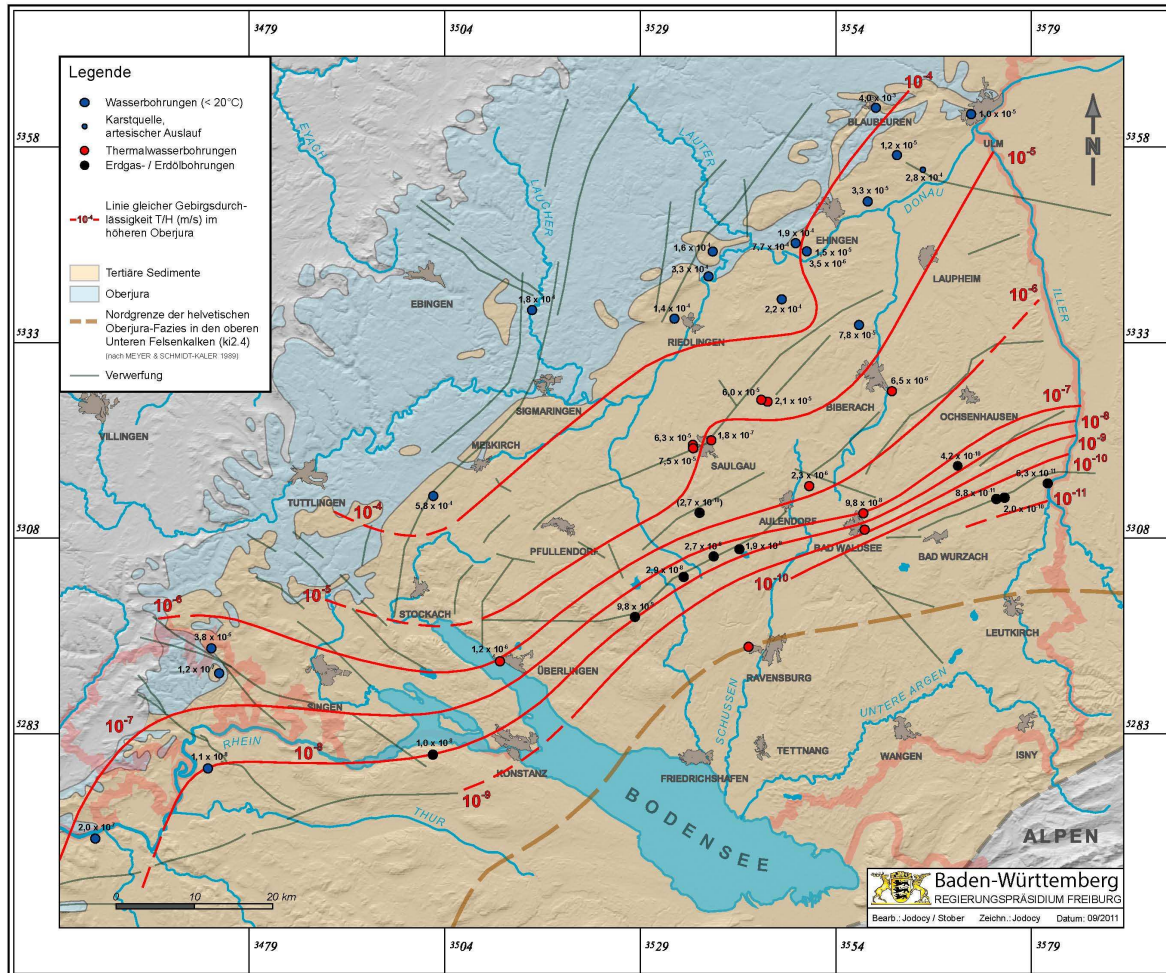


Abb. 14: Verteilung der Gebirgsdurchlässigkeit im Oberjura-Aquifer des südwestdeutschen Molassebeckens

Entsprechende Untersuchungen zur regionalen Verbreitung der Durchlässigkeit wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken durchgeführt. Die Ergebnisse sind auf der Homepage des RPF eingestellt und im Anhang dieses Berichtes auf der CD-ROM (Anl. 5, Downloads Homepage) enthalten.

### 6.3 Geologie, Temperaturverhältnisse

Auf der im Rahmen des Projektes GeoTool erstellten Homepage des RPF sind zahlreiche geologische **Quer- und Längsprofile** durch den Oberrheingraben und das Molassebecken zum Downloaden eingestellt. In diesem Zusammenhang wurde im Projekt GeoTool auch die Digitalisierung der seismischen Sektionen für das Molassebecken vervollständigt, so dass damit Baden-Württemberg das erste Bundesland mit einem

vollständig digitalisierten Datenbestand an seismischen Sektionen ist (CD-ROM: Homepage Downloads 6, 7). Im Zuge der Kooperation mit dem LIAG im Projekt GeoTool wurde ein **3D-Temperaturmodell** erstellt (AGEMAR et al. 2013). Damit war es möglich, für alle 34 geologischen Schnitte entsprechende Temperaturen auszulesen und diese in die jeweiligen geologischen Schnitte auf der Homepage des RPF einzutragen (CD-ROM: Anhang Anl. 1, Homepage Profilschnitte).

Parallel dazu wurde für jeden geothermischen Nutzhorizont im Oberrheingraben und im Molassebecken die Verteilung der **Mächtigkeiten** erarbeitet. Damit kann für jede beliebige Lokation für jeden geothermischen Nutzhorizont die Mächtigkeit angegeben werden. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Mächtigkeiten für den Buntsandstein im Oberrheingraben. Aus Gebirgs-durchlässigkeit und Mächtigkeit kann die Höhe der Förderrate abgeschätzt werden. Die Mächtigkeiten der einzelnen geothermischen Nutzhorizonte sind ebenfalls auf der Homepage des RPF eingestellt. Das detaillierte Vorgehen zur Erstellung der Mächtigkeitskarten ist auf der diesem Bericht beiliegenden CD-ROM (Anhang Anl. 4) beschrieben.

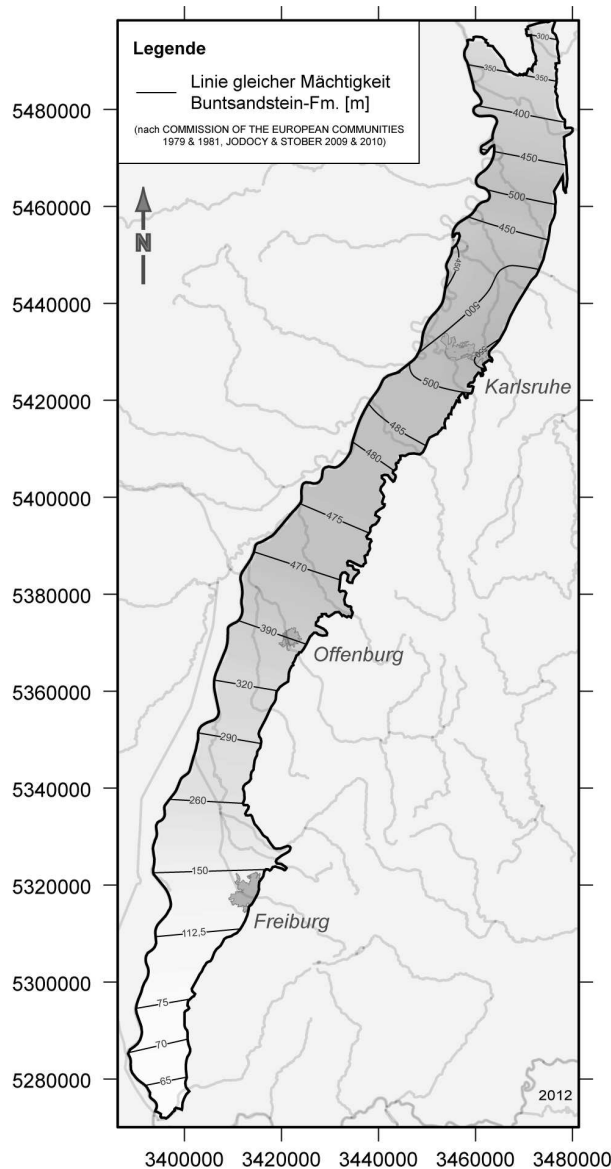


Abb. 15: Mächtigkeitsverteilung des Buntsandsteins im Oberrheingraben; mit deutlicher Zunahme von S nach N.

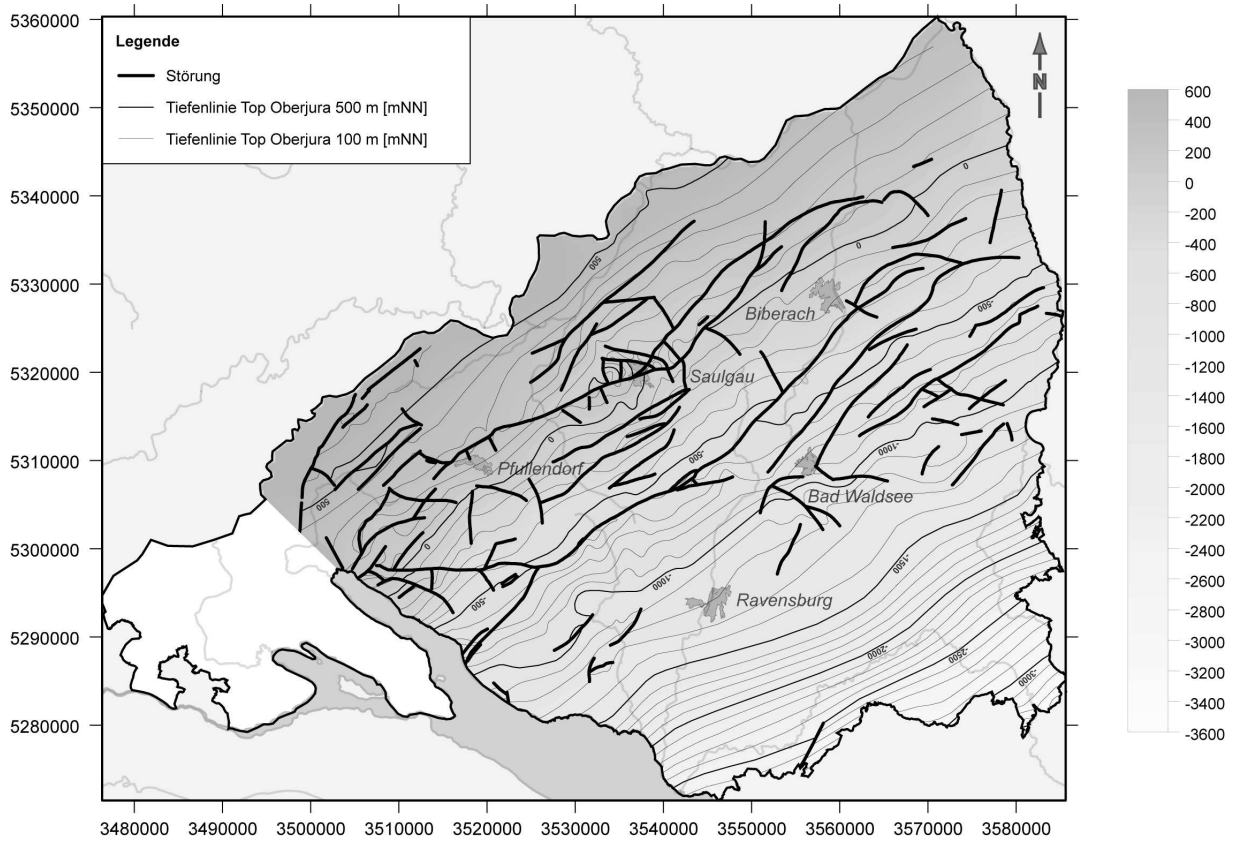


Abb. 16: Einfallen des Top Oberjura im Molassebecken nach Südosten

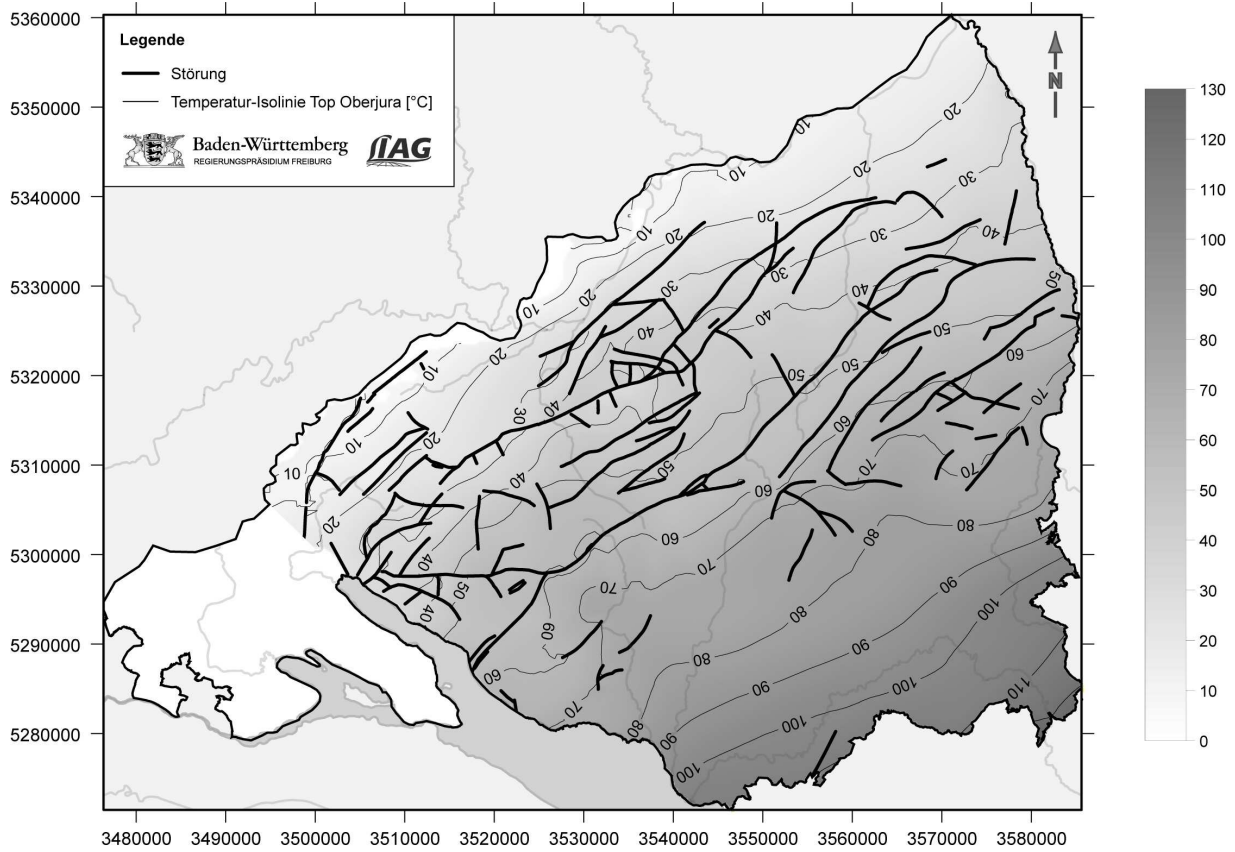


Abb. 17: Temperaturverteilung am Top Oberjura im Molassebecken



Für das Einfallen des **Top Oberjura** und des **Top Oberer Muschelkalk** konnten ebenfalls Karten erstellt werden, die die Tiefenlage der jeweiligen Oberflächen nach Südosten wiedergeben. In diese Karten wurden die Hauptstörungen eingetragen. Zusätzlich wurde aus dem im Projekt GeoTool zusammen mit dem LIAG erstellten 3D-Temperaturmodell für Baden-Württemberg die Temperatur am Top Oberjura und am Top Oberer Muschelkalk ausgelesen und dargestellt. Abbildung 16 zeigt beispielhaft für den Oberjura das Einfallen des Top Oberjura im Molassebecken und Abbildung 17 die Temperaturen am Top Oberjura.

Im Rahmen des Projektes GeoTool wurden auch die **Potentialkarten** für den Oberjura und den Oberen Muschelkalk überarbeitet. Die entsprechenden Abbildungen sind auf der Homepage des RPF eingestellt und auf der dem Endbericht beiliegenden CD-ROM (Homepage Downloads 19, 22) enthalten. Aus den beiden Potentialkarten wurde eine **Potentialdifferenzkarte** entwickelt (Abb. 18), um zu erkennen, ob es einen direkten Hinweis auf eine hydraulische Verbindung zwischen Oberjura und Oberen Muschelkalk gibt, zumal "Stockwerksverbindungen" wegen der hydraulischen und hydrochemischen Beeinflussung von größter Wichtigkeit insbesondere für den Betrieb geothermischer Anlagen sein können. Die Abbildung lässt erkennen, dass im Oberjura das hydraulische Potential deutlich höher als im Oberen Muschelkalk ist. Die Potentialdifferenz scheint jedoch mit Annäherung an die Alpen und insbesondere in Richtung Singen abzunehmen.

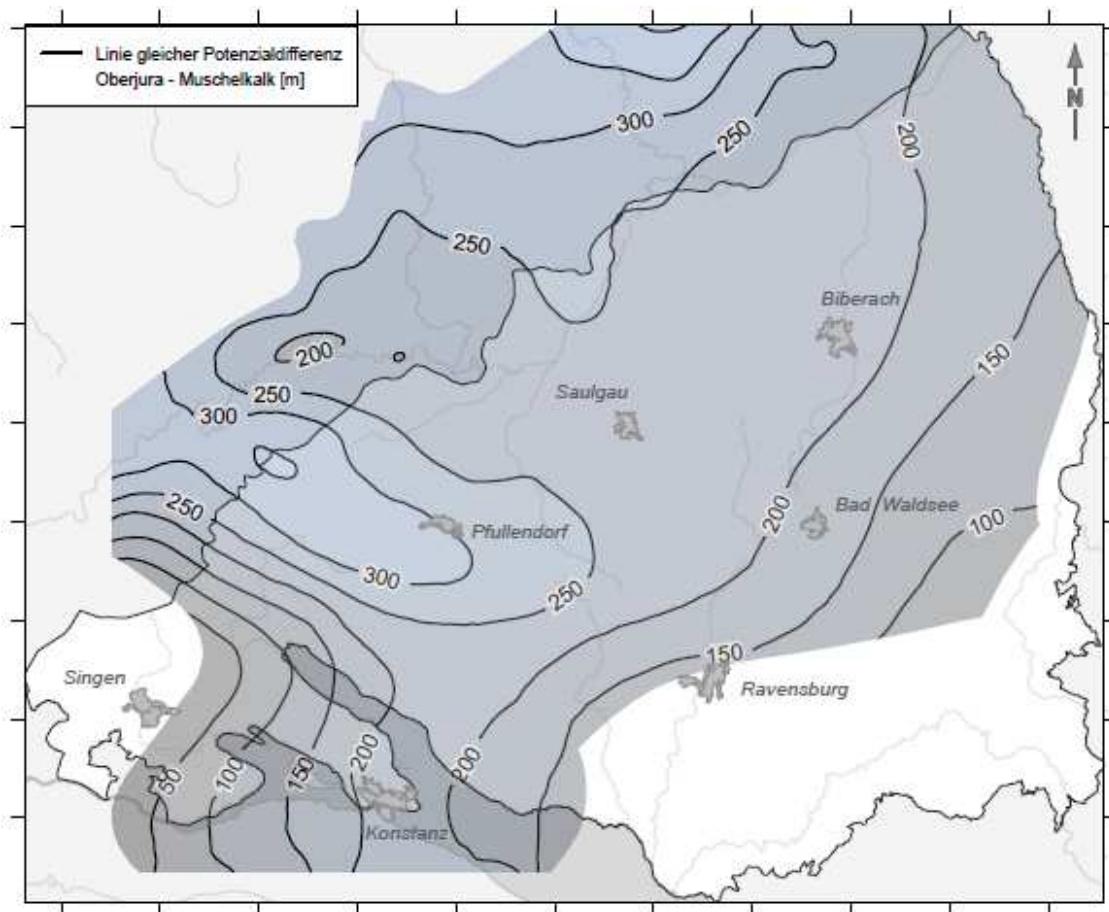


Abb. 18: Potentialdifferenz zwischen Oberjura- und Oberen Muschelkalk-Aquifer (m)

## 6.4 Hydrochemie der Tiefenwässer

Aus dem links- und rechtsrheinischen Teil des Oberrheingrabens sowie dem baden-württembergischen Teil des Molassebeckens wurden von allen geothermischen Nutzhorizonten die hydrochemischen Daten sowie die Gasgehalte der Tiefenwässer zusammengestellt, validiert und ausgewertet. Daten aus bereits vorhandenen Tiefbohrungen sind für die Abschätzung der hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse des tiefen Untergrunds sehr wertvoll. In der Regel wurden schon während des Abteufens der Bohrung hydraulische Untersuchungen durchgeführt und damit auch Wasserproben für eine hydrochemische Analyse gewonnen. Schwerpunkt bildeten dabei über weite Regionen Bohrungen der Kohlenwasserstoff-Industrie, aber auch zahlreiche Forschungs- und Erkundungsbohrungen, Bohrungen der Thermalwasser- und Mineralwasser-Erschließung sowie Rohstoffbohrungen (CARLÉ 1975, NAGRA 1989, 2001, SCHLOZ & STOBER 2006, HAUBER 1991, GRAF et al. 1994, PRESTEL 1990, BERTLEFF et. al. 1988) liefern wertvolle Informationen. Die meisten Bohrungen, denen die Wasserproben entstammen, existieren nicht mehr. Details zur damaligen Probennahme, zur Art der hydrochemisch bestimmten Parameter sowie zur Auswahl und Validierung der Analysendaten sind in STOBER & JODOCY (2009, 2011a, 2011b) beschrieben.

Die Untersuchungen im Projekt GeoTool haben gezeigt, dass die Tiefenwässer grundsätzlich mit Ausnahme des Oberjura einen hohen Gesamtlösungsinhalt von einigen 10er g/kg aufweisen, wobei sich der Wassertyp mit zunehmender Tiefenlage des Aquifers durch hohe Natrium- und Chloridgehalte auszeichnet. Zur Abschätzung der Gesamtmineralisation (TDS) der Wässer im Oberrheingraben und Molassebecken konnten Algorithmen entwickelt werden, ebenso für die Hauptinhaltsstoffe der Wässer. Damit ist es möglich, in Abhängigkeit von der Tiefenlage überschlägig den Gesamtlösungsinhalt für jeden geothermischen Nutzhorizont abzuschätzen sowie die Größe der Hauptinhaltsstoffe (Abschn. 6.4.1). Zur Höhe Gebirgsdurchlässigkeit des Aquifers konnte jeweils eine mathematische Beziehung aufgestellt werden (Abschn. 6.4.5).

Die hydrochemischen Eigenschaften der Wässer im Aquifer des Oberen Muschelkalkes werden nicht nur durch die karbonatischen Gesteine vorgegeben, sondern sie werden teilweise auch durch das Vorkommen von Sulfaten (Anhydrit, Gips) geprägt. Weitgehend dürfte die erhöhte Salinität durch aufsteigende Tiefenwässer verursacht sein. Im Oberen Muschelkalk dürfte es sich vorzugsweise um Halitlösung aus dem Mittleren Muschelkalk, im Buntsandstein durch salinare Komponenten aus dem Kristallinen Grundgebirge handeln. Eine zusätzliche salinare Komponente fossilen Meerwassers kann nicht ausgeschlossen werden (Abschn. 6.4.3). Entsprechende Untersuchungen wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte durchgeführt. Grundsätzlich ist im Oberrheingraben mit dem Vorkommen von erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalten zu rechnen (Abschn. 6.4.2). Alle Tiefenwässer in allen geothermischen Nutzhorizonten des Oberrheingrabens und Molassebeckens wurden im Hinblick auf ihre Sättigung bezüglich wichtiger Minerale untersucht. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 6.4.4 für ausgewählte Nutzhorizonte dargelegt. Die Ergebnisse aller geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken sind auf der Homepage des RPF abrufbar und sind im Anhang dieses Berichts auf der beiliegenden CD-ROM (Homepage Downloads 11-15) enthalten.

### 6.4.1 Gesamtmineralisation - Wasserinhaltsstoffe

Sämtliche Tiefenwässer im Oberrheingraben und Molassebecken mit Ausnahme der Wässer im Oberjura sind hochmineralisiert. Der Gesamtlösungsinhalt (TDS) nimmt mit der Tiefe zu, wie hier beispielsweise auf Abbildung 19 für den Buntsandstein-Aquifer im Oberrheingraben gezeigt. Die Abbildung veranschaulicht, dass es in größeren Tiefen keine gering mineralisierten Wässer gibt. Wässer, die aus einer Tiefe von über 1000 m u.Gel. stammen, weisen in der Regel ein TDS von deutlich über 1000 mg/l auf. Die höchsten Konzentrationen, die in Wasserproben aus Bohrungen im Buntsandstein-Aquifer gemessen wurden, betragen 127 g/kg (Abb. 19).

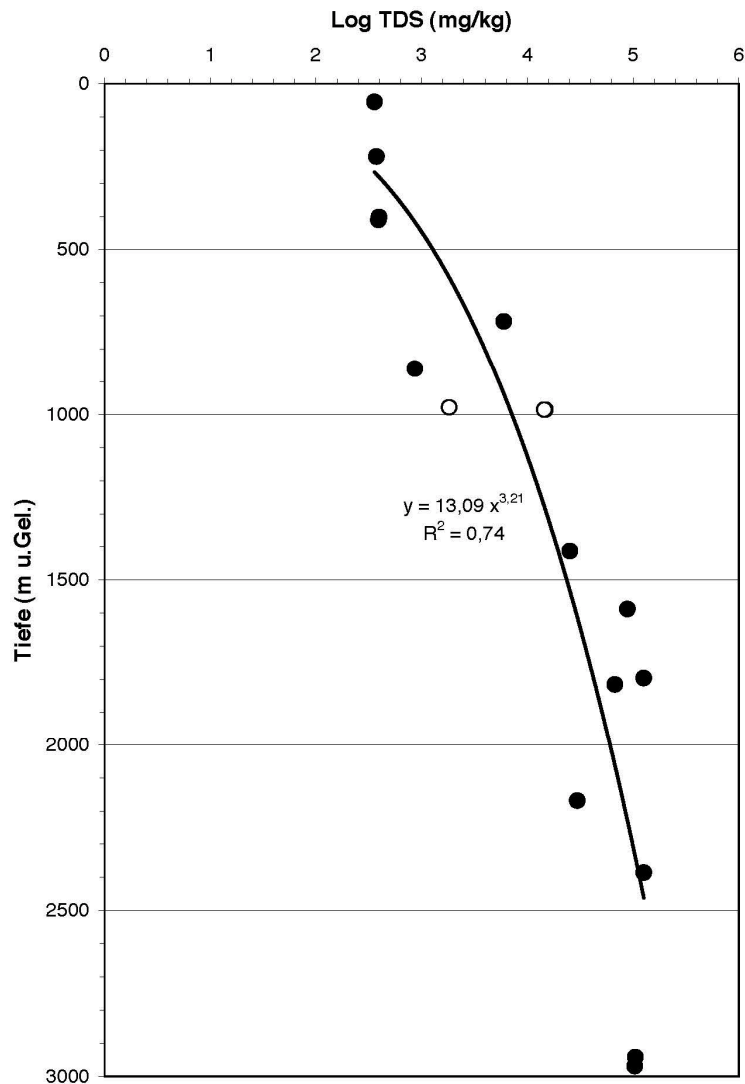


Abb. 19: Gesamtlösungsinhalte (TDS) der Tiefenwässer im Buntsandstein-Aquifer des Oberrheingrabens (geschlossene Kreise) und des Molassebeckens (offene Kreise).

Die Tiefenabhängigkeit des Gesamtlösungsinhalts lässt sich für den Buntsandstein-Aquifer im Oberrheingraben durch den nachstehenden Algorithmus (Gl. 6) beschreiben.

$$y = 13,09 x^{3,21} \quad (R^2 = 0,74) \quad (6)$$

Darin sind  $x = \text{Tiefe (m u. Gel.)}$  und  $y = \log \text{TDS (mg/kg)}$ . Für alle anderen geothermischen Nutzhorizonte konnten entsprechende Korrelation aufgestellt werden.

Auf Abbildung 20 wurden als Schoeller-Diagramm beispielhaft für alle geothermischen Nutzhorizonte die Hauptinhaltsstoffe der Analysen aus dem Buntsandstein Aquifer im Oberrheingraben dargestellt. Auf der x-Achse sind jeweils die Hauptinhaltsstoffe abgetragen, die y-Achse zeigt die entsprechenden Konzentrationen (mmol(eq)/kg) in logarithmischem Maßstab. Für alle Tiefenwässer konnte festgestellt werden, dass zwei verschiedene Wassertypen vorliegen: Die niedriger mineralisierten Wässer aus geringeren Tiefen, die im Beispiel für den Buntsandstein-Aquifer reich an Calcium und Hydrogenkarbonat sind, gelegentlich auch an Sulfat, und die tiefer liegenden höher mineralisierten Wässer mit Natrium- und Chlorid-Dominanz (z.B. Geothermiebohrungen Cronenbourg und Bruchsal) und ebenfalls erhöhten Sulfatgehalten. Der Übergang der beiden Wassertypen ist nicht abrupt. Auf Abbildung 21 werden am Beispiel des Buntsandsteins die entwickelten Algorithmen für die Tiefenabhängigkeit der einzelnen Hauptinhaltsstoffe präsentiert.

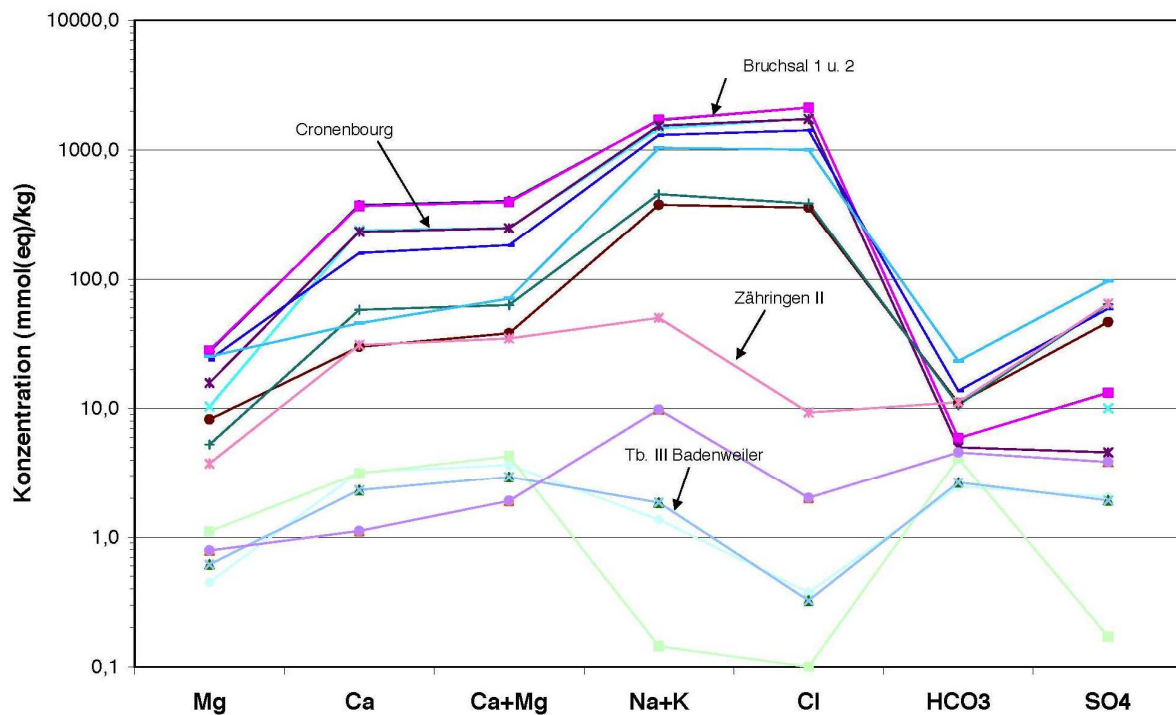


Abb. 20: Schoeller-Diagramm der Tiefenwässer aus dem Buntsandstein Aquifer im Oberrheingraben.

Die hydrochemischen Eigenschaften der Buntsandstein-Wässer aus geringer Tiefe werden wie bei allen geothermischen Nutzhorizonten i.w. durch das Gestein, in dem sich die Wässer befinden, geprägt (Wasser-Gesteins-Wechselwirkung). Im Falle des Buntsandsteins durch den geklüfteten, z.T. fossilführenden Sandstein, in dem häufig karbonatische Ausfällungen auf Klufflächen vorliegen. Vereinzelt können in der Sandsteinabfolge auch geringmächtige Dolomitablagerungen oder Karbonate eingeschaltet sein. Die Sandsteine sind z.T. karbonatisch gebunden und stark Glimmer führend. Vereinzelt (z.B. Fränkische Senke) können im Oberen Buntsandstein Gipskrustenböden vorliegen (GEYER & GWINNER 1991). Als Folge hydrothermalen Prozesse

können zudem bereichsweise Eisen- und Kupfersulfide vorhanden sein. Bei den tiefer liegenden, höher mineralisierten Wässern handelt es sich in allen geothermischen Nutzhorizonten, also unabhängig von den mineralogischen Eigenschaften, um Wässer mit einer Na-Cl-Dominanz.

Im Buntsandstein nimmt ab etwa 1000 m u.Gel. der Hydrogenkarbonat-Anteil in den Wässern von z.T. über 60 Äqu% auf etwa 5 Äqu% und weniger ab. In diesem Tiefenbereich reduziert sich auch der Anteil an Sulfat. Entsprechend verhalten sich die Kationen. Oberhalb von etwa 800 m u.Gel. können die Calcium-Anteile z.T. über 60 Äqu% und die Magnesium-Anteile über 15 Äqu% betragen. Unterhalb dieses Tiefenbereichs werden in den Tiefenwässern i.d.R. Calcium-Anteile deutlich unter 20 Äqu% und sehr niedrige Magnesium-Anteile beobachtet. In diesen Tiefen ist Natrium das dominierende Kation. Auch die Kalium-Anteile scheinen mit der Tiefe geringfügig zuzunehmen (Abb. 21).

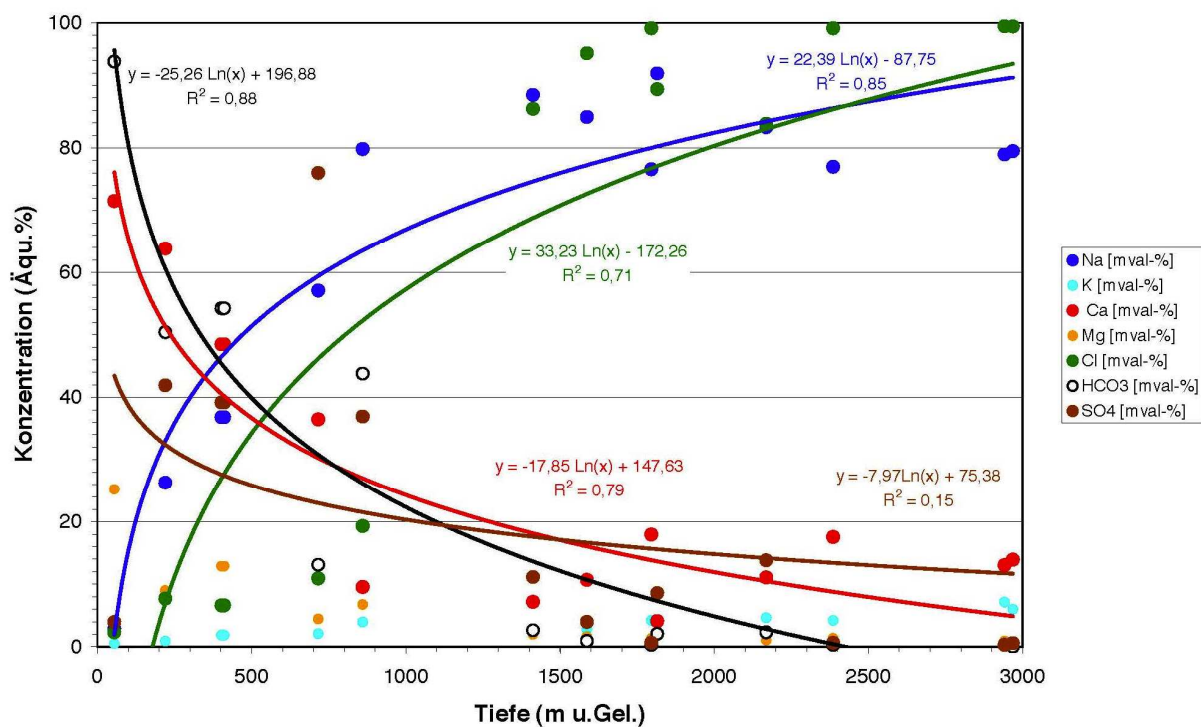


Abb. 21: Änderung des Wassertyps mit zunehmender Tiefenlage im Buntsandstein des Oberrheingrabens. Für die einzelnen Inhaltsstoffe sind entsprechende Trendlinien eingetragen.

In Abbildung 21 sind die entsprechenden Trendlinien für die Hauptinhaltsstoffe der Buntsandsteinwässer eingetragen, die bei vorgegebener Tiefenlage eine grobe Abschätzung des Wassertyps ermöglichen. Entsprechenden Untersuchungen wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken durchgeführt und Algorithmen aufgestellt. Zusammen mit den Algorithmen, die für die Tiefenabhängigkeit des Gesamtlösungsinhaltes (TDS) entwickelt wurden (im Beispiel für den Buntsandstein Gl. 6) lassen sich damit Abschätzungen zur hydrochemischen Zusammensetzung der Wässer in allen geothermischen Nutzhorizonten in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage vornehmen.

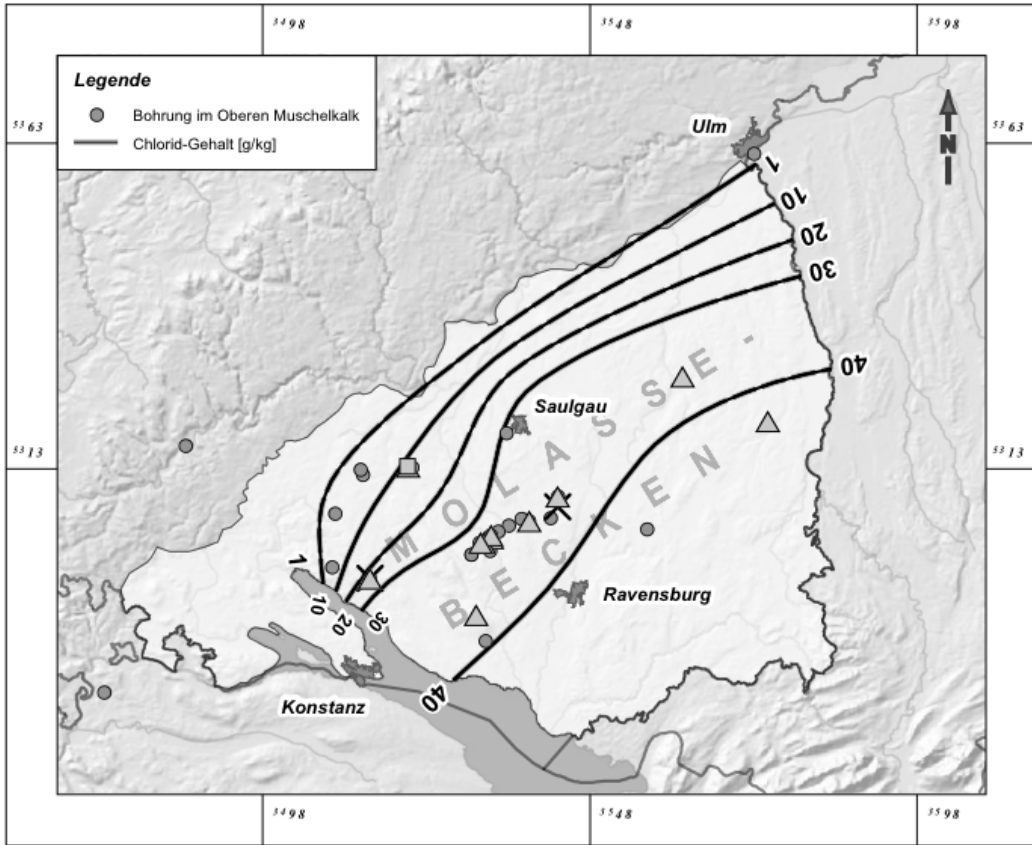


Abb. 22: Chlorid-Gehalte im Oberen Muschelkalk Aquifer des Molassebeckens.

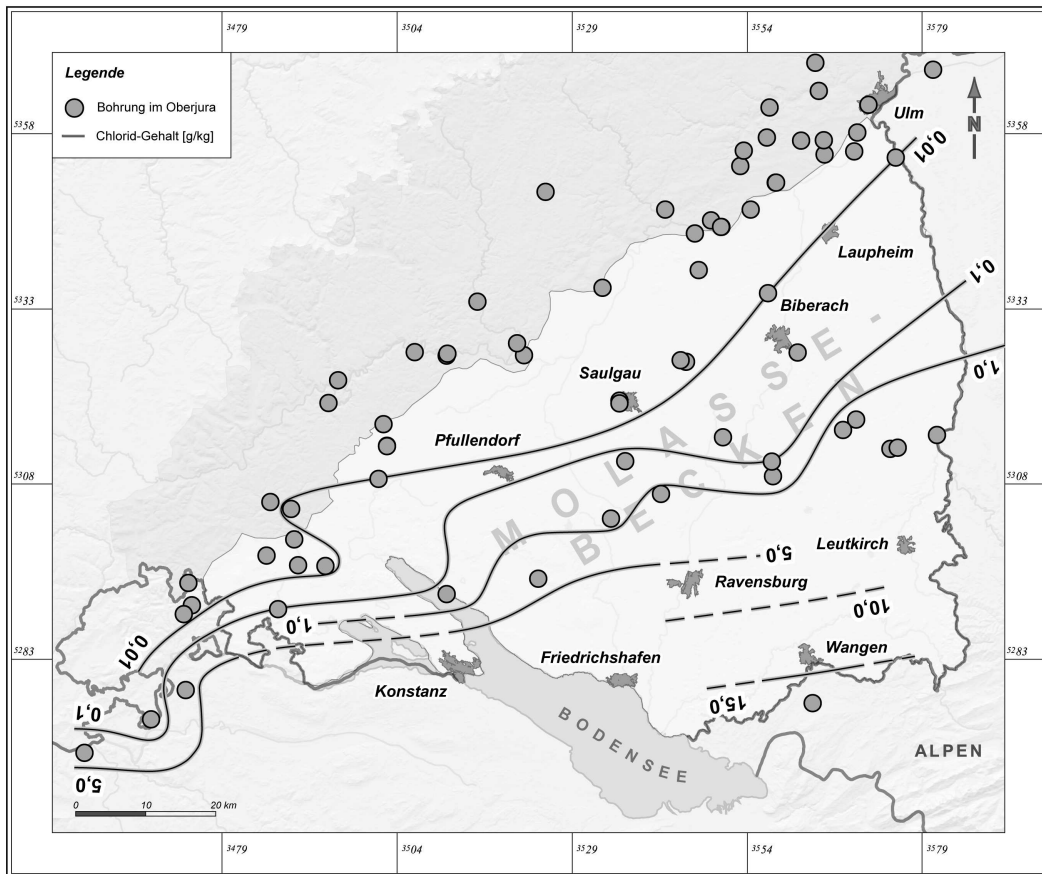


Abb. 23: Chlorid-Gehalte im Oberjura-Aquifer des Molassebeckens.



Für die Tiefenwässer in den einzelnen geothermischen Nutzhorizonten ergaben sich im Oberrheingraben keine Hinweise auf regionale hydrochemische Trends. Im Molassebecken konnte sowohl für den Oberen Muschelkalk als auch für den Oberjura-Aquifer eine systematische Zunahme der Chlorid-Gehalte nach SE festgestellt werden (Abb. 22, 23). Die Abbildungen 22 und 23 veranschaulichen die deutlich höheren Chlorid-Gehalte im Oberen Muschelkalk.

#### 6.4.2 Gasgehalte

Leider gibt es nur sehr selten Untersuchungen auf Gasgehalte in den Tiefenwässern des Oberrheingrabens und Molassebeckens. Die wenigen vorliegenden Analysen beschränken sich im Oberrheingraben ausschließlich auf CO<sub>2</sub>-Messungen in Wässern aus Thermalwasser- und Geothermiebohrungen. Von den Wässern der Kohlenwasserstoff-Bohrungen liegen keine Messungen auf Gasgehalte vor. Unterlagen über H<sub>2</sub>S-Gehalte liegen kaum vor.

Im Oberrheingraben sind die CO<sub>2</sub>-Gehalte der Wässer in flachen Bohrungen sehr niedrig. In den tieferen Thermalwasserbohrungen wurden meist CO<sub>2</sub>-Gehalte von bis zu einigen 100 mg/kg angetroffen (z.B. Zähringen II), z.T. jedoch auch lediglich Werte von 10-25 mg/kg (z.B. Riehen). Deutlich höhere Werte von über 1000 mg/kg wurden unabhängig vom Nutzhorizont in einigen Tiefbohrungen wie den Bohrungen Bruchsal, Bad Krozingen oder Bad Bellingen gemessen. Im Oberrheingraben muss bei Geothermiebohrungen somit mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalten gerechnet werden.

Die wenigen Analysendaten aus dem Molassebecken lassen auf CO<sub>2</sub>-Gehalte von <100 mg/kg und auf äußerst geringe H<sub>2</sub>S-Gehalte (< 3 mg/kg) schließen.

#### 6.4.3 Zur Herkunft und Genese der Tiefenwässer

Wie in Abschnitt 6.4.1 festgestellt gilt für alle geothermischen Nutzhorizonte unabhängig von den mineralogischen Eigenschaften, dass die tiefer liegenden, höher mineralisierten Wässer Na-Cl-reich sind. Außerdem sind diese Wässer häufig deutlich höher mineralisiert als Meerwasser. Im Projekt GeoTool wurde daher auch die Ursache für die hohe Salinität untersucht. Die hierfür benutzten Untersuchungsverfahren waren die Cl/Br-Verhältnisse, die (Na+K)/Cl-Verhältnisse sowie die Lagerstättentemperaturen anhand von Geothermometern. Nachstehend wird das Vorgehen anhand eines Beispiels für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben erläutert.

Das Verhältnis zwischen dem Chlorid- und Bromid-Gehalt (**Cl/Br-Verhältnis**) im Wasser gibt Hinweise auf die Herkunft der Chloridgehalte. Das Cl/Br-Verhältnis für Meerwasser liegt bei Cl/Br = 288 (mg-Basis). Wird Meerwasser mit reinem Wasser verdünnt, so bleibt das Cl/Br-Verhältnis unverändert. Laugungsversuche an Graniten und Gneisen aus dem Mittleren Schwarzwald haben gezeigt, dass die Cl/Br-Verhältnisse der Laugungswässer wesentlich geringer sind (Cl/Br < 100) als im Meerwasser (STOBER & BUCHER 2000). Die Auflösung von Halit aus dem Mittleren Muschelkalk und aus den oligozänen Salzablagerungen im Oberrheingraben erbrachte demgegenüber wesentlich höhere Cl/Br-Verhältnisse (Cl/Br > 2000) (HE et al. 1999, STOBER & BUCHER 2000).

Viele der untersuchten Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk des Oberrheingrabens (z.B. Bad Krozingen, Bad Schönborn, Bad Bellingen) liegen im Bereich der Meerwasserverdünnungslinie, somit könnte es sich in diesen Fällen primär um fossiles Meerwasser handeln. Deutlich erhöhte Cl/Br-Verhältnisse weisen u.a. einige Tiefenwässer des Oberen Muschelkalk Aquifers in Kohlenwasserstoffbohrungen (z.B. Eschau 1) auf. Auch in den Thermalwässern aus den beiden Geothermiebohrungen Riehen B1 und B2 sowie der Heilwasserquelle Freiburg wurden erhöhte Cl/Br-Werte von 909, 1041 und 944 gemessen. Möglicherweise liegt in diesen Wässern neben einer potentiellen fossilen marinen Komponente eine saline Komponente aus den Haliten im Mittleren Muschelkalk durch aufsteigende Tiefenwässer vor (STOBER et al. 2013).

Mit Hilfe so genannter **Geothermometer** lassen sich anhand hydrochemischer Komponenten die Temperaturen der Lagerstätten ermitteln, aus denen die Wässer stammen. Diese Verfahren beruhen auf temperaturabhängigen chemischen Reaktionen und setzen voraus, dass ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Wasser und Kontaktgesteinen existiert. Wegen der relativ niedrigen Temperaturen sind im vorliegenden Fall die SiO<sub>2</sub>-Geothermometer besonders geeignet. Die SiO<sub>2</sub>-Löslichkeit ist bei pH < 8 relativ unempfindlich gegenüber pH-Wert-Schwankungen. Die vorliegenden hydrochemischen Analysen besitzen pH-Werte unter pH = 8. Vorteil des SiO<sub>2</sub>-Geothermometers ist außerdem, dass die Einstellung auf ein neues Gleichgewicht bei Abkühlung relativ langsam erfolgt. Bei Förderung aus einem tief liegenden Aquifer mit parallel dazu stattfindender Abkühlung und anschließender Probenahme bleibt daher das SiO<sub>2</sub> im Wasser gelöst, d.h. es fällt nicht unmittelbar aus. Das Quarz-Geothermometer beruht auf verschiedenen Berechnungsansätzen, von denen sich die Ansätze nach FOURNIER (1977) (Gl. 7) und nach WALTER & HELGESON (1977) (Gl. 8) als besonders zuverlässig erwiesen haben.

$$T = 1309 / (5,19 - \log \text{SiO}_2) - 273,15 \quad (7)$$

$$T = 912,31 + 406,06 \cdot \log a\text{SiO}_2 + 46,066 \cdot (\log a\text{SiO}_2)^2 \quad (8)$$

Die anhand der Geothermometer ermittelten Lagerstätten-Temperaturen wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte mit den Aquifer-Temperaturen verglichen, die aus geophysikalischen Bohrlochmessungen stammen. Die Aquifer-Temperaturen sind in den einzelnen geothermischen Nutzhorizonten sowohl im Oberrheingraben als auch im Molassebecken meistens erhöht, d.h. die durchschnittlichen Temperaturgradienten liegen zwischen gradT = 3°C/100 m und gradT = 6°C/100m. Erhöhte Temperaturgradienten können verschiedene Ursachen haben, wie beispielsweise aufsteigende Tiefenwässer, günstige Wärmeleitfähigkeiten in der durchteuften Schichtenabfolge u.a.

Auf Abbildung 24 sind die mit den beiden Geothermometern berechneten Lagerstätten-Temperaturen gegen die aus geophysikalischen Bohrlochmessungen ermittelten Aquifer-Temperaturen aufgetragen. Die beiden benutzten Geothermometer liegen relativ dicht beieinander mit maximalen Abweichungen von i.d.R. bis zu ca. 5°C. Bei Identität zwischen Aquifer-Temperatur (Bohrlochmessung) und berechneter Lagerstätten-Temperatur (SiO<sub>2</sub>-Gehalt) liegen die Werte auf der durchgezogenen Linie in Abbildung 24. Die wenigen SiO<sub>2</sub>-Gehalte, die von den hochkonzentrierten Wässern aus den Kohlenwasserstoffbohrungen vorliegen, besitzen nur eine geringe Güte. Die anhand der Geothermometer aus den Wässern der Thermalwasser- oder Geothermiebohrungen im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens berechneten Lagerstätten-Temperaturen weisen meistens höhere Werte auf als die gemessenen Aquifer-Temperaturen (z.B. Geothermiebohrungen Riehen, Thermalwasserbohrungen Bad



Krozingen, Erkundungsbohrung Bad Bellingen 3, Thermalwasserbohrung Helios II/Frankreich, Heilwasserquelle Freiburg u.a.). Wahrscheinlich handelt es sich um aus der Tiefe aufsteigende Wässer, die erhöhte  $\text{SiO}_2$ -Gehalte mitführen. Diese Beobachtungen stützen die Ergebnisse der Cl/Br-Signaturen einiger Wässer aus dem Oberen Muschelkalk, deren Cl/Br-Signaturen gegenüber der Meerwassersignatur erhöht waren und ebenfalls auf eine aufsteigende Tiefenwasserkomponente hindeuteten. Eine Ausnahme stellt die ehemalige Thermalwasserbohrung Zähringen bei Freiburg am Rand des Oberrheingrabens dar, bei der gegenüber der Aquifer-Temperatur geringere Lagerstätten-Temperaturen berechnet wurden (Abb. 24), so dass dort eher von absteigenden Wässern ausgegangen werden muss.

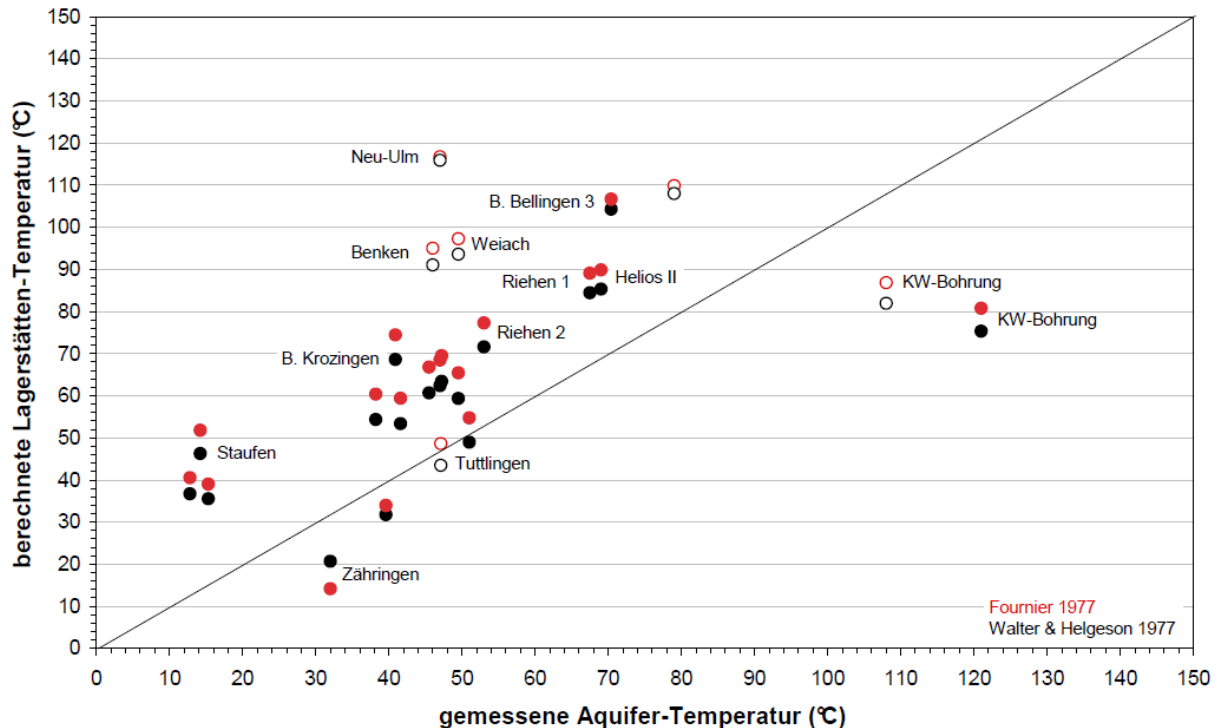


Abb. 24: Aus den  $\text{SiO}_2$ -Geothermometern nach FOURNIER (1977) und WALTER & HELGESON (1977) berechnete Lagerstätten-Temperaturen im Vergleich zu den gemessenen Aquifer-Temperaturen für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben (gefüllte Signaturen) und Molassebecken (offene Signaturen).

Die **(Na+K)/Cl - Verhältnisse** der Tiefenwässern in den geothermischen Nutzhorizonten wurden berechnet, um Hinweise auf die Herkunft der Salinität der Tiefenwässer zu erhalten. Während das (Na+K)/Cl - Verhältnis von Meerwasser bei  $(\text{Na}+\text{K})/\text{Cl} = 0,877$  liegt beträgt es bei der Laugung von Halit & Sylvin ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ )  $(\text{Na}+\text{K})/\text{Cl} = 1$ . Im Beispiel für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben liegt das (Na+K)/Cl - Verhältnis deutlich über demjenigen von Meerwasser und sehr nahe bei Halit & Sylvin. Diese Beobachtungen bestätigen die Annahme, dass die Salinität der Wässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens auf die salinaren Ablagerungen im Mittleren Muschelkalk durch aufsteigende Wässer zurückzuführen sind. Entsprechende Untersuchungen wurden für alle geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken durchgeführt.

#### 6.4.4 Sättigungszustände der Tiefenwässer

Mit Hilfe des Computerprogramms PHREEQC Interactive, Version 2.12.5, (Parkhurst et al. 1980) wurde auf der Basis der Datenbank der LLNL (Laurence Livermore National Laboratory, Wolery 1979) der chemische Ist-Zustand der Tiefenwässer mit dem theoretischen Gleichgewichtszustand verglichen. Auf diese Weise wurde untersucht, inwieweit die Konzentration einzelner Inhaltsstoffe in den Wässern durch die Löslichkeit von Primär- und Sekundärmineralen kontrolliert wird. Der Zustand einer chemischen Reaktion wird durch den Logarithmus des Verhältnisses von Reaktionsquotient und Gleichgewichtskonstanten beschrieben. Negative Werte bedeuten eine Untersättigung des Wassers in Bezug auf das entsprechende Mineral, was impliziert, dass die feste Phase gelöst werden kann. Positive Werte beschreiben eine Übersättigung mit potentiellm Ausfällen der festen Phase. Wird der Wert „0“ erreicht, so ist das Wasser gesättigt.

Nicht von allen Analysendaten lagen „vor Ort“ sondern „im Labor“ gemessene Temperaturen vor. Für die mit dem Programm PHREEQC durchgeführten Berechnungen wurden grundsätzlich die aus geophysikalischen Bohrlochvermessungen ermittelten Aquifer-Temperaturen benutzt (Abschn. 6.4.3).

Ändert sich die Temperatur, so verschiebt sich auch der pH-Wert. Der neutrale Punkt sinkt mit zunehmender Temperatur von pH = 7 auf den Wert pH = 5,5 bei Temperaturen um 200°C ab. Der pH-Wert beeinflusst den Sättigungszustand bezüglich verschiedener Minerale. Beispielsweise ist der Sättigungsindex in Bezug auf Calcit stark pH-Wert abhängig. Mit zunehmendem pH-Wert steigt dieser an. Der Sättigungsindex bezüglich Quarz ist dagegen relativ unempfindlich bei Änderungen des pH-Wertes im Bereich unter pH = 8. In Bezug auf Gips nimmt der Sättigungsindex bei Änderungen des pH-Werts erst im Bereich unter pH = 3,5 stark ab. Da bei einigen der vorliegenden Analysen der pH-Wert nicht „vor Ort“ sondern „im Labor“ bei Zimmertemperatur gemessen wurde, musste dieser Wert für die Berechnung mit PHREEQC auf die jeweils vorliegenden Aquifer-Temperaturen korrigiert werden.

Für alle geothermischen Nutzhorizonte wurden die Sättigungszustände aller Analysen von Tiefenwässern berechnet. Nachstehend werden die Ergebnisse beispielhaft für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken aufgezeigt. Diese Tiefenwässer scheinen demnach unter Aquiferbedingungen in Bezug auf Quarz und Chaledon gesättigt bis leicht übersättigt zu sein (Abb. 25). Aus kinetischen Gründen sind jedoch keine wesentlichen Ausfällungen von Quarz im relevanten Temperaturbereich zu erwarten. Werden die Wässer auf die Karbonate untersucht, so ergibt sich folgendes Bild: Bezüglich Calcit sind die Wässer gesättigt bis leicht übersättigt, während sie in Bezug auf Aragonit nahezu gesättigt sind. Bezüglich Dolomit sind die Tiefenwässer leicht übersättigt und bezüglich Magnesit leicht untersättigt. Sämtliche Wässer sind bezüglich Gips und Anhydrit gesättigt bis leicht untersättigt. Bezüglich Fluorit sind die Wässer nahezu gesättigt, z.T. auch untersättigt.

Auffallend ist die Sättigung bis hin zur leichten Übersättigung bezüglich Baryt (Abb. 25). Bei Erniedrigung der Temperatur, z.B. durch Wärmeentzug, erhöht sich der Grad der Sättigung. Ausfällungen von Baryt in Geothermieanlagen können Probleme verursachen.

In über Tage geschlossenen Zirkulations-Systemen sind die Sättigungszustände bezüglich vieler Minerale von den physikalischen Eigenschaften abhängig, denen die Tiefenwässer unterliegen. Sie werden von den jeweils herrschenden Druck- und

Temperaturbedingungen bestimmt. Bereits bei der Förderung von Tiefenwässern nehmen der Druck stark und geringfügig auch die Temperatur ab. Bei der Passage durch das oft verwinkelte Leitungssystem (z.B. Wärmetauscher bei Geothermieanlagen) an der Erdoberfläche bilden sich immer wieder Druckschatten. Durch den Temperaturentzug beim Durchströmen des Wärmetauschers an der Erdoberfläche erfolgt die wesentliche Temperaturabnahme des Tiefenwassers. Bei Reduktion der Temperatur im relevanten Temperaturbereich von 160°C bis auf 70°C nehmen bei spielsweise die Sättigungszustände von Anhydrit, Gips und Calcit ab, d.h. rein auf der Basis der Temperaturabnahme wären keine Ausfällungen dieser Minerale zu erwarten. Da sich jedoch auch der Druck auf das Fluid reduziert, und dieser Effekt z.B. bei Calcit dominiert, sind Calcit ausfällungen zu erwarten. Völlig anders verhält sich Quarz. Im Niedertemperaturbereich nimmt der Sättigungszustand bezüglich Quarz mit sinkender Temperatur zu.

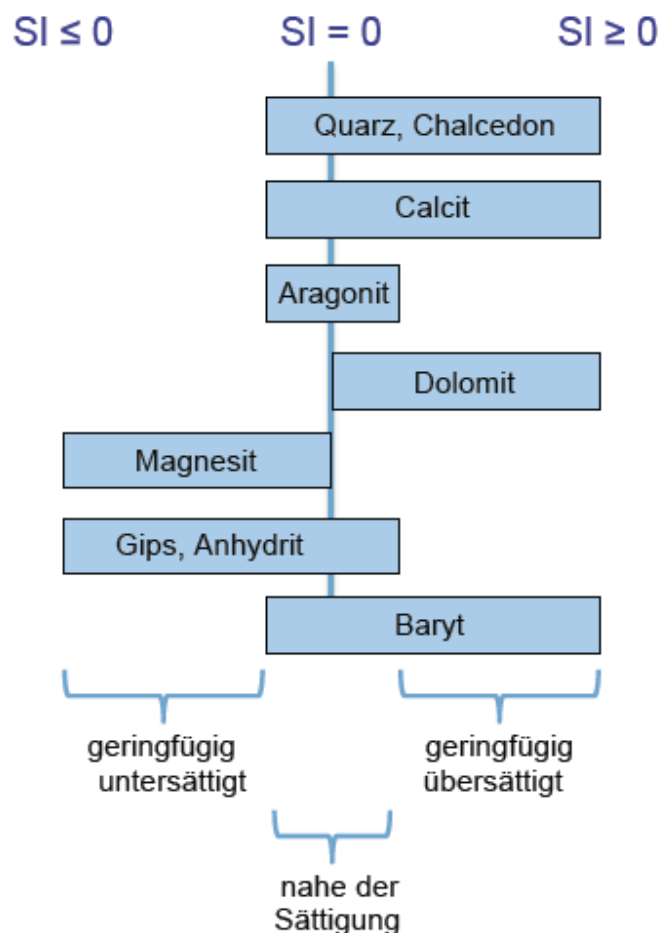


Abb. 25: Schematische Darstellung der Sättigungszustände der Wässer bezüglich ausgewählter Minerale im Oberen Muschelkalk Aquifer des Oberrheingrabens und des SW-deutschen Molassebeckens.

#### 6.4.5 Wechselwirkung von Hydrochemie und Hydraulik

In allen geothermischen Nutzhorizonten des Oberrheingrabens konnte eine gewisse Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit (T/H) mit zunehmender Tiefe festgestellt werden. Die Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe war für gewisse Aquifere stärker für

andere schwächer ausgeprägt (Abschn. 6.2.1). In Abschnitt 6.4.1 wurde gezeigt, dass die Gesamtmineralisation (TDS) mit zunehmender Tiefe ansteigt. Aus diesem Grund wurden im Projekt GeoTool untersucht, ob sich diese Ergebnisse kombinieren lassen.

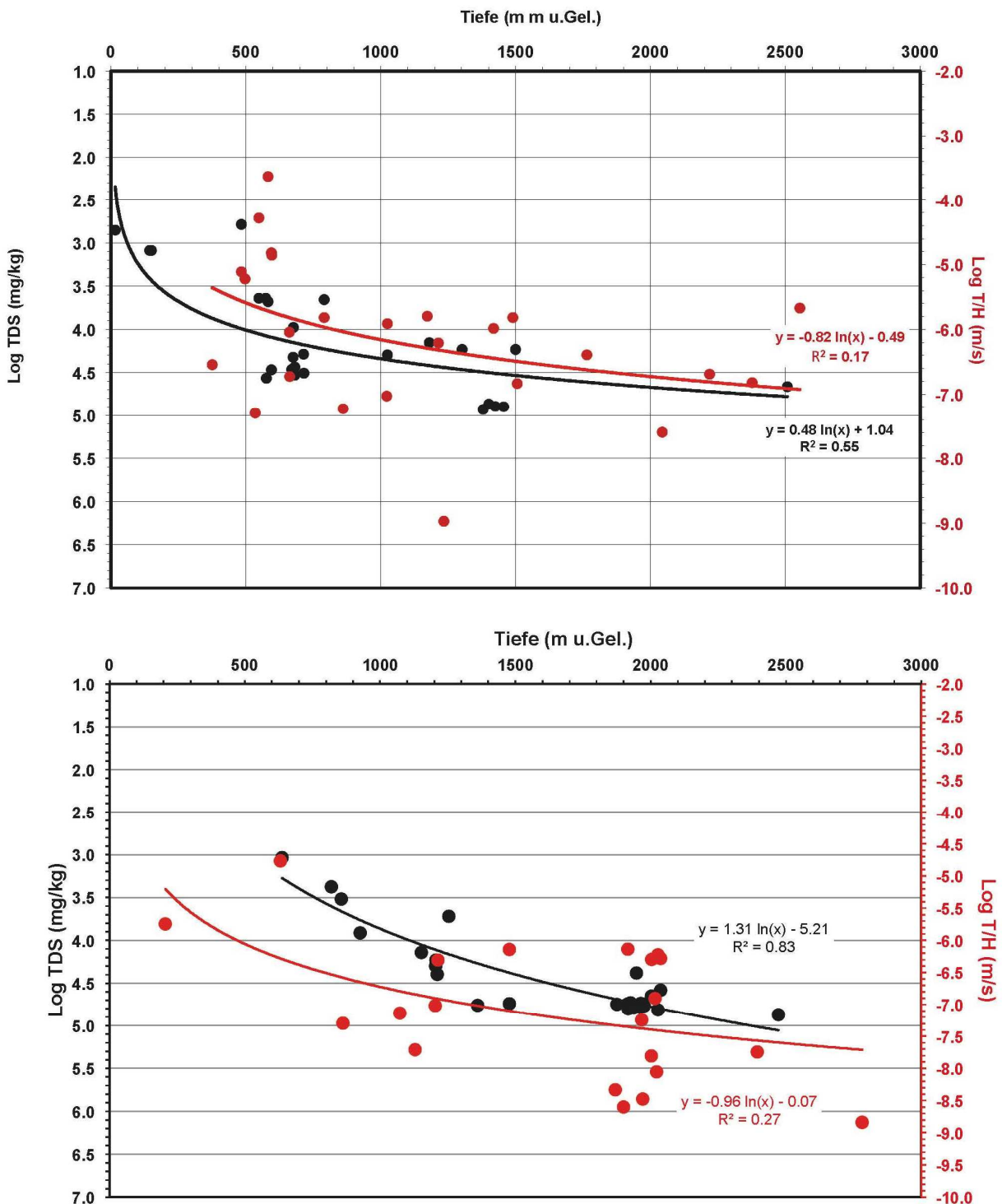


Abb. 26: Durchlässigkeit (T/H) und Gesamtlösungsinhalt (TDS) in Abhängigkeit von der Tiefenlage des Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben (oben) und im Molassebecken (unten).

Am Beispiel des Oeren Muschelkalks im Oberrheingraben und Molassebecken wurden die Gesamtmineralisation (als log TDS) und die Gebirgsdurchlässigkeit (als log T/H) gegen die

Tiefe (m u.Gel.) einander gegenübergestellt. Abbildung 26 zeigt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit im Oberen Muschelkalk-Aquifer sowohl im Oberrheingraben als auch im Molassebecken mit zunehmender Tiefe abnimmt. Allerdings ist die Abnahme im Oberrheingraben unterhalb von etwa 600 m im Vergleich zum Molassebecken sehr gering. Sowohl im Oberrheingraben als auch im Molassebecken ist der Gesamtlösungsinhalt (TDS) an die Durchlässigkeit gekoppelt. Mit zunehmender Tiefe nehmen im Oberen Muschelkalk Aquifer die Durchlässigkeit ab und TDS entsprechend zu. Die für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Oberrheingraben und Molassebecken ermittelten Algorithmen sind jeweils in Abbildung 26 eingetragen.

## 7. Verwertbarkeit

Das vorliegende Vorhaben ist im Themenkomplex „Entwicklung verbesserter Methoden zur Erkundung geothermischer Ressourcen“ angesiedelt und leistet einen Beitrag zum Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (vgl Bundesanzeiger Nr. 186 vom 5. Dezember 2008, Punkt 2.4, S. 4354).

Das Projekt befasst sich mit der Entwicklung von Methoden zur Abschätzung der für ein geothermisches Projekt relevanten Parameter des tieferen Untergrunds. Aus Gründen der Planbarkeit und zur gesicherten Abschätzung der Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen ist der Erkenntnisbedarf in der Wirtschaft in Bezug auf die Umsetzung hydrogeothermischer Projekte sehr groß. Das Regierungspräsidium Freiburg (RPF) hat daher zum einen im Projekt GeoTool den hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Datenbestand für alle geothermische Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken zum Teil neu erhoben, validiert und ausgewertet, zum Teil aber auch aufbauend auf dem Projekt GeotIS (Fördernr.: 0327542) ergänzt und vervollständigt. Zudem wurden im Projekt GeoTool geologisch-geothermischer Algorithmen für praxisgerechte Lösungen zur standortbezogenen Anlagenprojektierung entwickelt. Dies betrifft sowohl geologische Grundlagendaten als auch geothermische Informationen (Abschn. 4.5, 4.6, 6.1, 6.3) sowie detaillierte hydraulische und hydrochemische Sachverhalte (Abschn. 6.2, 6.3, 6.4) Anhand von Grundlagendaten wurde somit ein statistisch basiertes Prognosetool, bestehend aus mehreren Einzelalgorithmen, für alle geothermisch relevanten Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken separat entwickelt. Damit können die für ein beliebiges geothermisches Projekt relevanten Größen (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit, Aquifertemperatur und Hydrochemie der Wässer) prognostiziert werden. Die oben genannten Größen sind Basisinformationen für ein geothermisches Projekt und Voraussetzung für eine gezielte Verringerung der Risiken bei der Erschließung geothermischer Quellen, d.h. sie dienen der Reduzierung des Fündigkeitsrisikos und verringern so einen potentiellen wirtschaftlichen Schaden.

Die wesentlichen Projektergebnisse für das geothermische Prognosetool sind auf der Homepage des Regierungspräsidiums Freiburg eingestellt (<http://www.rp.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1337770/index.html>) und damit für jeden frei zugänglich. Zudem wurden zur Information der Geothermiebranche Publikationen erstellt und Vorträge gehalten sowie Messestände organisiert. Die Darstellung der Projektergebnisse erfolgte unter Wahrung der Interessen der Kohlenwasserstoff-Firmen und ist in der vorliegenden Form mit dem WEG abgestimmt. Die im Internet eingestellte Fachanwendung zielt i.w. auf Nutzer aus der Geothermiebranche, d. h. geowissenschaftliche Grundkenntnisse werden erwartet. Für die einzelnen

geothermischen Nutzhorizonte können mit „GeoTool“ die für die Projektierung einer Geothermieanlage benötigten Grunddaten, wie chemische Eigenschaften und Temperatur des Thermalwassers, Durchlässigkeit des Nutzhorizontes (und damit Hinweise auf mögliche Förderraten), geologische und hydrogeologische Eigenschaften des Nutzhorizontes erhoben werden. Daneben werden die physikalischen und thermischen Eigenschaften von Wasser zur Ermittlung der thermischen Leistung bereit gestellt. Es war ein großes Anliegen, für eine hohe Transparenz bezüglich Erhebung, Auswertung und Bestimmung der einzelnen Basisdaten zu sorgen. Daher sind für die geothermischen Grunddaten nicht nur Werte, sondern es sind detaillierte Berichte hinterlegt, die dem Nutzer gestatten, die Güte einzelner Parameter zu beurteilen.

## **8. Fortschritt Anderer**

Im Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“ wurden durch die Staatlichen Geologischen Dienste des Bundes und der Länder Informationen über unterirdische Speicherregionen für CO<sub>2</sub> zusammengestellt. Im Rahmen des Projekts „Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie“ des LIAG und der BGR (BMU-Förderkennzeichen: 0325257A und 0325257B) wurde ein Geothermie-Atlas zur Prüfung von Nutzungskonkurrenzen zwischen CO<sub>2</sub>-Einlagerung und Geothermie erstellt. Im INTERREG IV-Projekt „Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“ (GeORG) wurde vom Regierungspräsidium Freiburg, dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, dem Bureau de Recherches Géologiques et Minières sowie der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft ein 3D-Modell der Untergrundstruktur im Oberrheingraben erarbeitet. Die im Rahmen des Projektes GeoTool erarbeiteten Grundlegendaten standen diesen Projekten zur Verfügung.

## **9. Publikationen und Vorträge**

In diesem Abschnitt sind sämtliche Publikationen, Berichte, Poster, Vorträge sowie sonstige Arten der Öffentlichkeitsarbeit, die im Zuge des Projektes GeoTool erfolgten, chronologisch zusammengestellt. An erster Stelle ist jedoch die Einrichtung eines Informationsportals auf der Homepage des RPF zu nennen (<http://www.rp.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1337770/index.html>).

### **9.1 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften**

JODOCY, M. & STOBER, I. (2010): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den baden-württembergischen Teil des nördlichen und mittleren Oberrheingrabens. – Erdöl Erdgas Kohle, 126, 2; 68 - 76.

STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - Eine Basisinformation für geothermische Nutzungssysteme. – Z. geol. Wiss., 39, 1, 39 - 57.

JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken. – Erdöl Erdgas Kohle, 127, 1; 20 - 27.

- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Geothermisches Prognosetool für Baden-Württemberg (GeoTool). – Grundwasser, 16; 54 - 56.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Geothermische Verhältnisse südlich des Kaiserstuhls - Das Hartheimer Becken im südlichen Oberrheingraben. – Grundwasser, 16, 2; 113 - 123.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – Z. geol. Wiss., 39, 3/4; 161 - 172.
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K. & SCHULZ, R. (2011): Tiefe Geothermie - Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), 84 S.; Berlin.
- BIRNER, J., FRITZER, T., JODOCY, M., SAVVATIS, A., SCHNEIDER, M. & STOBER, I. (2012): Hydraulische Eigenschaften des Malmaquifers im Süddeutschen Molassebecken und ihre Bedeutung für die geothermische Erschließung. – Z. geol. Wiss., 40, 2/3; 133 - 156.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2012): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - Am Beispiel des tief liegenden Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken. – Z. geol. Wiss., 40, 1; 1 - 18.
- AGEMAR, T., BRUNKEN, J., JODOCY, M., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & STOBER, I. (2013): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (im Druck).
- STOBER, I., JODOCY, M., BURISCH, M., PERSON, R. (2013): Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens.- Grundwasser (im Druck).

## **9.2 Publikationen in populärwissenschaftlichen Zeitschriften**

- STOBER, I. & JODOCY, M. (2010): Geothermisches Prognosetool für Baden-Württemberg (GeoTool). – RP-Magazin, 4; S. 25.

## **9.3 Tagungsstände**

Stand zum Projekt GeotIS und GeoTool am Tag der offenen Tür des Regierungspräsidiums Freiburg am 26.07.2009 in Freiburg.

Stand des RP Freiburg auf der GeoTHERM – expo & congress vom 25. - 26.02.2010 in Offenburg: Vorstellung des Projektes GeoTool.

Stand des RP Freiburg auf der GeoTHERM – expo & congress vom 24. - 25.02.2011 in Offenburg: Vorstellung des Projektes GeoTool.

Stand des RP Freiburg auf der GeoTHERM – expo & congress vom 01. - 02.03.2012 in Offenburg: Vorstellung des Projektes GeoTool.

Stand zum Projekt GeoTool am Tag der offenen Tür des Regierungspräsidiums Freiburg am 26.07.2012 in Freiburg.

Stand des RP Freiburg auf der GeoTHERM – expo & congress vom 28.02. - 01.03.2013 in Offenburg: Vorstellung des Projektes GeoTool.

#### **9.4 Vorträge und Abstracts**

STOBER, I. & JODOCY, M. (2010): Hydrogeologie der Tiefengrundwasserleiter im Oberrheingraben. – Vortrag und Tagungsband GeoTHERM – expo & congress, 25. - 26.02.2010, Offenburg, S. 16.

STOBER, I. & JODOCY, M. (2010): Hydrogeologie der geothermischen Nutzhorizonte im westlichen Molassebecken. – Vortrag GeoDarmstadt, 13.10.2010, Darmstadt.

STOBER, I. & JODOCY, M. (2010): Hydrogeologie der geothermischen Nutzhorizonte im westlichen Molassebecken.- Schriftenreihe der DGG – GeoDarmstadt2010, Heft 68, S. 536-537, Frankfurt a.M. & Darmstadt.

STOBER, I. & JODOCY, M. (2010): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im westlichen Teil des Molassebeckens. – Vortrag und Tagungsband Geothermiekongress 2010, 17. – 19. November 2010, CD-ROM; Karlsruhe.

JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg. – Vortrag und Tagungsband GeoTHERM – expo & congress, 24. - 25.02.2011, Offenburg, S. 20.

STOBER, I. (2011): Hydrothermale Reservoirs im mittleren und südlichen Oberrheingraben. – Vortrag Tiefengeothermie-Forum 2011, 15. September 2011; Darmstadt.

STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Entwicklung eines geothermischen Prognosetools für Baden-Württemberg (GeoTool) – Projektstand. – Vortrag und Tagungsband Geothermiekongress 2010, 15. – 17. November 2011, CD-ROM; Bochum.

STOBER, I. (2012): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im Oberrheingraben.- Tiefengeothermie Géothermie profonde, Séminaire transrhénan 24.05.2012, SPPPI (Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles de l'agglomération de Strasbourg-Kehl), Strasbourg.

STOBER, I. (2012): Geothermische Nutzhorizonte im Oberrheingraben.- VDI- Vortragsreihe, KTI Campus Nord am 23.10.2012, Karlsruhe.

STOBER, I. (2013): Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des südwestdeutschen Molassebeckens.- Vortrag und Tagungsband GeoTHERM – expo & congress, 28.02.-01.03.2013, Offenburg.



## 9.5 Poster und Abstracts

- JODOCY, M. & STOBER, I. (2009): Geothermische Nutzhorizonte im baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens. – Poster und Tagungsband Geothermiekongress 2009, 17. – 19. November 2009; Bochum.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im Oberrheingraben. – Poster Tag der offenen Tür RP Freiburg, 26.07.2009; Freiburg.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2010): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken. – Poster und Tagungsband Geothermiekongress 2010, 17. – 19. November 2010; Karlsruhe.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des süddeutschen Molassebeckens. – Poster und Tagungsband Geothermiekongress 2011, 15. – 17. November 2011; CD-ROM; Bochum.
- AGEMAR, T., BRUNKEN, J., JODOCY, M. & STOBER, I. (2012): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. – Poster Geothermiekongress 2012, 13. – 15. November 2012; Karlsruhe.

## 9.6 Berichte (unveröffentlicht)

- JODOCY, M. & STOBER, I. (2010): Erfassung von Temperaturdaten für die baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und Süddeutschen Molassebeckens. – Bericht RPF: 3 S., CD-ROM als Anlage; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2010): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken. – Bericht RPF: 18 S., 12 Abb.; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2010): Digitalisierung reflexionsseismischer Sektionen aus dem Bereich des Südwestdeutschen Molassebecken. – Bericht RPF: 3 S., 1 Abb., DVD-ROM als Anlage; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Auswertung hydraulischer Testdaten aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens. – Bericht RPF: 9 S., 4 Abb., 129 Anl.; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Erhebung qualitativer hydraulischer Informationen im Oberrheingraben und Molassebecken (Baden-Württemberg) - Oberer Muschelkalk-Aquifer. – Bericht RPF: 2 S., 2 Abb., 189 Anlagen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der ExxonMobil Production Deutschland GmbH im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 3 S., 1 Anlage; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der RWE Dea AG im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 4 S., 3 Anlagen; Freiburg i. Br.

- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der Wintershall Holding GmbH im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 4 S., 2 Anlagen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Physikalische Eigenschaften von Wasser, Schwankungen im Zusammenhang mit Geothermiebohrungen und Auswirkungen auf die thermische Leistung und die Aquiferparameter. – Bericht RPF: 15 S., 14 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der ExxonMobil Production Deutschland GmbH im Südwestdeutschen Molassebecken. – Bericht RPF: 4 S., 4 Anlagen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der GDF SUEZ E&P Deutschland GmbH im Südwestdeutschen Molassebecken. – Bericht RPF: 4 S., 4 Anlagen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Geohydraulische Daten aus KW-Bohrungen der Wintershall Holding GmbH im Südwestdeutschen Molassebecken. – Bericht RPF: 4 S., 12 Anlagen; Freiburg i. Br.
- AGEMAR, T., BRUNKEN, J., JODOCY, M., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & STOBER, I. (2011): Neue Temperaturkarten für verschiedene Tiefen in Baden-Württemberg. - Bericht LIAG & RPF: 5 S., 6 Anlagen; Freiburg i. Br. / Hannover.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2011): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - Am Beispiel des tief liegenden Oberen Muschelkalk - Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken. – Bericht RPF: 24 S., 7 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2012): Mächtigkeitsverteilung geothermischer Zielhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken. – Bericht RPF: 5 S., 1 Abbildungen, 6 Anlagen; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2012): Verbreitung von Riffstrukturen im Oberjura des Südwestdeutschen Molassebeckens (Baden-Württemberg). – Bericht RPF: 14 S., 2 Abbildungen, 1 Anlage; Freiburg i. Br.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2012): Kurzer Überblick über die Formationen des Tertiärs im Oberrheingraben im Hinblick auf hydrothermale Nutzungen. – Bericht RPF: 5 S., 1 Tabelle; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M., BURISCH, M. & PERSON, R. (2012): Tiefenwässer im Hauptrogenstein-Aquifer des Oberrheingrabens. – Bericht RPF: 12 S., 6 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2012): Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens. – Bericht RPF: 15 S., 11 Abbildungen; Freiburg i. Br.

- STOBER, I. & JODOCY, M. (2012): Tiefenwässer im Buntsandstein-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens. – Bericht RPF: 13 S., 8 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M., BURISCH, M. & PERSON, R. (2012): Tiefenwässer im Ober-jura-Aquifer und in den tertiären Bausteinschichten des Südwestdeutschen Molassebeckens. – Bericht RPF: 14 S., 9 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2013): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für die tief liegenden tertiären Schichten im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 18 S., 7 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2013): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für den tief liegenden Hauptrogenstein-Aquifer im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 21 S., 7 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2013): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für den tief liegenden Buntsandstein-Aquifer im Oberrheingraben. – Bericht RPF: 20 S., 7 Abbildungen; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2013): Durchlässigkeitsverhältnisse im tief liegenden Oberjura und in den tertiären Bausteinschichten des westlichen Molassebeckens - Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren. – Bericht RPF: 36 S., 13 Abbildungen, 1 Anlage; Freiburg i. Br.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2013): Durchlässigkeiten und Hydrochemie des Rotliegenden und Kristallinen Grundgebirges im Oberrheingraben und Molassebecken. – Bericht RPF: 6 S., 5 Abbildungen, 1 Anlage; Freiburg i. Br.

## **9.7 Zwischenberichte (unveröffentlicht)**

- STOBER, I. (2009): Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg (GeoTool) – 1. Zwischenbericht, Berichtszeitraum 01.06. bis 31.12.2009. - Bericht RPF; Freiburg i. Br.
- STOBER, I. (2011): Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg (GeoTool) – 2. Zwischenbericht, Berichtszeitraum 01.01. bis 31.12.2010. - Bericht RPF; Freiburg i. Br.
- STOBER, I. (2012): Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg (GeoTool) – 3. Zwischenbericht, Berichtszeitraum 01.01. bis 31.12.2011. - Bericht RPF; Freiburg i. Br.
- STOBER, I. (2013): Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg (GeoTool) – 4. Zwischenbericht, Berichtszeitraum 01.01. bis 31.12.2012. - Bericht RPF; Freiburg i. Br.

## 10. Im Endbericht zitierte Literatur

- AGEMAR, T., BRUNKEN, J., JODOCY, M., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & STOBER, I. (2013): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (im Druck).
- BEAR, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*.- McGraw-Hill, 567 p., New York, London.
- BERTLEFF, B. W. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. – Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 12; Freiburg i.Br.
- BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. – Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 30: 27 – 116; Freiburg i.Br.
- BIRNER, J., FRITZER, T., JODOCY, M., SAVVATIS, A., SCHNEIDER, M. & STOBER, I. (2012): Hydraulische Eigenschaften des Malmaquifers im Süddeutschen Molassebecken und ihre Bedeutung für die geothermische Erschließung. – Z. geol. Wiss., 40, 2/3; 133 - 156.
- BLACK, J. H. (1985): The Interpretation of Slug Tests in fissured Rocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 18, 2, S. 161 – 171.
- BÖHM, F., SCHWARZ, F. & KRAUS, O. (2007): 2D-seismische Untersuchungen für das Geothermieprojekt Unterföhring bei München. Interpretation einer Riffstruktur im Malm als bevorzugtes Erschließungsziel für Thermalwasser.- *Geothermische Energie*, 55, 14 – 15.
- CARLÉ, W. (1975): *Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa*. - Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 643 S., Stuttgart.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES CEC (1979): *Geothermische Synthese des Oberrheingrabens*. - BRGM Alsace & Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Strasbourg, Freiburg i. Br.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES CEC (1981): *Geothermische Bestandsaufnahme des Oberrheingrabens*. - Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.
- COOPER, H.H. & 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.
- COOPER, H. H., JR., BREDEHOEFT, J. D., & PAPADOPULOS, I. S. (1967): Response of a finite-diameter Well to an instantaneous Charge of Water. *Water Resources Research*, 3, 1, S. 263 – 269.

- DVGW (1997): Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung.- DVGW (Deutscher Verband des Gas- und Wasserwerks) Regelwerk, Technische Regeln Arbeitsblatt W 111, 37 S., Bonn.
- FOURNIER, R.O. (1977): Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. - *Geothermics*, 5, 41 – 50, Amsterdam/NL.
- GEYER, O.F., GWINNER, M.P. (1991): *Geologie von Baden-Württemberg*. - 4. Auflage, Springer Verlag, 482 S., Stuttgart.
- GRAF, W., TIMBORN, P. & UFRECHT, W. (1994): Isotopengeochemische Charakterisierung des Karstgrundwassers im Oberen Muschelkalk im Großraum Stuttgart unter besonderer Berücksichtigung von Sauerstoff-18 und Schwefel-34. - In: Ufrecht, W. & Einsele, G. (Hrsg.): *Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart*. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, H. 2/1994, S. 75-115. Stuttgart.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2008): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland – Landesteil Baden-Württemberg.- *Erdöl-Erdgas-Kohle*, 124 Jg., H. 10, 10 Abb., S. 386-393, Urban-Verlag, Hamburg/Wien.
- HAUBER, L. (1991): Ergebnisse der Geothermiebohrungen Riehen 1 und 2 sowie Reinach im Südosten des Rheingrabens. - *Geol. Jb.*, E 48, 167-184, Hannover.
- HE, K., STOBER, I. & BUCHER, K. (1999): Chemical Evolution of Thermal Waters from Limestone Aquifers of the Southern Upper Rhine Valley. - *Applied Geochemistry*, 14, 223 – 235, Exeter/UK.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2009): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den südwestlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160, 4; 359 - 366.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2011): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken.- *Erdöl Erdgas Kohle*, 127. Jg., H.1, S. 20-27., Hamburg.
- KRUSEMANN, G.P. & DE RIDDER, N.A. (1994): *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. – Publication 47, International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI, Second Edition (Completely Revised), 377 S.; Wageningen, Netherlands.
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER H. (1996): Jura. - In: Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg.): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000* (4. Aufl.): 90-111; München.
- MÜNCH, W., SISTENICH, H. P., BÜCKER, CH. & BLANKE, T. (2005): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung im Oberrheingraben. Eine Analyse der geologischen Bedingungen, der Bohr- und Fördertechnik sowie der Kraftwerkstechnik und Wirtschaftlichkeit. - *VGB PowerTech*, 10, 1 – 9.
- NAGRA (1989): Sondierbohrung Weiach, Untersuchungsbericht. - *Technischer Bericht NTB 88-08*, 183 S., Baden/Schweiz.

- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht. - Technischer Bericht NTB 00-01, 288 S., Wettingen/Schweiz.
- PAPADOPOULOS, S. S., BREDEHOEFT, J. D., & COOPER, H. H., JR. (1973): On the Analysis of 'Slug Test' Data. *Water Resources Research*, 9, 4, S. 1087 – 1089.
- PARKHURST, D.L., THORSTENSON, D.C., PLUMMER, L.N. (1980): PHREEQE – a computer program for geochemical calculations. - U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations 80 - 96, 210 S., Boulder/USA.
- PK Tiefe Geothermie (2008): Nutzungen der Geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren.- Internetseite der staatlich geologischen Dienste [www.infogeo.de](http://www.infogeo.de), 38 S.
- PRESTEL, R. (1990): Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgestein und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. - Dissertation, Universität Stuttgart.
- 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.
- SASS, I. & HOPPE, A. (2011): Forschungs- und Entwicklungsprojekt "3-D-Modell der geothermischen Tiefenpotentiale von Hessen".- Abschlussbericht Technische Universität Darmstadt, 218 S., Wiesbaden.
- SCHÄDEL, K. (1962): Die fossilen Schwammriffe der Schwäbischen Alb. – *Die Natur*, 70 (3–4 + 5–6): 97–102; Schwäbisch Hall (Schwend).
- SCHLOZ, W. & STOBER, I. (2006): Mineral-, Heil- und Thermalwässer, Solen und Säuerlinge in Baden-Württemberg. - LGRB-Fachbericht 1 (überarbeitete Fassung), 20 S., Freiburg i. Br..
- SCHULZ, R. (2009): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland.- Gemeinsamer Endbericht des Projektes (Förderkennzeichen: 0327542), Hannover
- STMWIVT (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie) (2004): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung, 104 S.; München (Kastner).
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- *Geologisches Jahrbuch*, Reihe C, Heft 42, 57 Abb., 8 Tab., 38 Abb. i. Anh., 204 S., Hannover.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Ferdinand Enke Verlag, 81 Abb., 16 Tab., 191 S., Stuttgart.
- STOBER, I. & VILLINGER, E. (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem Baden-

Württembergischen Molassebecken.- Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, H. 37, S. 7-24, Freiburg i.Br.

- STOBER, I. & BUCHER, K. (2000): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges – unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes. - Grundwasser, 3, 125 – 140, Berlin Heidelberg.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im baden-württembergischen und französischen Teil des Oberrheingrabens. – Grundwasser, 14, 127-137, Berlin Heidelberg.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011a): Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - eine Basisinformation für geothermische Nutzungssysteme. – Z. geol. Wiss., 39, 1, S. 39 - 57.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011b): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens.- Z. geol. Wiss., Bd. 39, H. 3/4, S. 161-172.
- STOBER, I., JODOCY, M., HINTERSBERGER, B. (2012): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - am Beispiel des tief liegenden Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken.- Z. geol. Wiss., 40 (1), S. 1-18, Berlin.
- STOBER, I., JODOCY, M., BURISCH, M., PERSON, R. (2013): Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens.- Grundwasser (im Druck).
- VILLINGER, E. (1988): Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken. – Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. und -Ing., **54** (127): 41-59, Losone.
- WALTHER, J.V. & H.C. HELGESON (1977): Calculation of the thermodynamic properties of aqueous silica and the solubility of quartz and its polymorphs at high pressures and temperatures. - American Journal of Science, 277, 1315 – 1351, Stanford/USA.
- WOLERY, T. J. (1979): Calculation of Chemical Equilibrium between Aqueous Solutions and Minerals: The EQ3/6 Software Package: UCRL-52658. - Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.

## Dank

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt im Themenbereich „Tiefe Geothermie“ die Projekte "Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland“ sowie „Erstellung eines geothermischen Prognosetools“ (Fördernummer: 0327542 und 0325136). Dem Regierungspräsidium Freiburg (RPF) wurde dadurch die Möglichkeit zur weiteren Untersuchung der potentiellen geothermischen Nutzhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken gegeben. Wir bedanken uns dafür recht herzlich beim BMU. Dem Service Géologique Régional Alsace des BRGM Strasbourg sowie den Kohlenwasserstofffirmen (ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Gaz de France Suez Produktion Exploration Deutschland GmbH, RWE Dea AG, Wintershall Holding GmbH) vielen Dank für die Erlaubnis zur Dateneinsicht und Datennutzung. Dem Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgas (WEG) recht herzlichen Dank für die Unterstützung.

## Anlagen - Inhaltsverzeichnis CD-ROM

### Anhang

- 1 - Temperaturdaten Baden-Württemberg  
Erfassung von Temperaturdaten für die baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und Süddeutschen Molassebeckens.
- 2 - Reflexionsseismik Molassebecken  
Digitalisierung reflexionsseismischer Sektionen aus dem Bereich des Südwestdeutschen Molassebeckens
- 3 - Hydraulik BRGM Oberrheingraben  
Auswertung hydraulischer Testdaten aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens
- 4 - Mächtigkeiten Nutzhorizonte Baden-Württemberg  
Mächtigkeitsverteilung geothermischer Zielhorizonte im Oberrheingraben und Molassebecken
- 5 - Riffstrukturen Oberjura  
Verbreitung von Riffstrukturen in Oberjura des Südwestdeutschen Molassebeckens (Baden-Württemberg)

### Homepage

GeoTool Homepage: pdf-Version der Projekthomepage.

#### **Downloads**

- 1 - Definition Fündigkeitsrisiko
- 2 - Dichte von Wasser  
Abhängigkeit der Dichte reinen Wassers von Druck und Temperatur, nach Wagner & Kretschmar (2008).
- 3 - Spezifische Wärmekapazität von Wasser  
Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität reinen Wassers von Druck und Temperatur, nach Wagner & Kretschmar (2008).
- 4 - Physikalische Eigenschaften von Wasser  
Physikalische Eigenschaften von Wasser, Schwankungen im Zusammenhang mit Geothermiebohrungen und Auswirkungen auf die thermische Leistung und die Aquiferparameter.



- 5 - Temperaturkarten Baden-Württemberg  
Neue Temperaturkarten für verschiedene Tiefen in Baden-Württemberg.
- 6 - Reflexionsseismik Oberrheingraben Baden-Württemberg  
Karte mit der Lage der digitalisierten reflexionsseismischen Daten im Oberrheingraben.
- 7 - Reflexionsseismik Molassebecken Baden-Württemberg  
Karte mit der Lage der digitalisierten reflexionsseismischen Daten im Oberrheingraben.
- 8 - Strukturkarte Oberrheingraben  
Übersichtskarte zur Lage tektonischer Großstrukturen im Oberrheingraben.
- 9 - Poroperm-Daten Baden-Württemberg  
Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken.
- 10a - Charakterisierung Tertiär  
Kurzer Überblick über die Formationen des Tertiärs im Oberrheingraben im Hinblick auf hydrothermale Nutzungen.
- 10b - Übersichtstabelle Tertiär  
Interne Arbeitstabelle der Projekte "Geothermisches Informationssystem für Deutschland" (GeotIS) und "Geothermisches Prognosetool Baden-Württemberg" (GeoTool): Gegenüberstellungen zur Nomenklatur des Tertiärs im Oberrheingraben.
- 11 - Hydrochemie Tertiär  
Tiefenwässer im Tertiär des Oberrheingrabens.
- 12 - Hydrochemie Hauptrogenstein  
Tiefenwässer im Hauptrogenstein-Aquifer des Oberrheingrabens.
- 13 - Hydrochemie Oberer Muschelkalk-Aquifer  
Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk Aquifer des Oberrheingrabens und des südwestdeutschen Molassebeckens.
- 14 - Hydrochemie Buntsandstein  
Tiefenwässer im Buntsandstein Aquifer des Oberrheingrabens und des südwestdeutschen Molassebeckens.
- 15 - Hydrochemie Bausteinschichten und Oberjura  
Tiefenwässer im Oberjura-Aquifer und in den tertiären Bausteinschichten des südwestdeutschen Molassebeckens.
- 16 - Hydraulik Tertiär  
Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für die tief liegenden tertiären Schichten im Oberrheingraben.
- 17 - Hydraulik Hauptrogenstein  
Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für den tief liegenden Hauptrogenstein-Aquifer im Oberrheingraben.
- 18 - Hydraulik Oberer Muschelkalk-Aquifer  
Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - Am Beispiel des Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken.
- 19 - Potenzialverteilung Oberer Muschelkalk-Aquifer Molassebecken  
Karte der Grundwassergleichen für den Oberen Muschelkalk-Aquifer im Molassebecken.
- 20 - Hydraulik Buntsandstein  
Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren für den tief liegenden Buntsandstein-Aquifer im Oberrheingraben.
- 21 - Hydraulik Bausteinschichten und Oberjura

- Durchlässigkeitsverhältnisse im tief liegenden Oberjura und in den tertiären Bausteinschichten des westlichen Molassebeckens - Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren.
- 22 - Potenzialverteilung Oberjura-Aquifer Molassebecken  
Karte der Grundwassergleichen für den Oberjura-Aquifer im Molassebecken.
- 23 - Hydraulik & Hydrochemie Rotliegend und Kristallin  
Durchlässigkeiten und Hydrochemie des Rotliegenden und Kristallinen Grundgebirges im Oberrheingraben und Molassebecken.

### ***Profilschnitte Molassebecken***

Übersichtskarte Schnitte MOL: Lage der geologisch-geothermischen Profilschnitte im Molassebecken (Baden-Württemberg).

- MOL L1 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L1 (Molassebecken)  
 MOL L2 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L1 (Molassebecken)  
 MOL L3 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L1 (Molassebecken)  
 MOL Q 1a - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q1a (Molassebecken)  
 MOL Q 1b - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q1b (Molassebecken)  
 MOL Q 1c - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q1c (Molassebecken)  
 MOL Q 2a - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q2a (Molassebecken)  
 MOL Q 2b - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q2b (Molassebecken)  
 MOL Q 3a - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q3a (Molassebecken)  
 MOL Q 3b - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q3a (Molassebecken)

### ***Profilschnitte Oberrheingraben***

Übersichtskarte Schnitte Oberrheingraben: Lage der geologisch-geothermischen Profilschnitte im Oberrheingraben (Baden-Württemberg).

- ORG L1 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L1 (Oberrheingraben)  
 ORG L2 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L2 (Oberrheingraben)  
 ORG L3 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L3 (Oberrheingraben)  
 ORG L4 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L4 (Oberrheingraben)  
 ORG L5 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L5 (Oberrheingraben)  
 ORG L6 - Geologisch-geothermischer Längsschnitt L6 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 1a - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q1a (Oberrheingraben)  
 ORG Q 1b - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q1a (Oberrheingraben)  
 ORG Q 2 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q2 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 3 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q3 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 4 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q4 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 5 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q5 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 6 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q6 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 7 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q7 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 8 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q8 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 9 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q9 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 10 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q10 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 11 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q11 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 12 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q12 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 13 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q13 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 14 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q14 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 15 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q15 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 16 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q16 (Oberrheingraben)  
 ORG Q 17 - Geologisch-geothermischer Querschnitt Q17 (Oberrheingraben)