

**Thermohydraulik des kristallinen Grundgebirges am  
Beispiel des östlichen Oberrheingrabens**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
an der Fakultät für Bauingenieurwesen,  
Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Karlsruhe (TH)  
genehmigte  
DISSERTATION

von  
**Cindy Giersch**  
aus Leipzig

Karlsruhe 2005

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.2005  
Referent: Prof. Dr. Heinz Hötzl  
Korreferentin: Prof. Dr. Ingrid Stober



---

## KURZFASSUNG

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die vergleichende Untersuchung ausgewählter Thermalwasservorkommen am östlichen Rand des Oberrheingraben. Die natürlich austretenden und erbohrten Thermalwässer entstammen den kristallinen Gesteinen des Schwarzwaldes, die von infiltrierenden Niederschlagswässern durchströmt werden. Die Thermalwasseraustritte geben daher durch ihre Beschaffenheit Hinweise auf die hydrogeologischen und geothermischen Verhältnisse im kristallinen Untergrund.

Die Untersuchung der Standorte Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler wird durch Bilanzierungen mittels numerischer Modellberechnungen unterstützt. Jedes Einzugsgebiet wird gesondert in ein dreidimensionales, voll gekoppeltes Strömungs- und Wärmetransportmodell umgesetzt. Die Vorgehensweise bei der Erstellung der Modelle ist dabei weitestgehend analog, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zu erlangen.

Die Quellen und Bohrungen von Baden-Baden sind die heißesten Thermalwasseraustritte Baden-Württembergs. Sie werden im numerischen Modell durch einen Quellknoten repräsentiert, der oberhalb einer Störungszone mit gut durchlässigem Aufstiegsbereich den Grundwasseraustritt ermöglicht. Das Thermalwasser erreicht nach einer mittleren Verweilzeit von etwa 11.000 Jahren die Erdoberfläche. Die ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten des Kristallins, das hier hauptsächlich durch Granite ausgemacht wird, liegen zwischen  $1,9 \cdot 10^{-8}$  und  $1,3 \cdot 10^{-10}$  m/s. Sie nehmen mit der Tiefe leicht ab.

Bei Ohlsbach erreichen aufsteigende Tiefenwässer die quartären Talsedimente und strömen innerhalb dieser in Richtung Rhein ab. Das numerische Modell ist am nordwestlichen Rand für diesen Abstrom geöffnet. In diesem Modell sind zwei wasserführende Störungszonen mit einem gut durchlässigen Kreuzungsbereich umgesetzt. Die mittlere Verweilzeit ergibt sich zu 5.000-7.500 Jahren. Die hydraulischen Durchlässigkeiten nehmen mit der Tiefe stärker ab als im Baden-Badener Modell, was auf den dominierenden Anteil von Gneis mit seinen hydrogeologischen Eigenschaften zurückgeführt werden kann.

In Badenweiler entspringen drei natürliche Quellen. Zwei Bohrungen erweitern das Thermalwasserdargebot. In diesem Modell ist der nordwestliche Modellrand für Abstrom geöffnet, und ein Quellknoten ermöglicht den Grundwasseraustritt an der Erdoberfläche. Der Aufstieg wird durch eine gut durchlässige Aufstiegszone repräsentiert. Die mittlere Verweilzeit beträgt hier nur rund 1.100 Jahre. Das Einzugsgebiet und die Zirkulationstiefe sind kleiner als in den beiden übrigen Modellen. Die hydraulische Durchlässigkeit nimmt

entsprechend der vorherrschenden Granite und der geringen Modelltiefe mit der Tiefe kaum ab.

Allen drei numerischen Modellen ist gemeinsam, basierend auf der vorliegenden Datengrundlage, eine plausible Lösung der komplexen hydrogeologischen Thematik darzustellen. Sie ermöglichen die Quantifizierung bisher nur qualitativ bekannter Größen und Prozesse und bestätigen die derzeit vorherrschenden Hypothesen zur Thermalwasserentstehung am Oberrheingrabenrand.

Die Größe der Modellgebiete und die gleichzeitig geringe Datendichte machen die Abstraktion und Vereinfachung der Wirklichkeit notwendig. Aus diesem Grund ist die Anwendung numerischer Berechnungen ein wichtiger Schritt zum tieferen Verständnis der Thermalwasserzirkulation, aber sie ermöglicht keine detaillierten Prognosen zu lokal herrschenden hydrogeologischen oder geothermischen Bedingungen.

## **ABSTRACT**

Subject of the presented work is a comparative investigation of selected thermal water reservoirs at the Eastern border of the Upper Rhine Graben. The waters of natural springs and thermal wells originate from meteoric waters which percolate through the crystalline rocks of the Black Forest. The thermal waters with their characteristics and properties can therefore give insights into the hydrogeological and geothermal conditions in the deep crystalline basement.

The investigation of the locations Baden-Baden, Ohlsbach and Badenweiler is supported by mass and energy budget calculations by means of numeric modeling. Each catchment area is converted separately into a three-dimensional, fully coupled flow and heat transport model. The single models are set up using approximately the same methodology in order to optimize the comparability between the model results of the different localities.

The springs and wells of Baden-Baden are the hottest thermal waters of Baden-Württemberg. In the numerical model they are represented by a spring node, situated above a permeable fault zone, which enables the groundwater outflow. The thermal water reaches the surface after an average residence time of approximately 11,000 years. The determined hydraulic conductivities of the crystalline rocks, which are dominated by granites, lie between  $1.9 \cdot 10^{-8}$  and  $1.3 \cdot 10^{-10}$  m/s. They decrease slightly with depth.

Near Ohlsbach a plume of deep groundwater reaches the Quaternary valley sediments and flows within these towards the river Rhine. The numerical model is open to groundwater outflow in the Northwest. In this model two water conducting fault zones with a permeable intersection area are implemented. The average residence time results to 5,000-7,500 years. The hydraulic conductivities decrease with depth stronger than in the Baden-Baden model, which can be attributed to Gneis dominating the crystalline basement and its hydrogeological characteristics.

In Badenweiler there are three natural springs. Two wells supplement the thermal waters used for spa purposes. In this model the Northwestern boundary open to groundwater outflow and a spring node enables the discharge of groundwater at the surface. The ascending zone is represented by a narrow permeable zone. The average residence time is here only approximately 1,100 years. Catchment area and circulation depth are smaller than in the two remaining models. The hydraulic conductivity hardly decreases with depth due to prevailing granites and the shallow model depth.

A fact that all three numerical models have in common is that, based on the available data, they represent a plausible solution to the complex hydrogeological problem. They allow a quantification of the so far only qualitatively known parameters and processes. The currently most accepted hypotheses about the thermal water generation at the Upper Rhine Graben are supported.

The size of the model areas and at the same time the small data base demand abstraction and simplification of the reality. For this reason the application of numerical modeling is an important step towards a deeper understanding of the thermal water circulation, but it does not allow detailed predictions on local hydrogeological or geothermal conditions.

## VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Arbeitsgruppe Hydrogeologie, der Universität Karlsruhe im Zeitraum 2003-2005. Ganz herzlich möchte ich an dieser Stelle all jenen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran danke ich Herrn PROF. DR. HEINZ HÖTZL für die Anregung zu diesem Dissertationsthema und die hilfreiche wissenschaftliche Begleitung der Arbeit.

Ich danke Frau PROF. DR. INGRID STOBER vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) für die Übernahme des Korreferates und ihre umfassende Unterstützung.

Vielen Dank an Herrn PROF. EMERIT. KÄB, der die Datenrecherche zu den Thermalwasservorkommen erleichtert und Daten zur Verfügung gestellt hat.

Herzlichen Dank an Herrn PROF. EMERIT. SITTIG für seine Hinweise zu den geologischen Verhältnissen um Baden-Baden.

Großer Dank gebührt den Mitarbeitern des LGRB, die mir bei der Datenzusammenstellung sehr geholfen haben. Herr DR. ARMBRUSTER, Herr DR. KILGER, Herr DR. BAUER, Frau SIEBER und Herr KUPSCH seien hier stellvertretend erwähnt.

Auch den Mitarbeitern der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Herrn REGNER, Frau DR. BOUCEK und Herrn JURASCHEK danke ich herzlich für die unkomplizierte Herausgabe von Daten zu Grundwasserständen, Quellschüttungen und Pegelmessungen.

Ein großes Dankeschön geht an CHRISTINA SCHRAGE, die durch ihre Diskussionsbereitschaft und eine hervorragende Diplomarbeit erheblich zu dieser Dissertation beigetragen hat.

Ich möchte auch Herrn MICHAEL SCHWARZ für die vielen anregenden Gespräche, u.a. zum Thema Neotektonik des Oberrheingrabens danken.

Vielen Dank an Herrn REINWALD und Herrn RICHTER von der Badenweiler Thermen und Touristik GmbH, die mich sehr bei der Datenaquisition zu diesem Thermalwasservorkommen unterstützt haben.

Auch Herr TEICHMANN vom Umweltamt Baden-Baden hat durch seine Hilfe und die Öffnung seines Archives sehr zur Datenrecherche beigetragen.

Danke an Herrn ZAHNEN von der Kurgesellschaft Bad Rotenfels GmbH für die freundliche Überlassung von Daten über das Thermalwasservorkommen Bad Rotenfels.

Herzlichen Dank an FABIEN MAGRI, der das Modul zur Kopplung von Dichte und Viskosität an Druck und Temperatur entwickelt und mir freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

Ich danke den Mitarbeitern der WASY GmbH PROF. DR. DIERSCH, Herrn KÖNIG und Herrn SCHÄTZL für die Beratung und Unterstützung bei Problemen in der FEFLOW-Anwendung.

Ein großes Dankeschön gebührt den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Angewandte Geologie, DR. VLAD GIURGEA, ROLAND TOUSSAINT, MATTHIAS WEEDE, LEIF WOLF, TANJA LIESCH, JOCHEN KLINGER, DETLEV RETTENMAIER, DOMINIK EHRET u.a. für die gute Arbeitsatmosphäre, anregende Gespräche und die vielen Hilfestellungen beim Entstehen dieser Arbeit.

Und ganz besonders herzlich danke ich meinem Mann SAMUEL GIERSCH für alles.

---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2 FORSCHUNGSGESCHICHTE .....	2
1.3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE .....	5
1.4 GEOLOGISCHER RAHMEN .....	7
1.5 HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE .....	10
<b>2 METHODIK .....</b>	<b>13</b>
2.1 GRUNDLAGEN DER NUMERISCHEN MODELLIERUNG .....	13
2.1.1 Finite Elemente Methode .....	13
2.2 AUSWAHL DER SOFTWARE .....	14
2.2.1 Auswahlkriterien .....	14
2.2.2 Getestete Programme .....	15
2.2.2.1 SHEMAT .....	15
2.2.2.2 FEFLOW .....	16
2.2.2.3 Weitere Programme .....	17
2.3 DAS PROGRAMM FEFLOW .....	18
2.3.1 Grundlegende Gleichungen .....	18
2.3.2 Das Modellkonzept der Makroskala .....	21
2.3.3 Numerische Parameter .....	24
2.3.4 Randbedingungen und Nebenbedingungen .....	25
2.3.5 Temperaturkopplung von Dichte und Viskosität .....	26
2.4 MODELLENTWICKLUNG .....	29
2.4.1 Konzeptmodell .....	30
2.4.2 Vorstudien .....	30
2.4.3 Erarbeitung des Ergebnismodells .....	31
2.5 AUSWERTUNG DER NUMERISCHEN MODELLE .....	35
2.5.1 Darstellung .....	35
2.5.2 Sensitivitätsanalyse .....	36
2.5.3 Ermittlung der Verweildauer .....	37
2.5.3.1 Methode 1: 3D-Stromlinien mit Zeitmarkern .....	37

---

2.5.3.2	Methode 2: Berechnung aus Fließgeschwindigkeit und Fließstrecke .....	37
2.5.3.3	Methodenvergleich .....	38
<b>3</b>	<b>STANDORTE .....</b>	<b>39</b>
3.1	OHLSBACH .....	39
3.2	BADEN-BADEN .....	40
3.3	BADENWEILER .....	42
<b>4</b>	<b>NUMERISCHE MODELLE .....</b>	<b>44</b>
4.1	OHLSBACH .....	44
4.1.1	Datengrundlage .....	44
4.1.2	Konzeptmodell .....	48
4.1.3	Vorstudien .....	49
4.1.3.1	Ermittlung des Einzugsgebietes .....	49
4.1.3.2	2D-Modell .....	52
4.1.4	Ergebnismodell „3D Ohlsbach“ .....	56
4.1.4.1	Geometrie .....	56
4.1.4.2	Parameter .....	57
4.1.4.3	Ergebnisse .....	58
4.1.4.4	Sensitivitätsanalyse .....	60
4.2	BADEN-BADEN .....	65
4.2.1	Datengrundlage .....	65
	Konzeptmodell .....	69
4.2.2	Vorstudien .....	71
4.2.3	Ergebnismodell „3D Baden-Baden“ .....	71
4.2.3.1	Geometrie .....	71
4.2.3.2	Parameter .....	73
4.2.3.3	Ergebnisse .....	74
4.2.3.4	Sensitivitätsanalyse .....	76
4.3	BADENWEILER .....	79
4.3.1	Datengrundlage .....	79
4.3.2	Konzeptmodell .....	88
4.3.3	Vorstudien .....	89
4.3.4	Ergebnismodell „3D Badenweiler stationär“ .....	91
4.3.4.1	Geometrie .....	91
4.3.4.2	Parameter .....	93
4.3.4.3	Ergebnisse .....	94

4.3.5	Instationäre Simulation der Pumpversuche.....	96
4.3.6	Instationäre Simulation der Dauerförderung aus Badenweiler II und III	100
4.3.7	Sensitivitätsanalyse.....	102
<b>5</b>	<b>AUSWERTUNG DER MODELLBERECHNUNGEN .....</b>	<b>111</b>
5.1	FEHLERDISKUSSION.....	111
5.1.1	Datenbasis.....	111
5.1.2	Konzeptmodelle.....	116
5.1.3	Software-bedingte Fehler.....	118
5.1.4	Unsicherheitsanalyse.....	118
5.2	VERGLEICH DER NUMERISCHEN MODELLE.....	121
5.2.1	Vergleich der Konzeptmodelle.....	121
5.2.2	Vergleich der Ergebnismodelle.....	122
5.2.3	Vergleich der Plausibilitäts- und Sensitivitätsanalysen.....	125
5.2.4	Übersicht.....	127
5.3	VERGLEICH MIT MODELLEN ANDERER AUTOREN.....	129
5.3.1	PRIBNOW (2003).....	129
5.3.2	BÄCHLER (2003).....	131
5.3.2.1	Landau.....	131
5.3.2.2	Soultz-sous-Forêt.....	134
5.4	ZUSAMMENFASSUNG DER MODELLVERGLEICHE.....	138
5.5	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	138
5.5.1	Lokale Faktoren der Thermalwasserzirkulation.....	138
5.5.2	Übertragbare Erkenntnisse.....	139
5.5.3	Bewertung der Methodik.....	141
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>145</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>148</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Geologische Übersichtskarte des Schwarzwaldes und Umgebung. Die roten Dreiecke bezeichnen natürliche und erbohrte Austrittsstellen von Thermalwasser. (bearbeitet nach LGRB 1998)	7
Abb. 2a-c:	Auswirkungen der mechanischen Dispersion in a) Porengrundwasserleitern, b) Kluftgrundwasserleitern und c) unter speziellen strukturgeologischen Voraussetzungen in Kluftgrundwasserleitern (Erläuterung siehe Text)	23
Abb. 3:	Abhängigkeit der Dichte des Wassers von Temperatur und Druck (aus STOBER 1994)	27
Abb. 4:	Abhängigkeit der Viskosität des Wassers von Temperatur und Druck (aus STOBER 1994)	27
Abb. 5:	Druck-Temperatur-Diagramm für Wasser mit dem Gültigkeitsbereich des $\beta$ - $\gamma$ -Moduls von MAGRI (2004)	28
Abb. 6:	Die elektrischen Widerstände im oberen Grundwasserstockwerk zeigen die Ausbreitung der bei Ohlsbach aufsteigenden Grundwässer an (aus: STOBER et al. 1999)	40
Abb. 7:	Lageplan der in Baden-Baden genutzten Quellen und Bohrungen (nach KÄSS 1995)	41
Abb. 8:	Lage der Quellen und Bohrungen in Badenweiler	42
Abb. 9:	Geologische Karte, Ausschnitt Kinzigtal aus: LGRB (1998). Die blaue Linie kennzeichnet die Umgrenzung des Ergebnismodells „3D Ohlsbach“, während die grüne Linie das oberirdische Einzugsgebiet markiert.	45
Abb. 10:	Geologisches Profil der Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2 (Datenquelle: LGRB Bohrarchiv)	46
Abb. 11:	Radiogene Wärmeproduktion in den Bohrungen im mittleren Schwarzwald im Rahmen der KTB-Vorerkundung (aus BURKHARDT et al. 1989)	47

---

Abb. 12:	Vom Abstrombereich aus rückwärts erzeugte Stromfäden im Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“ in der Draufsicht	50
Abb. 13:	Modellgebiet „Ohlsbach“ in der Draufsicht mit Lage des 2D-Modellschnittes	51
Abb. 14:	2D-Modell „Ohlsbach“ mit Randbedingungen und hydrogeologischen Einheiten	52
Abb. 15:	Temperatur der Aufstiegsässer in Abhängigkeit des $k_f$ (Aufstieg 1). Alle übrigen Parameter entsprechen Tabelle 5.	54
Abb. 16:	Temperatur der Aufstiegsässer und Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der Modelldurchlässigkeit. Der Faktor bezieht sich auf die $k_f$ -Werte aus Tabelle 5.	54
Abb. 17:	Hydrogeologische Einheiten und horizontale Diskretisierung des Modells „3D Ohlsbach“	56
Abb. 18:	Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Ohlsbach“	59
Abb. 19:	Berechnetes Strömungsfeld der Grundwässer im Modell „3D Ohlsbach“	60
Abb. 20a-c:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für a) Wärmeleitfähigkeit, b) radiogene Wärmeproduktion und c) basale Wärmeflussdichte für das Modell „3D Ohlsbach“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar (Erläuterung siehe Text).	61
Abb. 21:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Modelldurchlässigkeit für das Modell „3D Ohlsbach“. Die $k_f$ -Werte aller Einheiten wurden jeweils mit dem Faktor multipliziert. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.	62
Abb. 22:	Veränderung des Strömungsfeldes bei Erhöhung der Durchlässigkeit im Aufstiegsbereich. Je mehr die $k_f$ -Werte erhöht werden, um so stärker biegen die Stromfäden nach unten ab, bevor sie aufsteigen.	63

---

Abb. 23:	Geologische Einheiten und Verlauf der wichtigsten tektonischen Elemente im Einzugsgebiet Baden-Baden, bearbeitet nach LGRB (1998)	66
Abb. 24:	Schematische Darstellung des Fließsystems im Aufstiegsbereich der Baden-Badener Thermalwässer	70
Abb. 25:	Hydrogeologische Einheiten und horizontale Diskretisierung des Modells „3D Baden-Baden“	72
Abb. 26:	Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Baden-Baden“	74
Abb. 27:	Berechnetes Strömungsfeld der Grundwässer im Modell „3D Baden-Baden“	75
Abb. 28:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Wärmeleitfähigkeit des Granites für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar. (Erläuterung siehe Text)	76
Abb. 29a-c:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für a) Wärmeleitfähigkeit des Permokarbon, b) radiogene Wärmeproduktion und c) basale Wärmeflussdichte für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar. (Erläuterung siehe Text)	77
Abb. 30:	Änderung der $k_f$ -Werte um einen Faktor und Auswirkung auf die Modellergebnisse für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.	78
Abb. 31:	Bohrprofile von Badenweiler II und Badenweiler III mit Kennzeichnung der Filterstrecke	80
Abb. 32:	Temperaturprofile der Bohrungen Badenweiler I und Badenweiler III (beide gemessen 1972, in Badenweiler III 10 Tage nach Abschluss der Bohrarbeiten)	83
Abb. 33:	Geologische Übersichtskarte des mutmaßlichen Einzugsgebietes der Thermalquellen und -bohrungen von Badenweiler	85
Abb. 34a-c:	Schematische Darstellung der möglichen Verteilung hydrogeologischer Einheiten in der Vorbergzone.	90

---

Abb. 35a-b:	Schematische Darstellung beider Möglichkeiten zur Umsetzung einer undurchlässigen Störung in der Vorbergzone. Legende siehe Abb. 34	90
Abb. 36:	Hydrogeologische Einheiten und Diskretisierung des Ergebnismodells „3D Badenweiler stationär“	92
Abb. 37:	Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Badenweiler stationär“	95
Abb. 38:	Strömungsfeld im Ergebnismodell „3D Badenweiler stationär“	96
Abb. 39a-b:	Brunnenförderraten aus a) Badenweiler II während Pumpversuch 1967 und b) Badenweiler III während Pumpversuch 1972	97
Abb. 40:	Quellschüttung während des Pumpversuchs 1967 nach Messungen und Modellberechnungen	98
Abb. 41:	Quellschüttung während des Pumpversuchs 1972 nach Messungen und Modellberechnungen	99
Abb. 42a-b:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die Wärmetransportparameter: a) basaler Wärmefluss und b) Wärmeleitfähigkeit des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.	103
Abb. 43:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die radiogene Wärmeproduktion des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.	104
Abb. 44:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit der gesamten Modellkörper „3D Badenweiler stationär“. Im unteren Teil der Diagramme ist der Fehler der Pumpversuchssimulationen (Szenario PV67) dargestellt. Die Kreise markieren die Werte des Idealmodells. (Erl. siehe Text).	106
Abb. 45:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. (Erl. siehe Abb. 43 und Text)	106

---

Abb. 46:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die S hydraulische Durchlässigkeit der Stauzone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)	108
Abb. 47:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit des Buntsandstein/Muschelkalk im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)	108
Abb. 48:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit der Aufstiegszone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)	109
Abb. 49:	Sensitivität der Modellergebnisse auf die horizontale hydraulische Durchlässigkeit der Aufstiegszone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)	110
Abb. 50:	Wärmeleitfähigkeit in der Bohrung Hechtsberg/Schwarzwald. Dicke Linie: in situ Messungen, dünne Linien: Labormessungen (linke Linie) parallel und (rechte Linie) senkrecht zur Foliation. aus BURCKHARDT et al. (1989)	113
Abb. 51:	Vergleichende Darstellung der $k_f$ -Wert-Verteilung in den 3D-Modellen Baden-Baden und Ohlsbach	123
Abb. 52:	2D-Modell von PRIBNOW (2003) mit den hydrogeologischen Einheiten. Im Granit sind die Zonen mit verschiedenen $k_f$ -Werten und radiogenen Wärmeproduktionsraten durch weiße Linien getrennt (bearbeitet nach PRIBNOW 2003)	129
Abb. 53:	Modellkörper der 3-D Fallstudie zur Temperaturanomalie von Landau (BÄCHLER 2003b). Hydrogeologische Einheiten sind von oben nach unten: Quartär/Tertiär/Keuper, Muschelkalk/Buntsandstein, Granit. Der hellgraue Bereich repräsentiert eine Störungszone.	132
Abb. 54:	Modellgeometrie des Modells 2D-Soultz von BÄCHLER (2003)	135

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	In FEFLOW verwendete Materialparameter, Standardwerte und ihre Einheiten.....	34
Tabelle 2:	Parameter des Konzeptmodells Ohlsbach (Quellen siehe Datengrundlage) .....	49
Tabelle 3:	Eingangsparameter für das Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“ .....	49
Tabelle 4:	Randbedingungen für das Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“ .....	50
Tabelle 5:	Strömungs- und Wärmetransportparameter im Modell „2D Ohlsbach“ .....	53
Tabelle 6:	Viskositäts- und Dichtekopplung in ihrer Auswirkung auf die Modellergebnisse im Vergleich zum ungekoppelten Modell; ↑ (↓) Wert steigt (sinkt) durch die Kopplung .....	55
Tabelle 7:	Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Ohlsbach“ .....	57
Tabelle 8:	Randbedingungen des Modells „3D Ohlsbach“ .....	57
Tabelle 9:	$k_f$ -Werte in m/s im Modell „3D Ohlsbach“ .....	58
Tabelle 10:	Wärmetransportparameter im Modell „3D Ohlsbach“ .....	58
Tabelle 11:	Ergebnisse aus dem Modell „3D Ohlsbach“ .....	59
Tabelle 12:	Schüttung und Temperatur der Baden-Badener Thermalquellen und der Pflutterloch-Bohrungen (Carasana Bäderbetriebe GmbH 2004, LGRB und Umweltamt Baden-Baden 2004) .....	67
Tabelle 13:	Parameter des Konzeptmodells Baden-Baden (Quellen siehe Datengrundlage) .....	71
Tabelle 14:	Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Baden-Baden“ .....	72
Tabelle 15:	Randbedingungen des Modells „3D Baden-Baden“ .....	73
Tabelle 16:	$k_f$ -Werte im Modell „3D Baden-Baden“ .....	73
Tabelle 17:	Wärmetransportparameter im Modell „3D Baden-Baden“ .....	74
Tabelle 18:	Ergebnisse aus dem Modell „3D Baden-Baden“ .....	75
Tabelle 19:	Vertikaler Durchfluss der einzelnen Modellschichten.....	76
Tabelle 20:	Temperaturen und Schüttungs- bzw. Förderraten der Quellen und Bohrungen in Badenweiler.....	81

---

Tabelle 21: Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Badenweiler“ .....	92
Tabelle 22: Randbedingungen des Modells „3D Badenweiler stationär“ .....	93
Tabelle 23: $k_f$ -Werte im Modell „3D Badenweiler stationär“ .....	93
Tabelle 24: Wärmetransportparameter im Modell „3D Badenweiler stationär“ .....	94
Tabelle 25: Ergebnisse aus dem Modell „3D Badenweiler stationär“ .....	94
Tabelle 26: Modellparameter von „3D Badenweiler Dauerförderung“ .....	100
Tabelle 27: Ergebnisse von „3D Badenweiler Dauerförderung“ im Vergleich zum Konzeptmodell .....	101
Tabelle 28: Übersicht der Modellunsicherheiten, gewichtet nach ihrer Priorität für die Modellergebnisse.....	119
Tabelle 29: Vergleich der Sensitivitäten auf Wärmetransportparameter ....	126
Tabelle 30: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Modelle Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler .....	128
Tabelle 31: Materialparameter des 2D-Modells von PRIBNOW (2003).....	130
Tabelle 32: Materialparameter des Modells 3D-Landau (BÄCHLER (2003)) .....	133
Tabelle 33: Materialparameter des Modells 3D-Landau (BÄCHLER (2003)) .....	136

## SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	$L^2$	Querschnitt
$c_k$	$M/L^3$	Konzentration des Stoffes k
Cr	-	COURANT-Zahl
D	$L^2T^{-1}$	Diffusionskonstante
E	$L^2T^{-2}$	Energie
$g_j$	$LT^{-2}$	Schwerkraftvektor
h	L	Höhe
i	-	hydraulischer Gradient
$j_{ik}$	$ML^{-2}T^{-1}$	FICK'scher Massenflussvektor
$j_{iT}$	$MT^{-3}$	FOURIER'scher Wärmeflussvektor
$k_f$	$LT^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert
$k_{ij}$	$LT^{-1}$	Tensor des Durchlässigkeitsbeiwertes
$K_{ij}$	$L^2$	Permeabilitätstensor
l	L	Länge
p	$ML^{-1}T^{-2}$	Druck
Pe	-	PECLET-Zahl
Q	$L^3T^{-1}$	Durchfluss
$Q_p$	$1T^{-1}$	Massenzustrom
$Q_T$	$ML^{-1}T^{-3}$	Wärmestrom
$R_k$	$ML^{-3}T^{-1}$	Reaktionsfaktor des Stoffes k
t	T	Zeit
v	$LT^{-1}$	Geschwindigkeit
$v_i, v_j$	$LT^{-1}$	Geschwindigkeitsvektoren
$v_{Darcy}$	$LT^{-1}$	DARCY-Geschwindigkeit
V	$LT^{-1}$	absolute Geschwindigkeit $\sqrt{(v_i v_i)}$
x	L	Länge
$x_i, x_j$	L	Länge in Koordinatenrichtung i bzw. j
$\alpha_L$	L	longitudinale Dispersivität
$\alpha_T$	L	transversale Dispersivität
$\beta$	$\Theta^{-1}$	thermischer Expansionskoeffizient
$\gamma$	$L^{-1}$	Fluidkompressibilität
$\delta_{ij}$	-	Kronecker Tensor ( $\delta_{ij}=1$ für $i=j$ , sonst $\delta_{ij}=0$ )
$\varepsilon$	-	Gesamtporosität $0 \leq \varepsilon \leq 1$
$\lambda$	$MLT^{-3}\Theta^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$	dynamische Viskosität
$\mu_0$	$ML^{-1}T^{-1}$	dynamisch Viskosität bei Referenztemperatur
$\rho$	$ML^{-3}$	Dichte
$\rho_0$	$ML^{-3}$	Dichte bei Referenztemperatur

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Problemstellung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges im süddeutschen Raum untersucht. Die thermohydraulischen Eigenschaften vormesozoischer Magmatite und Metamorphite sind unter verschiedenen Aspekten hochinteressant. Einerseits gelten sie als Gering- bis Nichtleiter, andererseits dokumentieren sich in Thermalwasseraustritten tiefgreifende Wasserzirkulationssysteme. Die Nutzung thermaler Grundwässer für Kuranwendungen sowie die Gewinnung von elektrischem Strom und Wärme aus Geothermie nutzt die Eigenschaften tiefer Festgesteine. Auch sind Kristallingesteine in den vergangenen Jahrzehnten für die Erschließung von Trinkwasser und als mögliche Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle in den Fokus gerückt. Für diese und weitere Anwendungsbereiche ist das Verständnis der im kristallinen Untergrund ablaufenden hydraulischen Prozesse von wesentlicher Bedeutung.

Diesem Bedarf an Informationen über wasserführende Kristallingesteine stehen die großen Schwierigkeiten bei der Untersuchung eben dieser Gesteine gegenüber. Die Ausdehnung von Festgesteinskörpern in der oberen Erdkruste, welche von Grundwasser durchströmt werden, ist beträchtlich. Aus einzelnen Bohrungen oder Bergwerksstollen gewonnene Daten können aufgrund der natürlich gegebenen Heterogenität der Kristallingesteine nicht problemlos auf größere Gebiete übertragen werden. Die meist geringen Fließgeschwindigkeiten und die schwierig abzugrenzenden Einzugsgebiete erschweren den Einsatz herkömmlicher hydrogeologischer Untersuchungsmethoden in vielen Gebieten.

Der Oberrheingraben mit mehreren Thermalwasseraustritten an seinem Ost- rand zwischen Karlsruhe und Basel bietet Einblicke in die hydraulischen und thermischen Prozesse des kristallinen Untergrundes, wie es nur an wenigen Punkten der Erdoberfläche der Fall ist. Die Thermalquellen und -bohrungen werden aus Einzugsgebieten gespeist, welche fast ausschließlich im Kristallin des Schwarzwaldes liegen. Aus verschiedenen Gründen kommen die Thermalwasservorkommen des östlichen Oberrheingrabens für detaillierte Untersuchungen in Frage. Die Thermalquellen werden zum Teil schon seit über 2000 Jahren genutzt und waren während ihrer Geschichte mehrfach, vor allem

in den 1960er und 1970er Jahren, Gegenstand intensiver Untersuchungen. Die Datenlage bezüglich Schüttungsverhalten, Chemismus und Aufstiegsmechanismen der Grundwässer ist daher ausgesprochen gut. Das Vorkommen mehrerer Thermalwasseraufstiege in geologisch ähnlichen Situationen entlang des Oberrheingrabenrandes ermöglicht vergleichende Untersuchungen, wie sie nur an wenigen anderen Standorten möglich sind. So sollen ausgewählte Standorte des östlichen Oberrheingrabenrandes untersucht werden, um im Ergebnis allgemein gültige Aussagen zur Wasserzirkulation im tieferen Grundgebirge treffen zu können.

Die Untersuchungen werden vor allem mit den Methoden der numerischen Modellierung durchgeführt, da die Entwicklungen in der Software- und Rechnertechnik in den letzten Jahren so schnell vorangeschritten ist, dass wesentliche neue Erkenntnisse durch die Anwendung dieser Methoden gewonnen werden können. Besonders die dreidimensionale Umsetzung der Einzugsgebiete und die modelltechnische Kopplung von Strömung und Wärmetransport ermöglichen realitätsnahe Simulationen, die zu einer Quantifizierung der bisher nur qualitativ bekannten Mechanismen und Prozesse führen.

## **1.2 Forschungsgeschichte**

Die Thermalwasservorkommen am Rand des Oberrheingrabens werden zum Teil mindestens seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. genutzt und sind seit entsprechend langer Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Die vorliegende Arbeit führt jedoch nicht nur diese Untersuchungen weiter, sondern integriert gleichzeitig die Ergebnisse der Studien zur Hydrogeologie des Schwarzwald-Kristallins und zu den Grundwasserhältnissen im Oberrheingraben. Zudem sind die Entwicklungen auf dem Gebiet der numerischen Modellierung zur Simulation von Strömung und Wärmetransport von entscheidender Bedeutung für die in dieser Arbeit angewandte Methodik. Die wichtigsten Arbeiten aus den genannten Themenbereichen sollen an dieser Stelle kurz erwähnt werden.

Die wissenschaftlichen Aufzeichnungen über die bearbeiteten Thermalbäder beginnen bereits mit PARACELTUS (1589). Erst im 20. Jahrhundert wurden die Entstehungsmechanismen der Thermalquellen jedoch nach modernen Methoden studiert, vor allem auch angetrieben durch die Möglichkeit der Erschließung neuer Thermalwasservorkommen durch Bohrungen. KIDERLEN (1953)

berichtet zusammenfassend über die Thermalquellen des Schwarzwaldes und stellt die besondere Bedeutung der struktureologischen Bedingungen für die Thermalwasseraustritte heraus. In einem Übersichtswerk zu den Mineral- und Thermalwässern Mitteleuropas fasst CARLÉ (1975) die wichtigsten Quellen und Bohrungen zusammen, erläutert ihren Chemismus und geht kurz auf die mögliche Herkunft der Wässer ein. SAUER hat in zahlreichen Publikationen (1970, 1977 etc.) entscheidende Beiträge zum Verständnis der Thermalwasservorkommen des Oberrheingrabenrandes geleistet. Als Präsident des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg (GLA, heute LGRB) begleitete er die Vorerkundungen und gegebenenfalls die Errichtung von Bohrungen zur Thermalwassererschließung und veröffentlichte die daraus gewonnenen Daten. Eine erste Detailstudie zum Standort Badenweiler stammt von BASTING (1977), der alle vorhandenen Daten zusammenfasste und auswertete. Zusätzlich erhob er Daten durch eine geologische Detailkartierung des „Quarziriffs“, einer Zone silifizierter triassischer Gesteine am Oberrheingrabenrand, und durch Tritium- und  $^{14}\text{C}$ -Analysen. FRIEDRICHSEN (1981) untersuchte Thermalwassersysteme im Oberrheingraben und nördlichen Schwarzwald. Er wertete vorliegende hydrochemische Daten aus, führte Geothermometerberechnungen durch und wies durch  $\delta^{18}\text{O}$ - und Deuterium-Analysen die meteorische Herkunft der Wässer von Baden-Baden nach. Auch STOBER (1995) bestimmte Geotemperaturen und potentielle Lagerstättentiefen der nord-schwarzwälder Thermalwässer mit Hilfe von  $\text{SiO}_2$ -Thermometern. Die Arbeit von BENDER (1995) ergänzt diese Studien um  $^{14}\text{C}$ -Analysen und weitere Geothermometerberechnungen. HE (1997) führte vergleichende Untersuchungen zu den Thermalquellen und -bohrungen des südlichen Oberrheingrabens durch. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den chemischen Eigenschaften der Wässer und Sinterablagerungen und der daraus abzuleitenden Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen. In der Arbeit von STOBER et al. (1999) wird der Tiefenwasseraufstieg von Ohlsbach erstmals detailliert dargestellt. Schließlich untersucht AMBS (2002) die Entstehung der Quellen Hubbad und Erlenbad durch geologische, hydrogeologische und Isotopenanalysen.

Zum Verständnis der Hydrogeologie des Schwarzwaldes tragen unter anderem die Vorerkundungen zum kontinentalen Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland Ende der 80er Jahre bei. Die Untersuchungen am potentiellen Standort bei Haslach im mittleren Kinzigtal umfassen mehrere bis 300 m tiefe Bohrungen, Temperaturmessungen und die Bestimmung thermischer Gesteinsparameter. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in BURKHARDT et al. (1989) zusammengefasst. Auch STOBER (1994, 1995) befasst sich detail-

liert mit dem Wasserverhalten im kristallinen Grundgebirge am Beispiel des Schwarzwaldes. Sie wertet zahlreiche Pumpversuche und geothermische Daten aus und stellt damit das Verständnis der hydrogeologischen Verhältnisse im Kristallin auf eine breite Datenbasis. BUCHER et al. (2000) untersuchen im Speziellen die Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen der Grundgebirgswässer und weisen die Herkunft der Wasserinhaltsstoffe aus diesen Prozessen nach. Die mögliche Herkunft der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen in den Thermalwässern aus tertiären Salzlagern der Oberrheingrabenfüllung, die vorher diskutiert wurde, ist damit nicht nur durch hydraulische Überlegungen, sondern auch durch hydrochemische Analysen und Experimente widerlegt. STÖBER et al. (2000) zeigen anhand der  $\text{Cl}/\text{Br}$ -Verhältnisse in Thermalwässern, dass oligozäne Meerwasserintrusionen an ihrer Genese beteiligt sind.

Der Oberrheingraben stellt mit seinen Temperaturanomalien bei Landau, Speyer und Soultz-sous-Forêt schon seit einigen Jahrzehnten ein Feld vielfältiger Forschungen dar. CLAUSER et al. (1990) stellen die große Bedeutung des konvektiven Wärmetransportes im Oberrheingraben heraus. AQUILINA et al. (2000) kommen durch die Auswertung hydrochemischer Daten entlang eines Oberrheingraben-Transsects zu dem Schluss, dass die Temperaturanomalien nicht durch große Wasserkreisläufe von den Grabenschultern aus gespeist werden, sondern durch kleine Konvektionszellen innerhalb des Granites und Buntsandsteins erzeugt werden. In Bezug auf die vorliegende Arbeit sind vor allem die modelltechnischen Ansätze zur Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Oberrheingraben von Bedeutung. Schon HOFFERS (1981) versucht, durch analytische Modelle, die Temperaturanomalien und ihren Zusammenhang mit Fluidzirkulationen entlang von Störungen zu klären. LAMPE (2001) erstellt zweidimensionale Strömungs- und Wärmetransportmodelle für den nördlichen Oberrheingraben und kalibriert diese unter anderem mittels Vitrit-Reflexions-Daten aus Kohleresten. CLAUSER (2003) entwickelt die Software SHEMAT (siehe 2.2.2) und veröffentlicht in Zusammenarbeit mit PRIBNOW (2003) ein zweidimensionales Modell entlang eines Vertikalschnittes quer zum Oberrheingraben auf der Höhe von Soultz-sous-Forêt. Die Autoren gehen dabei schon von der Vorstellung kleinräumiger Konvektionszellen im Grundgebirge aus, wie sie von AQUILINA et al. (2000) postuliert wurden. Sie verwenden außerdem erstmals die volle Dichte- und Viskositätskopplung an die Temperatur. BÄCHLER (2003) konfiguriert ein dreidimensionales Modell zur Temperaturanomalie von Landau mit dem Code TOUGH2. Das geometrisch relativ einfache Modell simuliert Strömung und Wärmetransport

gekoppelt und bildet die durch Dichteunterschiede angetriebenen Konvektionszellen entlang einer Störungszone nach.

Die Ergebnisse dieser obschon sehr umfangreichen Forschungsgeschichte lassen noch zahlreiche Fragen offen, die im Rahmen dieser Arbeit weiterführend bearbeitet werden sollen. Dazu gehören z.B. die detaillierte Beschaffenheit der Aufstiegszonen mit den Fließraten der aufsteigenden Wässer, die mindestens notwendigen hydraulischen Durchlässigkeiten der Kristallinegesteine, welche die Thermalwassergenese ermöglichen, oder die Abschätzung großräumiger Wasser- und Energiebilanzen der Prozesse im tieferen Untergrund. Es stehen heute neue Methoden zur numerischen Modellierung zur Verfügung, welche die Gewinnung von Erkenntnissen ermöglichen, die über die mit bisherigen Methoden erarbeiteten Ergebnisse hinausweisen. Die vorliegende Arbeit baut auf den vorhergegangenen Untersuchungen auf und ergänzt diese um einen neuen Beitrag zum umfassenderen Verständnis der hydraulischen und geothermischen Verhältnisse im Kristallin.

### **1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften der Grundwasserströmung und des Wärmetransportes im kristallinen Grundgebirge zu erbringen. Die Untersuchungen sollen am Beispiel des Schwarzwaldes in seinem Übergangsbereich zum Oberrheingraben durchgeführt werden, weil hier bereits eine große Menge an Informationen zu Geologie, Tektonik, Hydrochemie und Hydrogeologie vorliegen. Zudem gewähren die Thermalwasseraustritte des Oberrheingrabenrandes einmalige Einblicke in die Vorgänge des tieferen Untergrundes. Die bestehenden Vorstellungen zur Genese der Thermalwassersysteme sollen überprüft und ergänzt werden. Als Methode wird dabei vor allem die numerische Modellierung zum Einsatz kommen, die in den letzten Jahren wesentlich weiterentwickelt wurde. So ermöglicht die hier angewendete Software FEFLOW mittlerweile die Berechnung komplexer Stoff- und Energiebilanzen in dreidimensionalen durchströmten Medien und erlaubt damit eine Quantifizierung der hydraulischen und geothermischen Prozesse. Die für die Simulation tiefgreifender Zirkulationsvorgänge so wichtige Abhängigkeit der Dichte und Viskosität des Wassers von Temperatur und Druck können durch die modernen Programme berücksichtigt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation soll eine Eingrenzung jener Parameter erfolgen, welche die Zirkulation der tiefen Grundwässer steuern. Dazu gehören in erster Linie die hydraulische Durchlässigkeit der beteiligten Gebirge sowie die Geometrie der Einzugsgebiete und Aufstiegsbahnen. Die numerische Modellierung ergibt zusätzlich Größen wie Fließgeschwindigkeiten und Verweilzeiten der Grundwässer in den verschiedenen Tiefenbereichen. Zum Verständnis des Wärmetransportes sollen Wärmeleitfähigkeiten, radiogene Wärmeproduktion und basaler Wärmefluss untersucht werden.

Das Auftreten mehrerer Tiefenwasseraufstiege unter ähnlichen geologischen und tektonischen Voraussetzungen am Oberrheingrabenrand ermöglicht eine vergleichende Betrachtung mehrerer Zirkulationssysteme hinsichtlich ihrer hydrogeologischen und geothermischen Faktoren. Aus den Gemeinsamkeiten verschiedener Einzelmodelle sollen schließlich einige grundlegende Prinzipien der Tiefenwasserzirkulation im Kristallin abgeleitet werden. Ein zusätzliches Ziel der Arbeit ist die Evaluation der Methodik. Die Eignung der numerischen Modellierung für das Studium sehr komplexer Grundwassersysteme soll unter verschiedenen Gesichtspunkten wie Anwendungsmöglichkeiten, Aussagekraft und Genauigkeit untersucht werden.

Die Untersuchungen beginnen mit einer ausführlichen Datenrecherche und Datenaufbereitung. Aus den gewonnenen Informationen werden Konzeptmodelle entwickelt, welche die Grundlage der numerischen Modellierung bilden. In mehreren Schritten vom vereinfachten zum komplexen Modell werden daraufhin dreidimensionale, voll gekoppelte Strömungs- und Wärmetransportmodelle berechnet. Diese Arbeitsschritte werden für jeweils drei Standorte: Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler durchgeführt. Im Anschluss daran werden die Einzelmodelle untereinander und mit Modellen anderer Autoren verglichen, um ihre Gemeinsamkeiten und die lokalen Besonderheiten der einzelnen Standorte herauszuarbeiten. Es folgt eine Auswertung der Ergebnisse, die von einer ausführlichen Fehlerdiskussion und einer Bewertung der Methodik begleitet wird.

### 1.4 Geologischer Rahmen

Die Untersuchungsstandorte im äußersten Südwesten Deutschlands liegen im Grenzbereich zwischen Oberrheingraben und Schwarzwald. Der Schwarzwald tritt als Mittelgebirge mit Höhen bis zu 1493 m ü. NN in Erscheinung, während der zentrale Oberrheingraben bei Basel 260 m und bei Karlsruhe 116 m ü. NN liegt.

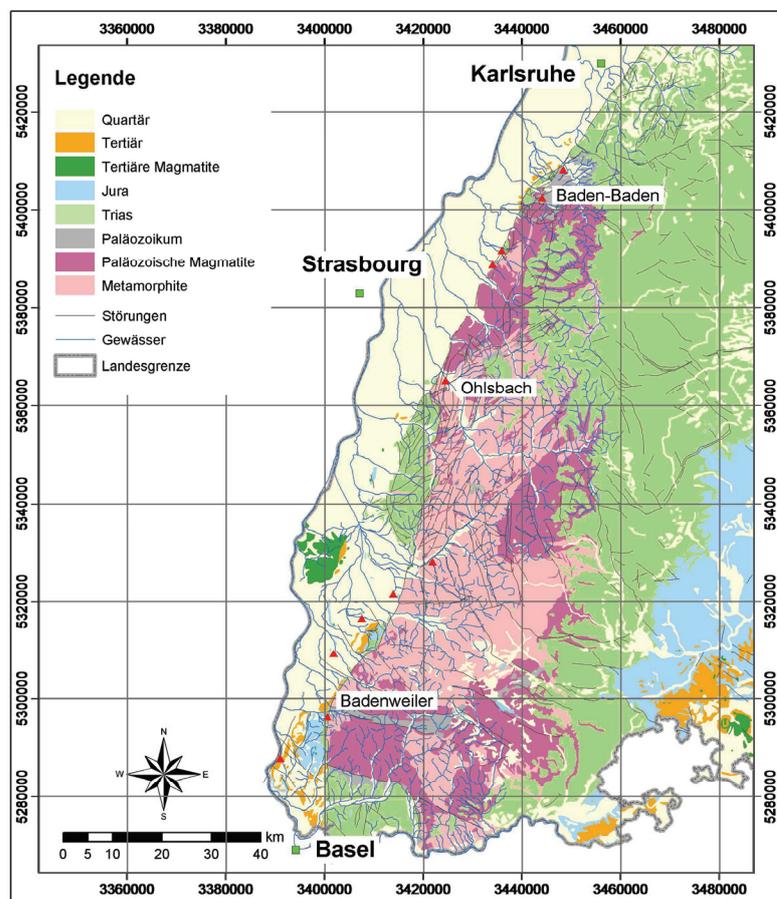


Abb. 1: Geologische Übersichtskarte des Schwarzwaldes und Umgebung. Die roten Dreiecke bezeichnen natürliche und erbohrte Austrittsstellen von Thermalwasser. (bearbeitet nach LGRB 1998)

Wie auf der geologischen Übersichtskarte (Abb. 1) zu erkennen ist, wird der Schwarzwald in großen Teilen aus kristallinen Gesteinen aufgebaut, die am Nord- und Ostrand durch das mesozoische Deckgebirge überlagert werden. Im Westen begrenzen die staffelartigen Randstörungen des Oberrheingrabens den kristallinen Schwarzwald. Der Oberrheingraben selbst ist durch mächtige tertiäre und quartäre Sedimente aufgefüllt. Entstehung und Aufbau der genannten Großstrukturen sollen im Folgenden kurz umrissen werden.

Das kristalline Grundgebirge des Schwarzwaldes besteht vorwiegend aus Gneisen und Graniten. Die Ausgangsgesteine der Gneise sind paläozoische und zum Teil präkambrische Sedimentite und Vulkanite, welche vor allem im Zuge der variszischen Orogenese metamorph überprägt wurden. Im Schwarzwald herrschen die Gesteine des Moldanubikums vor, und nur im nördlichen Bereich treten Teile des geringer metamorphen Saxothuringikums auf. Die variszische Gebirgsbildung führte zu Deckenüberschiebungen, Faltungen und zur Aktivierung zahlreicher Störungssysteme (GEYER et al. 1991). Noch während dieser Prozesse, aber vor allem postorogen kam es zur Krustenaufschmelzung und Intrusion massiver Plutonitkörper und Gangschwärme.

Mehrphasige Extensionsbewegungen nach der Gebirgsbildung führten im Oberkarbon zur Öffnung intramontaner Becken. Diese großen, variszisch streichenden Senken unterlagen einer zum Teil langanhaltenden Subsidenz und wurden mit Abtragungsschutt des jungen Gebirges gefüllt. Dabei entstanden während des Karbons und Perms vor allem Fanglomerate, Arkosen und Tonsteine. Im Rotliegend wurden die Extensionsbewegungen von Vulkanismus begleitet. Rhyolithe, Tuffe und Schweißtuffe wurden in den Permokarbon-Becken abgelagert. Mehrere tektonische Ruhe- und Aktivitätsphasen führten zu einer internen Zerblockung der Becken und zu hydrothermalen Aktivitäten, die eine Verkieselung von Sedimenten (siehe Standorte: Baden-Baden und Badenweiler) und die Ausbildung von Erzgängen zur Folge hatte. Noch während des Perms wurde das variszische Gebirge vollständig eingeebnet, so dass zu Beginn des Mesozoikums die sogenannte permische Rumpffläche mit leichtem Relief den Untergrund für weitere Ablagerungen bildete. Im Mesozoikum wurden bis in die Kreide hinein großflächig mächtige Sandstein-, Tonstein- und Kalkserien sedimentiert.

Die Oberrheingrabenbildung im Tertiär wurde durch vorgezeichnete Schwächezonen begünstigt und vom überregionalen Spannungszustand mit einer starken E-W-Extension ausgelöst. Sie führte neben der Grabeneintiefung zu einer Hebung der Grabenschultern und zur Freilegung des tiefen Kristallins des Schwarzwaldes. Gleichzeitig führten die alpine Orogenese und die Eintie-

fung des Molassebeckens zu einer Kippung der mesozoischen Schichten am Schwarzwald-Ostrand nach Südosten (GEYER et al. 1991). Die mesozoischen Sedimente oberhalb des Schwarzwald-Kristallins wurden mit Ausnahme der Buntsandsteinreste auf den Höhen des Nordschwarzwaldes vollständig abgetragen. Die Sedimentfüllung im Oberrheingraben umfasst bis über 3000 m mächtige Serien von tertiären Tonsteinen, Mergeln, Evaporiten und Sandsteinen sowie quartären Sanden und Kiesen (DOEBL 1967).

Strukturgeologisch wird das Untersuchungsgebiet von zwei mächtigen variszischen Störungszonen dominiert: die Lalaye-Lubine-Baden-Baden-Zone, welche Saxothuringikum im Norden von Moldanubikum im Süden abgrenzt (WICKERT et al. 1988), sowie die intramoldanubische Badenweiler-Lenzkirch-Zone (KROHE et al. 1988). Beide Störungssysteme streichen NW-SE. Neben dieser Streichrichtung tritt auch die Rheinische NNE-Richtung bei variszischen Störungen und Gängen häufig auf. Eine große sinistrale Blattverschiebung dieses Streichens bildete die Schwächezone, welche sich später zum Oberrheingraben öffnete, wobei die Subsidenz an den Kreuzungspunkten dieser Blattverschiebung mit ENE-streichenden Störungen einsetzte (SCHUMACHER 2002). Das Spannungsfeld, welches für diese Öffnung verantwortlich war, wechselte seit dem Eozän mehrfach von E-W-Extension über NW-SE-Extension zu NE-SW-Extension und führte damit zu einem sehr komplexen internen Aufbau des Oberrheingrabens. Heute herrscht eine NW-SE gerichtete Kompressionsspannung vor (SCHUMACHER 2002), die zu einer sinistralen Blattverschiebung entlang des Oberrheingrabens führte.

Die Öffnung des Oberrheingrabens und die damit verbundene Krustenausdünnung führten zum Aufstieg von Asthenosphärenmaterial, welcher sowohl für den regional erhöhten Temperaturgradienten im Oberrheingraben als auch für den miozänen Kaiserstuhlvulkanismus und die geophysikalisch nachgewiesene Hochlage der MOHO verantwortlich ist. Durch die starke tektonische Zerblockung des Grabenrandes und des Grabeninneren ist der Untergrund in ein Mosaik von Schollen zerlegt, die von N-S- und NE-SW-streichenden, steil stehenden Störungen begrenzt werden. Die Höhenlage der geologischen Schollen bestimmt die Mächtigkeit der oberhalb abgelagerten känozoischen Sedimente.

Es bleibt zusammenfassend festzustellen, dass die geologische Situation der Arbeitsgebiete von mehrphasigen, großräumigen tektonischen Ereignissen geprägt ist, deren Zeugnis die heutige Konstellation kristallinen Grundgebirges neben känozoischen Sedimenten, durchschlagen von bedeutenden Störungssystemen, ist. Für die detaillierte Beschreibung der regionalen geologi-

schen Verhältnisse in den einzelnen Arbeitsgebieten wird an dieser Stelle auf die Kap. „Datengrundlage“ der jeweiligen Standorte verwiesen.

## 1.5 Hydrogeologische Verhältnisse

Für die im Untersuchungsraum auftretenden Thermalwassersysteme sind vor allem die hydrogeologischen Verhältnisse von großer Bedeutung. Diese wiederum werden stark von den petrographischen und tektonischen Eigenschaften der Gesteinseinheiten beeinflusst. Die Granite und Gneise des Schwarzwald-Kristallins sind als großräumiger Kluftgrundwasserleiter zu betrachten. Dabei ist die Matrixdurchlässigkeit vernachlässigbar klein im Vergleich zur Durchlässigkeit bevorzugter Wasserwegsamkeiten wie Klüfte und Störungen. In Abhängigkeit der Filterstrecke und der angeschlossenen Klüfte wurden bei Pumpversuchen in Gneisen des Schwarzwaldes  $k_f$ -Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-9}$  und  $9 \cdot 10^{-5}$  m/s ermittelt, während die Granite des Schwarzwaldes Durchlässigkeiten zwischen  $5 \cdot 10^{-9}$  und  $8 \cdot 10^{-5}$  m/s aufwiesen (STOBER 1995). Die große Schwankungsbreite lässt die Schwierigkeiten erkennen, die eine Bestimmung von hydraulischen Durchlässigkeiten im Grundgebirge mit sich bringt. Die Heterogenität der Kluftgrundwasserleiter macht eine Übertragbarkeit von punktuellen Messwerten auf regionale Gesteinseigenschaften quasi unmöglich. Die Durchlässigkeiten können nur im Bereich von Größenordnungen abgeschätzt werden. Trotzdem konnte STOBER (1995) in ihren Untersuchungen zeigen, dass die Gneise des Schwarzwaldes in ihrer hydraulischen Durchlässigkeit mit der Tiefe abnehmen, während ein solcher Trend für die Granite nicht nachzuweisen ist. Auch liegen die  $k_f$ -Werte der Gneis-Gebirge ( $5 \cdot 10^{-8}$  m/s) im Mittel um ca. eine halbe Größenordnung unter denen der Granitgebirge ( $9,5 \cdot 10^{-7}$  m/s). Diese Unterschiede im hydraulischen Verhalten beziehen sich auf die durch Pumpversuche zu ermittelnden Eigenschaften bis in eine Tiefe von 700 m. Die im Granit sehr homogen verteilten Abkühlungsklüfte mit Kluftdichten von  $< 1$  m stehen dabei den Trennflächen im Gneis gegenüber, welche durch Foliation und Mineralzusammensetzung vorgezeichnet sind und in Oberflächennähe in stärkerem Maße eine Aufweitung durch Entlastung und Verwitterung erfahren. Zudem zeichnet sich Granit durch eine höhere Rigidität als Gneis aus, die unter tektonischen Bewegungen zu einer intensiveren Klüftung der Granite führt. Neben den Klüften bieten im Schwarzwald-Kristallin auch Störungen Wasserwegsamkeiten, die die hydrau-

liche Durchlässigkeit des Gebirges erheblich erhöhen können. Dabei sind die eigentlichen Bewegungsflächen oft durch Gesteinsmehl abgedichtet, während die unmittelbar an die Störung grenzenden Gesteinsbereiche durch ihre Zerrüttung erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen. Demnach können Störungszonen hydrogeologisch sowohl stauende als auch wasserleitende Funktion, und in häufigen Fällen sogar beide Funktionen gleichzeitig erfüllen. Vor allem Kreuzungsbereiche mehrerer Störungen werden von ausgeprägten Zerrüttungsbereichen begleitet und bilden damit bevorzugte Wasserwegsamkeiten. Der heutige Spannungszustand mit NW-SE-Kompression fördert prinzipiell die Öffnung NW-SE-streichender Trennflächen, während NE-SW-streichende Klüfte eher als geschlossen gelten. Diese Vorstellung ist unter anderem durch Messungen an der Oberfläche und Daten aus den Tiefbohrungen bei Soultz-sous-Forêt belegt und betrifft sowohl den eigentlichen Oberrheingraben wie auch die angrenzenden Kristallingebiete. BÄCHLER (2003) stellt in ihrer Arbeit die wesentliche Bedeutung von Störungen parallel zum Oberrheingrabenrand für die Thermalwasserkonvektion dar. Die N-S-verlaufenden Störungssysteme würden die Ausbildung der thermalen Anomalien des zentralen Oberrheingrabens bei Speyer, Landau und Soultz-sous-Forêt durch Grundwasserzirkulation ermöglichen. Diese Störungen streichen etwa normal zur gegenwärtigen Hauptspannung und sollten daher nicht als offene Trennflächen in Erscheinung treten. Die begleitenden Zerrüttungszonen und Riedel-Scherflächen könnten jedoch die Durchlässigkeiten derart erhöhen, dass die Ausbildung von Konvektionszellen möglich wird.

Die Grundwasserströmung im westlichen Schwarzwald verläuft allgemein in Richtung des topographischen Gradienten und damit von den Höhen des Schwarzwaldes westwärts zum Oberrheingrabenrand. Die mittleren Jahresniederschläge betragen in der Oberrheinebene um 700 bis 950 mm/a und im Schwarzwald 1000 bis >2000 mm/a, ansteigend mit zunehmender Höhe. Die von ARMBRUSTER (2002) ermittelte Grundwasserneubildung liegt im Schwarzwald bei 300 bis 400 mm/a. Ein großer Teil der infiltrierenden Wässer tritt nach relativ kurzer Fließstrecke und Verweildauer (<5 km, <5 Jahre) an Quellen wieder aus. Diese Quellen liegen zum einen am Ausstrich der Buntsandstein-Schichten und stellen typische Schichtquellen dar. Zum anderen treten kalte Quellen als Kluft- und Störungsquellen im kristallinen Grundgebirge aus. Neben diesen flachen Grundwasserzirkulationen weisen die am Rand des Schwarzwaldes austretenden temperierten und hochmineralisierten Wässer auf tiefreichende Zirkulationen hin. Ein geringer Teil der Grundwasserneubildung gelangt durch den gering durchlässigen Kluftgrundwasserleiter

des Schwarzwald-Kristallins in Tiefen von bis zu 3400 m, wie Geothermometerberechnungen an den Thermalwässern zeigen (STOBER 1995). In diesen Tiefen herrschen gespannte Grundwasserverhältnisse, und die komplexe Vernetzung der wasserwegsamen Klüfte und Störungen bedingt die für Kluftgrundwasserleiter typische heterogene Verteilung der Druckhöhen, die keine zusammenhängende Druckfläche bilden. Verweildauer und Fließstrecke der Grundgebirgswässer ist wesentlich länger und kann nach  $^{14}\text{C}$ -Datierungen bis zu 26.500 Jahre betragen (BENDER 1995 für Friedrichsstollen Baden-Baden). Der Feststoffgehalt, der durch  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  dominiert wird, steigt durch lang andauernde Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen bis auf 3 g/l in Baden-Baden. Angetrieben durch den hydraulischen Gradienten, der durch die Geländemorphologie bestimmt wird, sowie durch die Dichteunterschiede der im Untergrund aufgeheizten Wässer gegenüber den flachen Grundwässern, kommt es am Oberrheingrabenrand zum Aufstieg der Grundgebirgswässer. Die komplexe Situation von stauenden und wasserleitenden Gesteinsbereichen, vor allem geprägt durch Störungen, ermöglicht an ausgewählten Orten den konzentrierten und schnellen Grundwasseraufstieg von schließlich bis zu 70 °C heißen Quellwässern (Höllquelle in Baden-Baden).

## 2 METHODIK

### 2.1 Grundlagen der numerischen Modellierung

Zur quantitativen Bearbeitung räumlicher Grundwasserströmungs- und Transportprobleme stehen prinzipiell analytische und numerische Methoden zur Verfügung. Die analytischen Lösungsverfahren liefern geschlossene Lösungen, sind jedoch nur auf einfach strukturierte Problemstellungen anwendbar (KLINGER 2003). Voraussetzungen sind zum Beispiel die Isotropie, Homogenität und unendliche Ausdehnung des betrachteten Grundwasserleiters (KINZELBACH et al. 1995). Numerische Methoden basieren auf der Diskretisierung von Raum und Zeit in Elemente bzw. Zeitschritte, die jeweils als Kontinuum betrachtet werden. Für diese Kontinua werden iterativ Differentialgleichungen gelöst, welche aus Gesetzen der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung resultieren. Die Diskretisierungsverfahren und ihre numerischen Lösungsansätze werden u.a. in Finite Differenzen und Finite Elemente unterschieden.

#### 2.1.1 Finite Elemente Methode

Erste Arbeiten zur Finite Elemente Methode stammen aus den späten 60er Jahren (z. B. ZIENKIEWICZ et al. 1966, PRICE et al. 1968). Im Vergleich zur Finite Differenzen Methode, die auf quaderförmige Zellen beschränkt ist, ist hier auch die Bearbeitung komplexer Modellräume möglich. So können z.B. unregelmäßig geformte Einzugsgebiete, heterogene und anisotrope Grundwasserleiter oder hochaufgelöste Detailbereiche in großen Modellgebieten dargestellt werden.

Numerische Modelle auf Grundlage der Finite Elemente Methode werden in der Hydrogeologie zur Simulation von Strömungsprozessen, (reaktivem) hydrochemischem Transport und Wärmetransport eingesetzt, wobei je nach Software die einzelnen Prozesstypen nebeneinander betrachtet oder miteinander gekoppelt werden. Prinzipiell werden Startbedingungen, Randbedingungen sowie Materialparameter vorgegeben. Im eigentlichen Simulationsvorgang werden die Stoff- und Energiebilanzen für den Modellraum und die vorgegebenen Zeitschritte berechnet. Auf diese Weise ist es möglich, den gegenwärtigen Zustand oder Szenarien aus der Vergangenheit nachzubilden,

aber auch zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren. Die bearbeiteten Fragestellungen können dabei sehr verschieden sein. Derzeit liegen die Hauptanwendungen numerischer Grundwassermodelle in den Bereichen Altlastensanierung bzw. -überwachung, Trinkwassergewinnung und Wasserhaltung bei Bauvorhaben. Aber auch für geothermische Probleme kommen verstärkt numerische Modelle nach der Finite Elemente Methode zum Einsatz.

## **2.2 Auswahl der Software**

### **2.2.1 Auswahlkriterien**

Jedes Softwarepaket, das zur Erstellung numerischer Modelle dient, hat einen eigenen Schwerpunkt. Häufig wurden Programme für eine bestimmte Fragestellung im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt und im Laufe weiterer Projekte und Problemstellungen erweitert, um den jeweils neuen Anforderungen der Fragestellung zu genügen. So wurden zum Beispiel FEFLOW ursprünglich zur Simulation von Strömungsprozessen in Porengrundwasserleitern, SHEMAT zur Bearbeitung reaktiven Transports für geothermische Fragestellungen und Rockflow/GeoSYS für Strömung und Transport in Kluftgrundwasserleitern entwickelt. Zu allen drei Programmpaketen finden sich im nächsten Abschnitt Erläuterungen. Auch wenn derzeit verschiedene Softwarepakete mit umfangreichen Modulen ausgestattet ist, ist doch keines der verfügbaren Pakete in der Lage, alle denkbaren hydrogeologischen Fragestellungen auf ideale Weise umzusetzen. Aus diesem Grund fand auch im Vorfeld der hier präsentierten Untersuchungen eine Testreihe und die Auswahl der geeigneten Software statt.

Als Auswahlkriterien standen dabei folgende Ansprüche im Vordergrund: Die numerischen Modelle sollten dreidimensional und instationär zu berechnen sein und sowohl Strömung als auch Wärmetransport simulieren. Die Strömungsparameter sollten an die Temperatur gekoppelt sein. Der Modellansatz sollte auch für Kluftgrundwasserleiter gültig sein. „Bugs“ sowie numerische Instabilitäten galt es weitestgehend zu vermeiden. Und schließlich sollte die Bedienung möglichst einfach und gut dokumentiert sein.

### 2.2.2 Getestete Programme

Auf dem Weg zur Auswahl der Software FEFLOW wurden verschiedene Programme in Betracht gezogen und zum Teil ausführlich getestet. Die Eigenschaften dieser Programme sollen mit Bezug auf die konkrete Fragestellung im Folgenden kurz dargestellt werden.

#### 2.2.2.1 SHEMAT

Der Simulator for **HE**at and **MA**ss Transport SHEMAT wurde 1988 aus Vorgänger-Programmen des USGS unter der Federführung von PROF. DR. CHRISTOPH CLAUSER entwickelt. Es ist eine auf reaktiven Transport heißer Grundwässer spezialisierte Software, die vor allem für Untersuchungen geothermaler Reservoirs einsetzbar ist. Basierend auf der Finite Differenzen Methode sind die für Porengrundwasserleiter geltenden Strömungs- und Transportgesetze integriert. SHEMAT ist benutzerfreundlich aufgebaut und in Form eines Buches (CLAUSER 2003) relativ ausführlich dokumentiert. Die Temperatur ist standardmäßig voll gekoppelt an Fluiddichte und –viskosität. Die Simulationen sind 2- oder 3-dimensional, stationär oder instationär möglich. In SHEMAT beginnt der Modellaufbau gewöhnlich mit einem rein konduktiven Wärmetransportmodell, auf welches in einem zweiten Schritt die Grundwasserströmung aufgesetzt wird.

Nachteilig für die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Fragestellung ist die geringe Flexibilität in der räumlichen Diskretisierung, die durch die finiten Differenzen auf quaderförmige Elemente beschränkt ist. Eine Oberfläche des Modells auf Höhe der natürlichen Geländekante kann damit ebenso wenig erzeugt werden wie einzelne, feiner diskretisierte Bereiche. Unter anderem aufgrund dieser Probleme ist die Simulation der Strömungsprozesse im dreidimensionalen Raum nur vereinfacht möglich. Schnelle Wechsel der  $k_f$ -Werte und damit der Fließgeschwindigkeiten auf kleinem Raum können nicht dargestellt werden. Dies ist vor allem im Aufstiegs- und Quellbereich der bearbeiteten Thermalwasserstandorte problematisch.

Die Kopplung der Temperatur kann nicht ausgeschaltet werden, so dass ein Vergleich zwischen gekoppelter und ungekoppelter Simulation unmöglich ist. Ein weiterer, sehr bedeutender Nachteil von SHEMAT liegt in der geringen numerischen Stabilität. Um ungeklärte Programmabstürze zu vermeiden und die Modellparameter kontrollieren zu können, sind sehr viele Einzelschritte auf dem Weg zum komplexen Ergebnismodell notwendig. Trotzdem konnten

in den Testreihen häufige Programmabstürze nicht verhindert werden. Der Kalibriervorgang wird dadurch deutlich erschwert.

Obwohl sich SHEMAT zu Beginn der Dissertation besonders aufgrund der vollen Temperaturkopplung gegenüber den übrigen Programmen als sehr vorteilhaft darstellte, zeichneten sich im Verlauf der Testreihen doch spürbare Nachteile im Vergleich zu FEFLOW (siehe folgender Abschnitt) ab. Nachdem auch in FEFLOW die Temperatur- und Druckkopplung für größere Tiefen möglich wurde, fiel damit die Entscheidung zur Programmauswahl gegen SHEMAT aus.

#### 2.2.2.2 FEFLOW

Der Name FEFLOW leitet sich aus dem Begriff **Finite Element FLOW** ab. FEFLOW wird von der Firma WASY GmbH (PROF. H.-J. DIERSCH) in Berlin entwickelt, vertrieben und betreut. Im Bearbeitungszeitraum 2003-2005 wurde die jeweils aktuelle Versionen FEFLOW 4.8, 5.0, 5.1 bzw. 5.2 angewendet. FEFLOW ist ein Finite Elemente Programm, das 2- und 3-dimensionale, stationäre und instationäre, gekoppelte und ungekoppelte Simulationen zulässt. Es sind Grundwasserströmung, Massen- und Wärmetransport darstellbar. Auch in FEFLOW gelten dabei die Gesetze für Porengrundwasserleiter. Diskrete Elemente zur Darstellung einzelner Klüfte, Störungen oder Röhren können implementiert werden. Da FEFLOW schon seit Jahren weltweit in Gebrauch ist und professionell vertrieben wird, ist es bedienerfreundlich aufgebaut, weist relativ wenige „Bugs“ auf und zeichnet sich durch eine sehr robuste numerische Stabilität aus. Die Dokumentation in Form von Handbüchern und wissenschaftlichen Publikationen ist ausführlich und die Firma WASY bietet einen kompetenten Service über Hotline und Email an. Mit Ausnahme der Strömungsgesetze für Kluftgrundwasserleiter, die in FEFLOW noch nicht zufriedenstellend für große Gebiete implementiert sind, erfüllt das Programm damit die gestellten Anforderungen. Die weiteren, im folgenden Abschnitt beschriebenen, Programme weisen jeweils größere Schwächen in Bezug auf die Auswahlkriterien auf. Nicht zuletzt konnte am Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe auf einen großen Erfahrungsschatz durch die jahrelange Anwendung von FEFLOW als auch auf die entsprechenden Softwarelizenzen zurückgegriffen werden. Daher wurde FEFLOW als das am besten für die Fragestellung geeignete Softwarepaket ausgewählt.

### 2.2.2.3 Weitere Programme

*RockFlow*, heute als *Geosys* bezeichnet, entstand Mitte der 80er Jahre an der Universität Hannover und unterliegt seitdem der beständigen Weiterentwicklung mit Schwerpunkt derzeit an der Universität Tübingen unter PROF. DR. OLAF KOLDITZ. Es ist ein Finite Elemente Code, der Grundwasserströmung, Wärme- und Stofftransport sowie ausgewählte Deformationsvorgänge darstellen kann. Klüfte können implementiert werden, und die Simulation ist auch non-linear für gekoppelte Prozesse möglich. Die Bedienung ist weniger benutzerfreundlich als bei *SHEMAT* oder *FEFLOW*. Aktuell wäre das Programm prinzipiell gut geeignet, die vorliegende Fragestellung umzusetzen, wie auch die Arbeit von SAWARIEH (2005) über Thermalquellen in Jordanien beweist. Zu Beginn der vorliegenden Dissertation war jedoch gerade das gekoppelte Wärmetransportmodul noch im Aufbau begriffen, so dass die Entwicklung der numerischen Modelle nur in enger Zusammenarbeit mit den Programmentwicklern und unter entsprechender Zeitverzögerung möglich gewesen wäre. Zudem war 2003 noch nicht abzusehen, ab wann und mit welcher Leistungsfähigkeit die gekoppelte Wärmetransportsimulation implementiert werden würde. Gerade in dieser Arbeit mit dem deutlichen Schwerpunkt auf der numerischen Modellierung sollte ein bereits fertiggestelltes Programm zur Anwendung kommen, so dass in dem Fall *FEFLOW* vorgezogen wurde.

*FRACTure* ist ebenfalls ein Finite Elemente Programm, das unter der Leitung von DR. THOMAS KOHL an der ETH Zürich entwickelt wurde. Der Name steht als Akronym für **Flow Rock and Coupled Temperature effects**. Mittlerweile ist die Software in der Lage, Grundwasserströmung, chemischen und Wärmetransport sowie Deformation zu simulieren. Der Schwerpunkt dieses Programmcodes liegt in der Simulation von Festgesteinsgrundwasserleitern mit den entsprechenden Fließ- und Transportgesetzen. Auch in diesem Fall wäre *FRACTure* durchaus gut geeignet, die Problematik der Thermalwässer am Oberrheingrabendrand zu bearbeiten, jedoch ist das Programm noch nicht ausgereift genug, um alle notwendigen Programmeigenschaften, eine benutzerfreundliche Bedienung, ausreichende Dokumentation und numerische Stabilität zu gewährleisten. Mit fortschreitender Entwicklung und in Zusammenarbeit mit den Programmentwicklern bietet *FRACTure* zukünftig gute Chancen, ähnlich gelagerte Fragestellungen in Festgesteinen sinnvoll zu bearbeiten.

*TOUGH2* wurde von PROF. DR. KARSTEN PRUESS an der Universität Berkeley entwickelt. Es ist ein Finite Differenzen Programm zur Bearbeitung von

Strömung und Wärmetransport in porösen und doppelt-porösen Medien. Da der Schwerpunkt wie bei SHEMAT auf geothermischen Fragestellungen liegt, sind Wärmetransportprozesse und Temperaturkopplung gut implementiert, während die hydraulischen Prozesse gerade aufgrund der eingeschränkten Geometrie nur vereinfacht dargestellt werden können.

*MODFLOW* als weltweit verbreitetes, weit entwickeltes Grundwassersimulations-Paket des USGS ist ein Finite Differenzen Programm, das auf Strömungs- und chemische Transportprozesse spezialisiert ist. Neben weiteren Schwachpunkten ist es (noch) nicht in der Lage, Wärmetransport zu simulieren und wird daher für die vorliegende Fragestellung nicht in Betracht gezogen.

## 2.3 Das Programm FEFLOW

An dieser Stelle werden die wichtigsten Grundgleichungen und Merkmale der Software FEFLOW erläutert, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit Anwendung fanden. Für detailliertere Ausführungen zu den Grundlagen, der Bedienung oder zusätzlichen Anwendungsmöglichkeiten sei auf die Handbücher der Firma WASY GmbH verwiesen (DIERSCH 2005).

### 2.3.1 Grundlegende Gleichungen

Prinzipiell beruht die in FEFLOW umgesetzte Methode auf einer Diskretisierung des Raumes unter Erzeugung eines Gitternetzes. Nach dem GALERKIN Verfahren werden die Systemgleichungen für die einzelnen Knoten dieses Gitternetzes für jeden Zeitschritt aus den Massenbilanzen der angrenzenden Zellen gewonnen (DIERSCH 2005). Die Modellgrößen (z.B. Grundwasserdruckhöhe und Temperatur) werden iterativ errechnet, und zwischen den Knotenpunkten erfolgt eine lineare Interpolation der Werte. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung übt einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse aus und muss bestimmte Voraussetzungen erfüllen, um numerische Dispersion oder Oszillationen durch zu große Gitterabstände oder Zeitschritte zu vermeiden. Diese Problematik wird unter anderem durch die folgenden Kriterien beschrieben.

Das COURANT-Kriterium beschreibt das Verhältnis aus Raum- und Zeitdiskretisierung zur Strömungsgeschwindigkeit. Die simulierte Fließgeschwindigkeit

muss demnach größer als der Gitterabstand pro Zeitschritt sein (KOLDITZ 1997, WITTHÜSER 2002):

$$Cr = \left| \frac{v\Delta t}{\Delta x} \right| \leq 1 \quad . \quad (2-1)$$

Das PECLLET-Kriterium beschränkt die Gittergröße im Verhältnis zur longitudinalen Dispersionslänge (WITTHÜSER 2002):

$$Pe = \frac{\Delta x}{\alpha_L} < 2 \quad . \quad (2-2)$$

Das NEUMANN-Kriterium verhindert eine Umkehr des Konzentrationsgradienten zwischen benachbarten Zellen durch dispersiven Transport (WITTHÜSER 2002):

$$\frac{D}{\Delta x^2} \Delta t \leq \frac{1}{2} \quad . \quad (2-3)$$

Zusätzlich dazu gibt das DELAUNEY-Kriterium für dreieckige Zellen vor, dass der Umkreis einer Zelle keine benachbarte Zelle völlig umschließen darf. Tritt dieser Fall ein, so kann es zu numerischen Problemen kommen, weil die Bilanzgleichungen der einzelnen Zellen unter Umständen nicht unterschieden werden können. Problematisch können außerdem sehr spitz- oder sehr stumpfwinklige Zellen sein, wenn sie in Bereichen von Diskontinuitäten der Materialeigenschaften liegen.

Mathematische Grundlage der Systemgleichungen in FEFLOW sind die Erhaltungsgesetze für Masse, Impuls und Energie. Das Gesetz der Massenerhaltung für die Strömung wird durch die sog. Kontinuitätsgleichung umgesetzt. Die in ein bestimmtes Volumenelement hineinströmende Masse des Fluids muss gleich der ausströmenden und der eventuell im Element gespeicherten Masse sein (DIERSCH 2005):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon\rho v_i) = \varepsilon\rho Q_\rho \quad . \quad (2-4)$$

Die Massenerhaltung für den Transport gelöster Stoffe beinhaltet den advektiven und dispersiven Transport über die Elementränder sowie einen Term für Reaktions- bzw. Retardationsvorgänge. Diese Massenänderungen gleichen in ihrer Summe die zeitliche Änderung des Stoffinhaltes in dem Volumenelement aus. Die Bilanzgleichung kann allgemein für einen Stoff  $k$  der Konzentration  $c_k$  folgendermaßen formuliert werden (DIERSCH 2005):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon c_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon v_i c_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{ik}) = \varepsilon R_k \quad (2-5)$$

Der Impulserhaltungssatz bringt die Permeabilität, die dynamische Viskosität und den Druck in die Gleichungssysteme ein (DIERSCH 2005):

$$v_i + \frac{K_{ij}}{\varepsilon \mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} - \rho g_j \right) = 0 \quad (2-6)$$

Hinzu kommt der Energieerhaltungssatz, der analog zum Massenerhaltungssatz für den Stofftransport heißt (DIERSCH 2005):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon \rho v_i E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}) = \varepsilon \rho Q_T \quad (2-7)$$

Neben diesen vier allgemeinen Grundgleichungen (2-4) bis (2-7) gelten weitere wichtige Gleichungen für die einzelnen behandelten Prozesse. So kann der Wärmetransport in Advektion, Konduktion und Strahlung unterteilt werden. Für geologische Fragestellungen ist die Strahlung dabei vernachlässigbar. Advektion ist der Transport von Wärme durch Grundwasserströmung, angetrieben durch hydrostatische Potentialdifferenzen. Die Advektion wird dann als (freie) Konvektion bezeichnet, wenn diese Potentialdifferenzen durch Dichteunterschiede hervorgerufen werden. Die Konduktion oder Wärmeleitung wird durch den Temperaturgradienten und die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins oder Fluids bestimmt:

$$j_{iT} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-8)$$

Das FOURIER'sche Gesetz erweitert den Konduktionsterm um die thermische Dispersion mit den Dispersionslängen in longitudinaler und transversaler Richtung  $\alpha_L$  und  $\alpha_T$  (DIERSCH 2005):

$$j_{iT} = -\varepsilon \left[ (\lambda + c\rho\alpha_T V) \delta_{ij} + c\rho(\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{V} \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (2-9)$$

Wird ein 2-Phasen-System aus Wasser und Gestein betrachtet, so kann die Grundwasserströmung in homogenen, isotropen Medien durch das DARCY-Gesetz beschrieben werden:

$$Q = k_f \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta h}{\Delta l} = i \quad (2-10)$$

Aus dieser Beziehung ergeben sich die Darcy-Geschwindigkeit:

$$v_{Darcy} = \frac{Q}{A} = k_f \cdot i \quad (2-11)$$

sowie der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bzw. die Permeabilität  $K$ :

$$k_f = \frac{K \rho_0 g}{\mu_0} \quad (2-12)$$

Je nach betrachtetem Volumen des natürlichen Untergrundes beschreibt der Durchlässigkeitsbeiwert Gesteinsdurchlässigkeit oder Gebirgsdurchlässigkeit. Die Gesteinsdurchlässigkeit ergibt sich aus Untersuchungen kleiner Volumina. Sie beinhaltet die Eigenschaften der Gesteinsmatrix selbst in ihrer Kompaktheit und mit ihren Porenräumen und Heterogenitäten. Die Gebirgsdurchlässigkeit dagegen ist auf große Volumina bezogen und betrifft damit neben der Gesteinsmatrix auch die Klüfte, Störungszonen, Schichtflächen etc., welche die hydraulischen Eigenschaften des gesamten Gebirgskomplexes mit bestimmen. Durchlässigkeitsbeiwert und Permeabilität stellen im eigentlichen Sinne Tensoren dar, welche die Anisotropie dieser Größen ausdrücken. Anisotropie kann in FEFLOW in Form von richtungsabhängigen  $k_f$ -Werten angegeben werden, die jeweils achsenparallel zum kartesischen Koordinatensystem xyz gelten.

### 2.3.2 Das Modellkonzept der Makroskala

Der Modellansatz und die Gewichtung der einzelnen Gleichungen aus dem vorhergehenden Abschnitt ergeben sich aus dem Konzeptmodell und sind abhängig von der betrachteten Skala. Das numerische Modell von Strömungs- und Wärmetransportvorgängen in einem Laborversuch an einem Bohrkern unterscheidet sich in den angewandten Gesetzen stark von einem Makroskalenmodell. Dabei gelten zwar die gleichen Grundgleichungen, aber so wie in natürlichen Systemen je nach betrachteter Skala verschiedene Prozesse dominieren, müssen auch in den numerischen Modellkonzepten unterschiedliche Schwerpunkte verfolgt werden. Von großer Bedeutung ist dabei aufgrund der Komplexität der natürlichen Systeme, an welcher Stelle Vereinfachungen und Abstraktionen erfolgen. Die Besonderheiten, die sich für die Makroskala bei Kluffgrundwasserleitern ergeben, werden im Folgenden ausgeführt.

Nach DIETRICH et al. (2005) kann man bei den skalenabhängigen Modellkonzepten zwischen very near field, near field, far field und very far field unterscheiden. Die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Modelle sind aufgrund

ihres Maßstabes dem very far field zuzuordnen. Nach BEAR (1993) ist auch für Kluftgrundwasserleiter damit eine modelltechnische Betrachtung als heterogenes, anisotropes Kontinuum möglich. Kluftgrundwasserleiter in kleineren Skalen sind demgegenüber stark von den Kluftigenschaften (Kluftnetz, Öffnungsweite, Rauigkeit) beeinflusst und müssen durch Doppelkontinuums- oder diskrete Ansätze bearbeitet werden. Die Maßgabe eines Repräsentativen Elementarvolumens (REV), die für ein Kontinuumsmodell gilt, ist für die bearbeiteten Standorte erfüllt, weil die Gebiete groß genug sind, um Heterogenitäten der Mikroskala vernachlässigen zu können, und andererseits klein genug sind, um einen geologisch relativ einheitlichen Aufbau zu besitzen.

Aufgrund der Größe der Modellgebiete ist der Ansatz über das Strömungsgesetz nach DARCY gültig, obwohl für Strömung in Spalten, wie sie in kleinskalig betrachteten Kluftgrundwasserleitern dominiert, andere Beziehungen gelten. Diese Effekte der near field Skala sind in großen Gebieten mit geringem Kluftabstand und relativ homogenem Kluftnetz zu vernachlässigen. In der großen Skala werden damit offene und miteinander vernetzte Klüfte mathematisch als ein homogenes, isotropes Medium behandelt, für welches das DARCY-Gesetz angewendet werden kann.

Die mechanische Dispersion gewinnt als skalenabhängige Größe mit zunehmender Gebietsgröße an Bedeutung. Sie bewirkt eine Ausweitung der advektiv erzeugten Stoff- oder Wärmefahne nach vorn und lateral (Abb. 2a). In Kluftgrundwasserleitern erzeugt die Dispersion durch die räumliche Verschneidung der Einzelklüfte ebenfalls eine Ausweitung der Stoff- oder Wärmefahne, die hier stärker von den bevorzugten Wasserwegsamkeiten der durchlässigsten Klüfte geprägt ist (Abb. 2b). Je nach struktureologischen Gegebenheiten, vor allem Lage, Häufigkeit und Vernetzungsgrad der Klüfte, kann die Stoff- oder Wärmeausbreitung jedoch neben der Dispersion verstärkt durch den Verlauf der Hauptklüfte bestimmt sein, so dass eine entsprechend gegenüber Abb. 2b veränderte Stoff- und Wärmeverteilung resultiert (Abb. 2c).

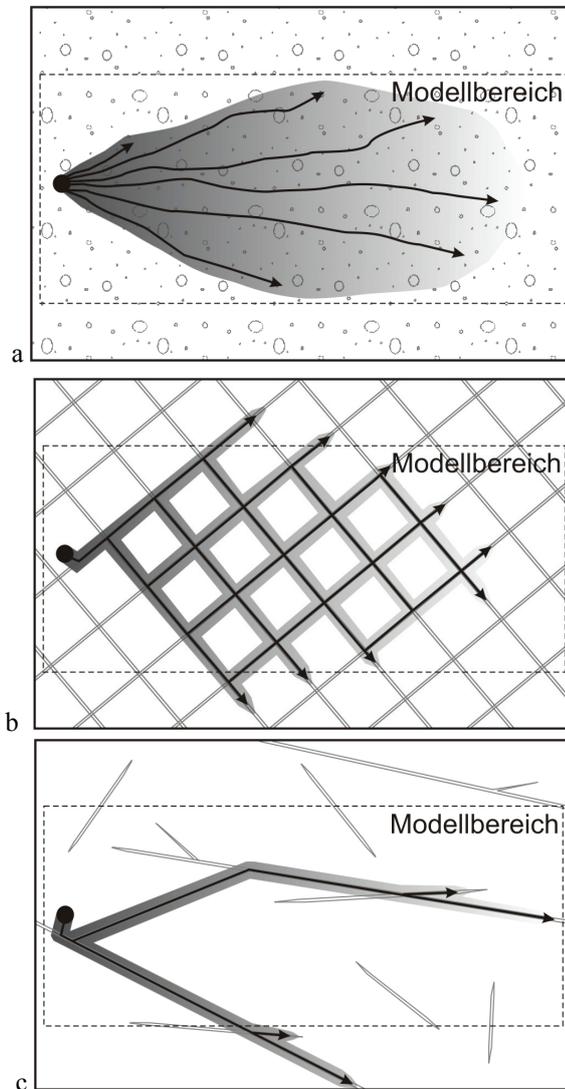


Abb. 2a-c: Auswirkungen der mechanischen Dispersion in a) Porengrundwasserleitern, b) Kluftgrundwasserleitern und c) unter speziellen strukturgeologischen Voraussetzungen in Kluftgrundwasserleitern (Erläuterung siehe Text)

Aufgrund der geringen Kenntnisse über die Charakteristik der Dispersion in den Untersuchungsgebieten müssen die entsprechenden Effekte im Rahmen dieser Arbeit zunächst vernachlässigt werden.

### 2.3.3 Numerische Parameter

Das Programm FEFLOW stellt zur Lösung der numerischen Gleichungssysteme verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl. Wie in den vorhergehenden Abschnitten sollen auch an dieser Stelle nur die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendeten Gleichungslöser und Fehlernormen aufgeführt werden.

Der genormte Fehler zur Bestimmung der Konvergenzkriterien der Lösung des gesamten Modellproblems wird durch die Euklidische L2 Integral Errornorm (RMS) ermittelt. Dabei werden die Differenzen der Ergebniswerte (z.B. Grundwasserdruckhöhen) zwischen zwei Iterationsschritten über den Maximalwert der Start- oder Randbedingungen normiert. Es ergibt sich daraus die Abhängigkeit dieses Normfehlers von der topographischen Höhe, so dass ein Fehler von z.B.  $10^{-3}$ , wie er standardmäßig vorgegeben ist, auf Meereshöhe wesentlich genauere Lösungen produziert als auf Hochgebirgsniveau.

Sofern die Modelllösung den normierten Fehler nicht erfüllt, muss eine erneute Iterationsschleife berechnet werden. Die Gesamtzahl dieser Iterationen liegt per default bei 12. Sie wird normalerweise nur erreicht bzw. überschritten, wenn das Modellproblem sehr komplex und/oder schlecht parametrisiert ist. Unter Umständen kann es in diesem Fall nicht zu einer Konvergenz kommen.

Die Gleichungslöser selbst unterscheiden sich je nach zu lösender Matrix. Die Systemgleichungen bilden Matrizen, welche iterativ gelöst werden. Die Strömungsgesetze können in symmetrischen Matrizen dargestellt werden, für die die sog. Preconditioned Conjugate Gradient Methode (PCG) angewendet werden kann. Die Vorkonditionierung erfolgt durch „Incomplete Factorization“ mit einem Abbruch-Kriterium von standardmäßig  $10^{-9}$ . Asymmetrische Gleichungssysteme, wie sie für den Transport notwendig sind, werden mit der Preconditioned Lanczos – Postconditioned Bi-Conjugate Gradient Stable Methode berechnet. Auch hier wird die „Incomplete Factorization“ zur Vorkonditionierung eingesetzt, und das Abbruchkriterium liegt bei  $10^{-8}$ .

Zur Stabilisierung der gekoppelten Wärmetransportmodelle und zur Verhinderung numerischer Oszillationen wird eine künstliche Dispersion eingeführt. Diese leichte numerische Dispersion, als Streamline Upwinding bezeichnet, verbessert die Berechnungen vor allem an scharfen Übergängen von Materialparametern und an der Ausbreitungsfront einer Wärmefahne.

### 2.3.4 Randbedingungen und Nebenbedingungen

Wichtigstes Element der numerischen Modellberechnungen ist neben dem Modellraum und den Materialparametern die Konfiguration der Rand- und Nebenbedingungen. Diese Vorgaben bestimmen die Funktion der Modellränder, die geschlossen sein oder die Möglichkeit zum Massenzustrom oder -abstrom bieten können. Sofern in FEFLOW keine Randbedingungen deklariert werden, gelten die Modellränder als geschlossen, und es können weder Wasser noch hydrochemische Stoffe oder Energie über diese Ränder hinweg transportiert werden. Die in den vorliegenden numerischen Modellen angewendeten Randbedingungen sind:

Randbedingung 1. Art: (DIRICHLET) Konstante Grundwasserdruckhöhe/Temperatur

An einer Modellgrenze gilt eine festzulegende Grundwasserdruckhöhe bzw. Temperatur. Es sind sowohl Zu- als auch Abflüsse möglich, deren Höhe von den angrenzenden Materialparametern ( $k_f$ -Wert bzw. Wärmeleitfähigkeit) und dem Potentialunterschied bestimmt wird. Es wird jeweils so viel Wasser oder Wärme ein- bzw. ausgeführt, dass die vorgegebene Randbedingung erfüllt ist. Bei Strömungs- und Wärmetransportmodellen kann die Grundwasserhöhe an einem Rand festgehalten werden, an dem keine Wärme-Randbedingung gesetzt ist. Die Temperatur wird dann durch das Modell errechnet. Andererseits können auch nur die Temperatur oder beide Parameter – Temperatur und Grundwasserdruckhöhe – durch eine Randbedingung festgelegt werden.

Randbedingung 2. Art: (NEUMANN) Zu- oder Abfluss von Wasser/Wärme

Die Modellgrenze bekommt eine Durchflussrate zugewiesen, deren Richtung – modelleinwärts oder -auswärts – angegeben werden kann. Die Durchflussmenge an Wasser bzw. Energie ist damit vorgegeben, und die Materialparameter und Potentialdifferenz bestimmen die resultierende Grundwasserdruckhöhe bzw. Temperatur.

Randbedingung 3. Art: (CAUCHY) Transfer von Wasser oder Wärme durch eine halbdurchlässige Schicht

Vor allem für die Darstellung von Vorflutern wird die sogenannte Transfer-Randbedingung eingesetzt. Festgelegt werden die (Grund-) Wasserhöhe und, in Form einer Transferrate, die Durchlässigkeit einer Kolmationsschicht. Die-

se kann nach außen bzw. innen verschieden sein. Die Durchflussrate wird durch das Programm berechnet.

Randbedingung 4. Art: Bohrung mit Förderrate und –Temperatur

Einzelne Knoten innerhalb des Modellraumes können für die Grundwasserströmung bzw. den Wärmetransport geöffnet werden, indem eine Randbedingung 4. Art vorgegeben wird. Diese regelt die Förder- bzw. Injektionsrate sowie die Temperatur des geförderten oder injizierten Wassers. Liegen mehrere Bohrungs-Knoten direkt übereinander, so muss bestimmt werden, ob diese als zusammenhängende Bohrung oder als Einzelknoten behandelt werden sollen. In den vorliegenden numerischen Modellen gilt ersteres, das heißt, die Einzelknoten werden durch ein finites Element mit hoher Durchlässigkeit verbunden. Die Förderraten aller benachbarten Knoten werden addiert und je nach  $k_f$ -Wert der angrenzenden Schichten auf die Einzelknoten verteilt. Die resultierenden Grundwasserdruckhöhen sind für alle Knoten gleich und können, ebenso wenig wie die Einzel-Förderraten, nicht ausgelesen werden.

### 2.3.5 Temperaturkopplung von Dichte und Viskosität

Bei der Bearbeitung von Thermalwassersystemen in großen Tiefen gewinnen auch Temperatureffekte an Bedeutung, die für die flache Grundwasserzirkulation zu vernachlässigen sind. So nimmt die Dichte des Wassers durch seine Kompressibilität mit steigender Temperatur und sinkendem Druck ab. Die Viskosität des Wassers, die das Fließverhalten entscheidend beeinflusst, sinkt ebenfalls mit steigender Temperatur. Diese Effekte bewirken, dass Grundwasser in Tiefen von mehreren hundert bis tausend Metern leichter und fließfähiger als in der Nähe der Erdoberfläche ist. Die Dichteunterschiede können zum Antrieb einer freien Konvektion werden. In Abb. 3 und 4 sind die Abhängigkeiten von Dichte und Viskosität des Wassers von Druck und Temperatur dargestellt.

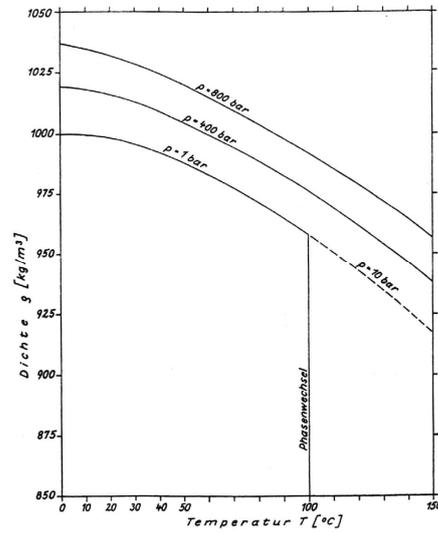


Abb. 3: Abhängigkeit der Dichte des Wassers von Temperatur und Druck (aus STÖBER 1994)

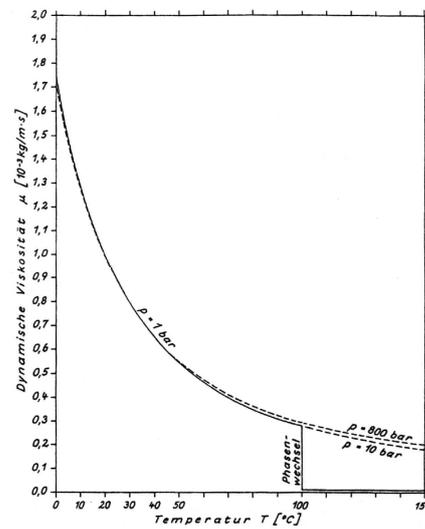


Abb. 4: Abhängigkeit der Viskosität des Wassers von Temperatur und Druck (aus STÖBER 1994)

Die Veränderung der Viskosität mit der Temperatur, die sog. Viskositätskopplung, ist in Form einer empirischen Polynombeziehung in FEFLOW als Option implementiert. Die Druckabhängigkeit ist so gering, dass sie für den Temperaturbereich bis 150 °C vernachlässigt werden kann.

Die Dichtekopplung an Temperatur und Druck ist nur für einen Temperaturbereich von 0 bis 100 °C in FEFLOW umgesetzt, weil bereits für die Formulierung der Abhängigkeit in dieser Temperaturspanne ein Polynom der 6ten Ordnung (nach PERROCHET, EPFL Lausanne, in DIERSCH 2005) nötig ist. MAGRI (2004) hat ein Modul zum Einsatz in FEFLOW entwickelt, welches die Dichtekopplung für einen Bereich von 0 bis 350 °C und 0 bis 100 MPa darstellt. Abb. 5 zeigt den Gültigkeitsbereich dieses Moduls.

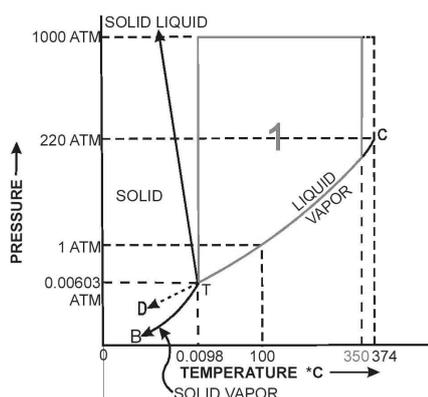


Abb. 5: Druck-Temperatur-Diagramm für Wasser mit dem Gültigkeitsbereich des  $\beta$ - $\gamma$ -Moduls von MAGRI (2004)

Sowohl bei der in FEFLOW implementierten Kopplung der Viskosität als auch bei der Dichtekopplung nach MAGRI (2004) werden die jeweiligen Eigenschaften des Wassers nach jedem Zeitschritt der neu errechneten Temperatur und ggf. dem Druck angepasst. Die Rechenzeit verlängert sich damit zum Teil erheblich, und die größere Komplexität des Systems bedingt numerische Instabilitäten, die nur durch eine entsprechend feine Diskretisierung und eine genau abgestimmte Parametrisierung kontrolliert werden kann.

## 2.4 Modellentwicklung

Die Entwicklung numerischer Modelle wird gewöhnlich, unabhängig von der verwendeten Software, nach bestimmten Prinzipien durchgeführt. Die allgemeine Vorgehensweise, die sich nach langjährigen Erfahrungen in der Praxis als sinnvoll herausgestellt hat, beginnt mit der Formulierung einer Fragestellung, die möglichst klar umrissen sein sollte, um eine gute Grundlage für Datenrecherche, Konzeptmodell und die Auswahl der Software zu bilden. Diese Schritte folgen in der genannten Reihenfolge. Das Konzeptmodell vereinigt die vorliegenden Daten und Informationen zu einem komplexen hydrogeologischen Modell, welches die Problemsituation qualitativ und – soweit bekannt – quantitativ beschreibt. Fragestellung und Konzeptmodell bestimmen weitgehend die Anforderungen an die eingesetzte Software, die aufgrund dieser Kriterien sorgfältig ausgewählt werden sollte. Für die Umsetzung des Konzeptmodells in ein numerisches Modell müssen weitere Abstraktionen und Vereinfachungen vorgenommen werden. In Vorstudien, in denen komplexe Probleme auf einzelne wenige Prozesse beschränkt werden oder dreidimensionale Situationen zunächst zweidimensional dargestellt werden, können die wesentlichen Prozesse und ihre Parameter herausgearbeitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in ein Ergebnismodell ein, welches die Fragestellung so komplex und wirklichkeitsgetreu wie möglich umsetzt. Die Kalibrierung unter Einsatz der vorliegenden Daten führt zu einer idealen Anpassung aller Modellparameter. In der darauf folgenden Sensitivitätsanalyse werden die Parameter einzeln auf ihren Einfluss im Gesamtmodell hin untersucht. Schließlich können, je nach Fragestellung, aus dem Ergebnismodell heraus verschiedene Szenarien mit z.B. unterschiedlichen Brunnenförderraten entwickelt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten numerischen Modelle sind nach der dargestellten allgemeinen Methodik entwickelt worden. Die spezielle Vorgehensweise in der Bearbeitung der Thermalwassergenese am Oberrheingrabenrand betrifft vor allem die Punkte Konzeptmodell, Vorstudien und Ergebnismodell. Dabei wurden die einzelnen Standorte nach jeweils gleicher Methodik bearbeitet, damit eine ideale Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Um die Wiederholung von gemeinsamen Einzelheiten der Parametrisierung und des Modellaufbaus in späteren Abschnitten zu vermeiden, sollen sie an dieser Stelle detaillierter erläutert werden.

### 2.4.1 Konzeptmodell

Die Kluftgrundwasserleiter im kristallinen Schwarzwald werden für die Standorte Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler als homogen und isotrop betrachtet, weil die Bearbeitungsskala groß genug ist, um Heterogenitäten durch verschiedene Kluftabstände, -öffnungsweiten und -vernetzungsgrade auszugleichen.

Grundsätzlich werden die meteorologisch gespeisten Wasserkreisläufe betrachtet und eventuelle Zuflüsse von Wasser oder Gas aus der unteren Erdkruste vernachlässigt. Zudem werden nur diejenigen Wassermengen in die numerischen Modelle integriert, die an den Thermalquellen und -bohrungen austreten oder unterirdisch abfließen. Grundwässer, die innerhalb der Modellgebiete an kalten Quellen austreten, werden nicht mit betrachtet. Diese Vereinfachung ist notwendig, um die mengenmäßig wenig bedeutende Tiefenzirkulation, welche zur Thermalwasserbildung führt, quantitativ untersuchen zu können. Die Quellschüttung der Thermalquellen macht im Verhältnis zur gesamten Grundwasserneubildung im jeweiligen mutmaßlichen Einzugsgebiet weniger als 2 % aus. Für Baden-Baden bestimmte z. B. SCHRAGE (2004) den Tiefenwasseranteil mit 1,2 % der Grundwasserneubildung nach ARMBRUSTER (2002). Die Auswirkungen der Tiefenwasserzirkulation sind in einem Gesamtmodell deshalb so gering, dass sie sich numerisch kaum abbilden lassen würden.

Eine weitere Gemeinsamkeit der Konzeptmodelle aller drei bearbeiteten Standorte ist die Fokussierung auf minimale Durchlässigkeiten. Bedingt durch die freie Konvektion, die durch temperaturinduzierte Dichteunterschiede hervorgerufen wird, kommt es zur Grundwasserzirkulation in den Bereichen, die durchlässig genug sind. So können sich z. B. entlang besonders wasserwegsamere Kluftzonen Konvektionszellen ausbilden, die keinen Einfluss auf das großskalig betrachtete Gesamtgebiet haben. Diese Konvektionen sollen in den numerischen Modellen verhindert werden, indem die minimalen  $k_f$ -Werte aller Modellbereiche eingesetzt werden. Ein wichtiger Grundsatz der Konzeptmodelle ist demnach der Schwerpunkt auf den Mindestdurchlässigkeiten, die aussagekräftiger sind, als  $k_f$ -Werte, welche numerisch instabile Konvektionen erzeugen.

### 2.4.2 Vorstudien

Auf dem Weg zum Ergebnismodell sind verschiedene Zwischenschritte notwendig, um die wesentlichen Prozesse und die Größenordnung der Parameter

einer Problemstellung kennen zu lernen. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die Standorte Ohlsbach, Baden-Baden und Badenweiler nacheinander bearbeitet. Aufgrund ihrer vergleichbaren geologischen und hydrogeologischen Situation waren dabei viele Erkenntnisse aus den jeweils vorhergehenden Modellen übertragbar. Während der Bearbeitung des ersten Standortes, Ohlsbach, wurde die Methodik entwickelt. Daher waren für das Modell Ohlsbach noch wesentlich mehr Vorstudien nötig, als dies bei den späteren Modellen Baden-Baden und Badenweiler der Fall ist. In den jeweiligen Abschnitten werden die Vorstudien zu den einzelnen Gebieten erläutert.

Häufig eingesetzte Vorstudien sind zweidimensionale Modelle, welche die hydrogeologische Situation eines Einzugsgebietes im Vertikalschnitt zusammenfassen. Obwohl auf diese Weise keine realistischen Massen- oder Energiebilanzen gerechnet werden können, sind erste Parameterstudien und Testläufe möglicher Randbedingungen mit 2D-Modellen möglich.

Die dreidimensionale Modellierung beginnt in FEFLOW mit der Konfiguration und Kalibrierung eines Strömungsmodells. Diesem wird in einem zweiten Schritt der Wärmetransport aufgesetzt. Vor allem bei den ersten numerischen Modellen Ohlsbach und Baden-Baden waren zunächst umfangreiche Studien ungekoppelter Wärmetransportmodelle notwendig, bevor die volle Kopplung sinnvoll integriert werden konnte. Weitere wichtige Vorstudien betreffen die Modellgeometrie. Sofern die Einzugsgebiete im Vorfeld nicht genau bekannt sind, müssen die Modellkörper durch Abgleich der numerischen Berechnungsergebnisse mit den vorliegenden Daten verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden. Erst dann kann die Kalibrierung des eigentlichen Ergebnismodells erfolgen.

### **2.4.3 Erarbeitung des Ergebnismodells**

Vor den Erläuterungen zur Kalibrierung des Ergebnismodells soll zunächst die Vorgehensweise der Erstellung numerischer Modelle in FEFLOW dargestellt werden, wie sie für jedes der hier präsentierten Modelle angewendet wurde. Der Modellaufbau beginnt mit der Definition des Modellumrisses in der Draufsicht. Linien- oder Punktelemente können festgelegt werden, welche in das Gitternetz integriert werden. Im Fall der vorliegenden numerischen Modelle wurden Quellen, Bohrungen und die zu implementierenden Grenzen geologischer Einheiten und Störungszonen als Elemente vorgegeben. Die Netzgenerierung erfolgt mit dem automatischen Mesh Generator Triangle von J.R. SHEWCHUK (University of California Berkeley). Bei Bedarf werden ein-

zelne Modellbereiche verfeinert und die Netzstruktur soweit angepasst, dass die unter 2.3.1 aufgeführten Gitterkriterien möglichst erfüllt sind.

Die dreidimensionale Modelldarstellung wird durch Hinzufügen von Ebenen erreicht, deren Höhen anzugeben sind. Der oberen Ebene wird dabei grundsätzlich die Geländehöhe zugewiesen. Die darunter liegenden Ebenen können plan oder ebenfalls uneben sein. Sie markieren entweder hydrogeologisch/lithologische Grenzen oder zwischengeschaltete virtuelle Ebenen, deren einzige Funktion die Erzeugung von Knoten ist, an denen die numerische Berechnung stattfindet. Ebenso wichtig wie eine gute horizontale Diskretisierung ist ein homogenes, dichtes Netz im dreidimensionalen Raum, so dass bei Modelltiefen von bis zu 3500 m u. NN mehrere Zwischenebenen notwendig werden. Die Zwischenräume der einzelnen Ebenen werden als Schichten bezeichnet.

Zunächst werden daraufhin die Modelloptionen - stationär oder instationär - gewählt. Für stationäre Modelle sind keine weiteren zeitlichen Angaben erforderlich. Instationäre Modelle bedürfen der Angabe einer Startzeit, eines Zeitschrittschemas und eines Zielzeitpunktes. Alle hier vorliegenden numerischen Modelle wurden als gespannte Grundwasserleiter berechnet. Weitere gemeinsame Optionen aller Modelle sind die Viskositäts- und Dichtekopplung sowie die Funktion Streamline Upwinding wie oben erläutert.

Die Berechnungen beginnen bei sogenannten Startbedingungen, die für ein numerisches Modell festgelegt werden müssen. So müssen Grundwasserdruckhöhen und Temperaturen an jedem Gitterpunkt angegeben werden. Für die Dichte- und Viskositätskopplung ist zudem die Angabe der Referenztemperatur wichtig, die hier bei 0 °C liegt. Sie gibt an, für welche Temperatur die eingesetzten Materialparameter gelten. Die Startbedingungen werden nach dem ersten Rechendurchlauf durch die neuen Ergebniswerte ersetzt. Eine bedeutende Rolle spielen sie für instationäre Modelle, während sie bei stationären Berechnungen keinen Einfluss haben, sofern sie in sinnvollen Bereichen liegen, die eine Konvergenz des Modells ermöglichen.

Nach den Startbedingungen werden die Rand- und Nebenbedingungen festgelegt. Alle hier präsentierten numerischen Modelle haben folgende Randbedingungen gemeinsam:

**Strömung**

- Randbedingung 1. Art: konstante Grundwasserdruckhöhe im Bereich des Infiltrationsgebietes auf 10 m unterhalb der Geländehöhe
- Nebenbedingung: im Infiltrationsgebiet Beschränkung des Grundwasserabflusses nach außen auf 0 m<sup>3</sup>/d
- Randbedingung 1. Art: konstante Grundwasserdruckhöhe auf Geländehöhe am Quellknoten oder an einem Modellrand, um den Grundwasserabstrom zu ermöglichen
- Randbedingung 4. Art: konstante oder variable Förderraten an Bohrungen, Knoten auf benachbarten Ebenen stehen miteinander in Verbindung

**Wärmetransport**

- Randbedingung 1. Art: konstante Temperatur an der Modelloberfläche von 10 °C, Ausnahmen davon bilden nur die Quellknoten, an denen keine Temperatur vorgegeben ist
- Randbedingung 2. Art: Wärmefluss durch die Modellbasis von außen nach innen

Die Nebenbedingung für das Infiltrationsgebiet bewirkt die Beschränkung des Grundwasserzuzufusses auf einzelne Knoten in den hochgelegenen Modellbereichen. Alle Knoten, an denen aufgrund ihrer Tallage bei überflurgespannten Verhältnissen Exfiltration auftreten würde, werden als geschlossen behandelt. Diese Vereinfachung ist notwendig, um die flache Grundwasserzirkulation auszuschließen (siehe auch Kap. Fehlerdiskussion).

Die Materialparameter mit ihren Einheiten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Sie werden den Elementen einzeln oder ebenenweise in Polygonen zugewiesen. Diejenigen Werte, die alle vorliegenden numerischen Modelle gemeinsam haben, sind ebenfalls in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: In FEFLOW verwendete Materialparameter, Standardwerte und ihre Einheiten

Parameter	Wert	Einheit
Hydraulische Durchlässigkeit $k_{fx}$ , $k_{fy}$ und $k_{fz}$	-	m/s
Expansionskoeffizient	-	1/K
effektive Porosität	-	1
Speicherkapazität	$1 \cdot 10^{-4}$	1/m
Wärmekapazität des Fluids	4,2	J/m <sup>3</sup> /K
Wärmekapazität des Gesteins	2,5	J/m <sup>3</sup> /K
Wärmeleitfähigkeit des Fluids	0,65	J/m/s/K
Wärmeleitfähigkeit des Gesteins	-	J/m/s/K
longitudinale Dispersionslänge	0	m
transversale Dispersionslänge	0	m
Wärmequelle im Gestein	-	J/m <sup>3</sup> /d

Die nicht mit einem Standardwert versehenen Parameter sind gesteins- oder modellspezifisch variabel. Sie werden unter den Abschnitten der einzelnen Ergebnismodelle dargestellt. Die mit  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  angegebene Speicherkapazität wurde auf dem von FEFLOW vorgegebenen Standardwert belassen, weil dieser Parameter für die stationär modellierte Strömung keine Rolle spielt. Die Dispersion wurde in den vorliegenden Modellen nicht berücksichtigt, weil ihre Auswirkungen und Größenordnung für die Untersuchungsgebiete nicht bekannt sind. Siehe dazu auch die Erläuterungen unter 2.3.2.

Referenzpunkte können festgelegt werden, an denen die Ergebniswerte ausgelesen und grafisch dargestellt werden. Dieses Werkzeug wurde vor allem zur Kontrolle der bekannten Temperaturen an Bohrungen eingesetzt.

Nachdem die Modellkonfiguration fertiggestellt ist, wird der Rechenlauf durchgeführt. Die resultierenden Werte können auf verschiedene Weise ausgelesen werden (siehe folgender Abschnitt). Grundlage der Kalibrierung bilden in den vorliegenden numerischen Modellen die Temperaturen der Quellen und Bohrungen und die Schüttungsmengen der Quellen bzw. Grundwasserabstrommengen. Für einige der Standorte liegen Pumpversuchsergebnisse vor, die zum Teil ebenfalls zur Kalibrierung eingesetzt werden. Bei der Kalibrierung selbst werden die Materialparameter so lange variiert, bis die Ergebniswerte mit den Kalibrierdaten übereinstimmen. Die  $k_f$ -Werte stellen dabei die Materialparameter mit dem größten Einfluss auf die Ergebnisse dar, während sie andererseits vor allem in großen Tiefen sehr schlecht bekannt sind. Aus diesem Grund sind sie die Hauptfaktoren im Kalibrierprozess.

Aus dem erläuterten Verfahren wird deutlich, dass es sich bei der ermittelten Lösung nicht um ein eindeutiges Ergebnis handeln kann. Auch im Fall einer vollständigen Anpassung der Modellergebnisse an die Kalibrierdaten kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine andere Parameterkonfiguration existiert, die ebensolche Ergebnisse erzeugen würde. Besondere Bedeutung kommt aus diesem Grund der Sensitivitätsanalyse und der Verifizierung der Modellergebnisse zu. Die Sensitivitätsanalyse wird als Auswertungsverfahren im folgenden Abschnitt eingehend beschrieben. Die Verifizierung ist unter den gegebenen Bedingungen mit großen, tiefreichenden Modellgebieten und geringer Datendichte, äußerst schwierig. Sie kann nur ansatzweise durch Vergleiche mit ähnlichen Standorten und Problemstellungen erfolgen. Eine weitere wichtige Möglichkeit der Verifizierung muss nach dieser Arbeit offen bleiben. Diese Möglichkeit betrifft hydrochemische Untersuchungen und Isotopdatierungen, die zusätzlich zu den bereits vorliegenden Daten notwendig wären, um die Herkunft und Verweilzeiten der Thermalwässer im Detail klären und damit die Modellergebnisse verifizieren oder widerlegen könnten.

## **2.5 Auswertung der numerischen Modelle**

Die numerischen Berechnungen der Strömungs- und Wärmetransportmodelle ergeben Grundwasserdruckhöhen und Temperaturen für jeden Knotenpunkt des Modellkörpers und bei instationären Modellen für jeden Zeitschritt. Zudem werden die Stoff- und Energieflüsse durch die Elemente und die Modellränder bilanziert und können ausgelesen werden. Die Möglichkeiten zur Darstellung bzw. zum Auslesen dieser Ergebnisdaten sollen in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Zusätzlich folgen einige Ausführungen zur Durchführung der Sensitivitätsanalysen und zur Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauern des Grundwassers aus den Modellergebnissen.

### **2.5.1 Darstellung**

Die Ergebnisse werden als Daten mit räumlichem Bezug ausgegeben. Neben den x- und y-Koordinaten an den Modellknoten liegen Temperatur-, Grundwasserdruckhöhen- und DARCY-Geschwindigkeits-Werte vor. Diese können in ASCII-, Shapefile- oder AutoCAD-Format ausgelesen und in den entsprechenden Programmen weiterverarbeitet werden. FEFLOW bietet außerdem die Möglichkeit, die Ergebnisse direkt grafisch zu veranschaulichen. Dazu

werden die Daten zwischen den Knotenpunkten interpoliert und als Farbverlauf oder Isolinien dargestellt, wobei zwischen zweidimensionaler Darstellung in Draufsicht oder als Vertikalschnitt und dreidimensionaler Darstellung gewählt werden kann. DARCY-Geschwindigkeiten können als Vektorpfeile mit Richtung und Größe oder als Stromlinien dargestellt werden.

Der sogenannte Budget Analyzer ermöglicht die Berechnung von Stoff- und Energieströmen über die Modellränder. Auf diese Weise kann auch eine Gesamtbilanz der Zu- und Abflüsse erstellt werden. Mit den Fluid Flux Analyzer werden auch modellinterne Flüsse berechnet. Da bei diesem Verfahren jedoch Interpolationen angewendet werden müssen, sind die Ergebnisse weniger exakt als die des Budget Analyzers. An dieser Stelle sei bemerkt, dass die Dichte-Temperatur-Kopplung, die nicht ursprünglich im Programm FEFLOW implementiert war, sondern als Modul zugeschaltet wird, die Wärmebilanz beeinflusst. Sie erzeugt Wasserbewegungen und Wärmetransport durch freie Konvektion, die durch Auftriebskräfte angetrieben wird. Dieser Auftrieb geht als gesonderte Größe in die Bilanzierung ein und erhöht damit den modellinternen Umsatz erheblich, obwohl die Gesamtbilanz der Wärme flüsse über die Modellränder unverändert bleibt. Diese Tatsache ist prinzipiell nicht problematisch, sofern man die Modellergebnisse korrekt zu interpretieren weiß.

### 2.5.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient zum Test einzelner Parameter auf ihren Einfluss auf die Modellergebnisse. Für die vorliegenden numerischen Modelle wurden folgende Parameter in die Sensitivitätsanalyse einbezogen:  $k_f$ -Werte, Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, basale Wärme flussdichte und radiogene Wärme produktion. Dabei wurden die Parameter jeweils global, d.h. für den gesamten Modellkörper, verändert und die Ergebnisse der resultierenden Modellberechnungen aufgezeichnet. Der Bereich getesteter Werte ergibt sich aus plausiblen Daten, die aus Messungen oder Berechnungen der Standorte oder vergleichbarer Gebiete stammen. Bei geringer Sensitivität, z.B. im Fall der radiogenen Wärme produktion, mussten auch teilweise unplausible Werte (in diesem Fall  $0 \text{ J/m}^3\text{d}$ ) in die Testreihen einbezogen werden, um überhaupt Aussagen über die Sensitivität machen zu können. Neben globaler Parameteränderungen wurden die  $k_f$ -Werte auch gesteinspezifisch getestet. So wurden die Auswirkungen erhöhter oder verringerter Durchlässigkeiten im Aufstiegsbereich, in Störungszonen oder im ungestörten Kristallin getestet.

Im Ergebnis der Sensitivitätsanalysen zeigen sich Abhängigkeiten zwischen den oben genannten Parameter und den Modellgrößen Temperatur und Grundwasserdruckhöhe sowie in der Wasserbilanz. Die Art dieser Abhängigkeiten kann wertvolle Hinweise für die Interpretation der numerischen Modellberechnungen und die weiterführenden Untersuchungen geben.

### 2.5.3 Ermittlung der Verweildauer

Die Ermittlung einer durchschnittlichen Verweildauer von Grundwässern im Modellkörper gehört nicht zu den Standardanwendungen des Programms FEFLOW. Weil sie für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit jedoch von großer Bedeutung ist, wurden zwei Verfahren entwickelt, diese Verweildauer manuell zu bestimmen.

#### 2.5.3.1 Methode 1: 3D-Stromlinien mit Zeitmarkern

FEFLOW bietet die Möglichkeit, in dreidimensionalen stationären Strömungsmodellen Stromlinien zu berechnen. Diese sogenannten „Pathlines“ werden aus den DARCY-Geschwindigkeiten an den Knoten, der entsprechenden Fließrichtung und der Porosität errechnet. Die Darstellung kann durch Zeitmarker ergänzt werden, welche vor der Stromlinienberechnung zu definieren sind. Wird eine Stromlinie im Neubildungsgebiet gestartet, so kann durch sinnvoll gewählte Zeitmarker ihre maximale Aufenthaltsdauer im Modell bis zum Austritt am Quellknoten bestimmt werden.

Um das Alter der an den Quellen austretenden Mischwässer zu ermitteln, wird die Verweilzeit einer Stromlinie, die eine bestimmte maximale Tiefe erreicht, mit der Durchflussmenge der jeweiligen Tiefenschicht multipliziert. Die (horizontale) Durchflussmenge für eine jeweilige Schicht ergibt sich aus der Differenz zwischen den vertikalen Durchflüssen der darüber und darunter liegenden Ebenen. Die Summe der berechneten Alter für alle Modellschichten, dividiert durch die gesamte Durchflussmenge des Modells ergibt das gesuchte Alter des Mischwassers.

#### 2.5.3.2 Methode 2: Berechnung aus Fließgeschwindigkeit und Fließstrecke

Die Verweildauer der Grundwässer kann alternativ zur „Stromlinienmethode“ manuell aus der DARCY-Geschwindigkeit und der entsprechenden Fließstrecke errechnet werden. Dazu wird die DARCY-Geschwindigkeit zunächst über die durchflusswirksame Porosität in eine Abstandsgeschwindigkeit umge-

rechnet. Im Fall der hier behandelten Modelle wurden Porositäten von 0,01 für Kristallingesteine und 0,1 für Störungs- und Klüftzonen verwendet. Für jede maximale Eindringtiefe wird eine exemplarische Stromlinie zur Berechnung herangezogen, deren Verlauf durch verschieden durchlässige Modellbereiche in Abschnitte konstanter Fließgeschwindigkeit aufgeteilt wird. Die Summe der Einzelstrecken, dividiert durch die jeweilige Fließgeschwindigkeit, ergibt das Alter der Stromlinie. Analog zur Methode 1 werden auch hier die Einzelalter mit den Schichtdurchflüssen gewichtet.

#### 2.5.3.3 Methodenvergleich

Die beiden angeführten Methoden sind Näherungsverfahren. Sie werden parallel zueinander angewendet, weil so eine gewisse Plausibilitätskontrolle gewährleistet ist. Methode 1 ist durch die teilweise Implementierung im Programm für den Anwender inhaltlich nicht nachzuvollziehen und birgt daher gewisse Unsicherheiten. Programminterne Prozesse können nicht überprüft werden und eventuelle Konflikte mit anderen Modelleigenschaften bleiben unter Umständen unerkannt. Zudem schränkt die graphische Steuerung der Stromlinienstartpunkte und die ebenfalls nur graphisch mögliche Auswertung der Stromlinien die Genauigkeit der Ergebnisse ein.

Die Methode 2 bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse der Methode 1 zu prüfen, indem manuelle Berechnungen aus den primären Ergebnissen der Modellierung, den Darcy-Geschwindigkeiten, erfolgen. Auch hier kann aufgrund der Auswahl exemplarischer Fließwege keine exakte Lösung erzielt werden, jedoch ermöglichen die Ergebnisse in Verbindung mit Methode 1 belastbare Aussagen zur mittleren Verweilzeit der Quellwässer im Untergrund.

## 3 STANDORTE

### 3.1 Ohlsbach

Die Gemeinde Ohlsbach liegt bei Offenburg am Ausgang des Kinzigtales in die Oberrheinebene. In der Nähe der Ortschaft liegt der Ursprung einer Salzwasserfahne, die sich in den quartären Talschottern des Kinzig- und des Rheintales nach Nordwesten hin ausbreitet (Abb. 6). Eine 65 m tiefe Bohrung, die 1977 bei Ohlsbach niedergebracht wurde, erschließt ein hochmineralisiertes warmes Wasser, das aus einer stark geklüfteten Zone im Gneis zutritt. Nach Abteufen der Bohrung betrug die Temperatur 27,3°C. Vermutlich durch die Öffnung eines hydraulischen Kurzschlusses bei einem Pumpversuch ging die Temperatur später auf 18°C zurück (STOBER et al. 1999). Derzeit wird das Grundwasser in einer kleinen, durch die Gemeinde Ohlsbach betriebenen, Bade- und Kuranlage genutzt. Obwohl die heutige Temperatur der Salzwässer unter 20°C liegt und sie damit nicht als Thermalwässer klassifiziert werden, wird der Standort Ohlsbach in die Reihe der Modellgebiete aufgenommen. Sowohl die Position des Grundwasseraufstieges als auch die hydrochemische Zusammensetzung weisen darauf hin, dass die Grundwässer einem Zirkulationssystem im tiefen Kristallin des Schwarzwaldes entstammen. Ihr Einzugsgebiet ist damit denen der Thermalquellen von Baden-Baden und Badenweiler vergleichbar. Das Modell Ohlsbach wurde entwickelt, um diese Hypothese zu überprüfen und die lokalen Besonderheiten im Aufstiegs- bzw. Austrittsverhalten zu untersuchen.

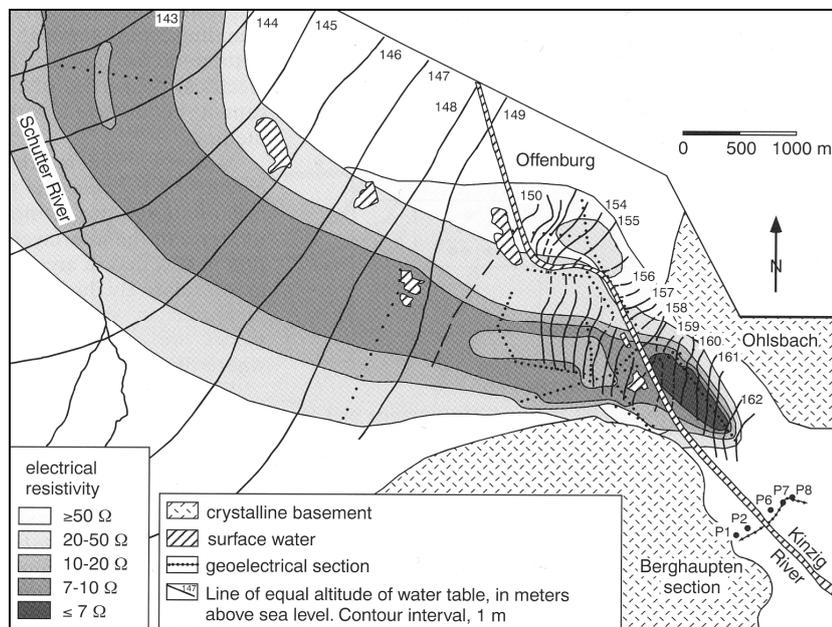


Abb. 6: Die elektrischen Widerstände im oberen Grundwasserstockwerk zeigen die Ausbreitung der bei Ohlsbach aufsteigenden Grundwässer an (aus: STÖBER et al. 1999)

### 3.2 Baden-Baden

Die Stadt Baden-Baden liegt am Westrand des Schwarzwaldes zwischen Karlsruhe und Offenburg. Die Ruinen eines römischen Bades aus dem 1. Jh.n.Chr. zeugen noch im heutigen Stadtgebiet von der langen Tradition der Thermalwassernutzung an diesem Ort. Die etwa 11 natürlichen Quellen mit Maximaltemperaturen von fast 70 °C entspringen an der nördlichen Talflanke des Oostales unterhalb des Neuen Schlosses (Abb. 7). Dort treten sie als Kluft- und Störungsquellen aus Rotliegend-Gesteinen aus. Die Quellen wurden zum großen Teil in den Jahren ab 1868 in mehreren Stollensystemen gefasst, nachdem die vorher frei austretenden Wässer einen bis zu 6 m mächtigen Sinterhügel aus  $\text{SiO}_2$ -haltigem Kalk geschaffen hatten (SAUER 1966). Die seit 1897 unverändert bestehenden Stollenanlagen haben eine Gesamtlänge von 200 m. Zur Vergrößerung des Thermalwasserangebotes wurden

1965/1966 zwei Bohrungen nördlich der Quellen im Pflutterloch abgeteuft. Beide, „Pflutterloch I“ und „Pflutterloch II“ erschlossen Grundwässer, welche denen der natürlichen Quellen in Temperatur und Chemismus ähnlich sind. Unter den Nutzern der Thermalwässer sind die Carasana Bäderbetriebe GmbH mit ihren beiden Bädern Caracallatherme und Friedrichsbad die größten Abnehmer. Ein kleinerer Teil der Wässer wird Trinkbrunnen im Stadtgebiet zugeleitet oder zu Therapiezwecken in Hotels und Kliniken angewendet (KÄB 1995).

Der Standort Baden-Baden wurde für die Untersuchungen ausgewählt, weil die Quellen als heißeste Quellen Baden-Württembergs eine große Bedeutung nicht nur in wirtschaftlicher Hinsicht haben. Wichtige Vorteile für die numerische Modellierung sind einerseits die langjährige relative Konstanz der Temperaturen und Schüttungsmengen und andererseits die Vielzahl an bereits vorliegenden Forschungsergebnissen. Die natürlichen Quellen, welche dem kristallinen Grundgebirge entstammen, stellen damit einen besonders interessanten Untersuchungsgegenstand für die Umsetzung der hier behandelten Fragestellungen dar.

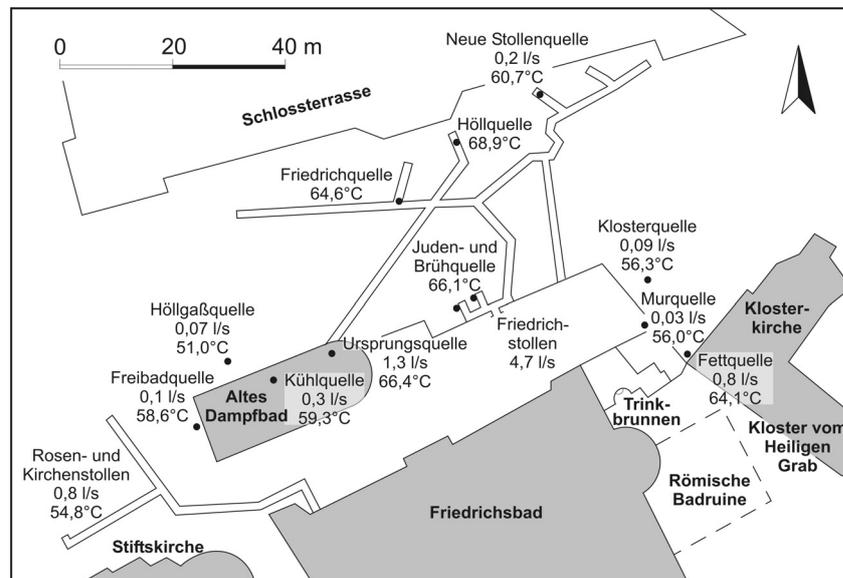


Abb. 7: Lageplan der in Baden-Baden genutzten Quellen und Bohrungen (nach KÄS 1995)

### 3.3 Badenweiler

Der Kurort Badenweiler liegt am Westrand des Südschwarzwaldes, etwa auf halber Strecke zwischen Freiburg und Basel. Auch die Quellen von Badenweiler werden wie diejenigen in Baden-Baden schon seit Vor-Römerzeiten genutzt. Die Quelltemperaturen betragen hier nur maximal 26 °C.



- |                   |   |
|-------------------|---|
| 1 Heidelquelle    | I Bohrung Badenweiler I                 |
| 2 Badermattquelle | II+III Bohrungen Badenweiler II und III |
| 3 Römerquelle     |   |

Abb. 8: Lage der Quellen und Bohrungen in Badenweiler

Wie in Baden-Baden sind die Quellen auch hier in Stollen gefasst. Sie sind an Kluft- und Störungsquellen des sogenannten Quarzriffs gebunden. Diese morphologisch deutliche Verhärtung im Bereich der östlichen Randverwerfung des Oberrheingrabens besteht aus silifizierten triassischen Gesteinen, die während der tektonischen Bewegungen am Grabenrand spröde deformiert wurden und nun als Kluftgrundwasserleiter den Thermalwasseraustritt ermög-

licht. Zwei Bohrungen in der Vorbergzone unweit des Quarzriiffs erschließen zusätzlich etwa 6 l/s Thermalwasser. Hauptnutzer der Quellen und Bohrungen ist die Badenweiler Thermen & Touristik GmbH, welche mehrere Thermalbäder betreibt.

Badenweiler ist mit seinen natürlichen Quellen und ihrer langjährig konstanten Eigenschaften ein sehr gut geeigneter Untersuchungsstandort für die Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung. Einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildet in diesem Fall der Zusammenhang zwischen Quellen und Bohrungen, welcher durch Pumpversuche nachgewiesen werden konnte.

## 4 NUMERISCHE MODELLE

### 4.1 Ohlsbach

#### 4.1.1 Datengrundlage

Als Grundlage des hydrogeologischen Konzeptmodells wurde vor allem die geologische Übersichtskarte 1:350.000 (LGRB 1998) im Bereich des Kinzigtals verwendet (Abb. 9).

Detailliertere Kenntnisse der geologischen Situation einzelner Teilgebiete stammen aus geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 und Geländebegehungen im Jahre 2003. Es können grundsätzlich drei hydrogeologisch bedeutende Gesteinseinheiten unterschieden werden: Quartär, Gneise und Granite. Mit Quartär wird die 10-50 m mächtige Schicht aus fluviatilen Lockermaterial bezeichnet. Die Para- und Orthogneise dominieren das mutmaßliche Einzugsgebiet der Tiefenwässer, während Granite im östlichen Teil des oberirdischen Einzugsgebietes sowie am Oberrheingrabenrand auftreten.

Daten des Deutschen Wetterdienstes lieferten durchschnittliche Jahresmitteltemperaturen von 7 bis 10°C je nach Höhenlage von 900 m bis 150 m ü. NN. Die Grundwasserneubildungsraten von durchschnittlich 408 mm/a im Kinzigtal wurden dem für Baden-Württemberg entwickelten Berechnungsmodell von ARMBRUSTER (2002) entnommen. Der Abfluss der Kinzig beträgt am Pegel Schwaibach jährlich  $7,4 \cdot 10^8$  m<sup>3</sup>/a (LFU 2003). Das entspricht 772 mm/a für das oberirdische Einzugsgebiet der Kinzig bei Schwaibach.

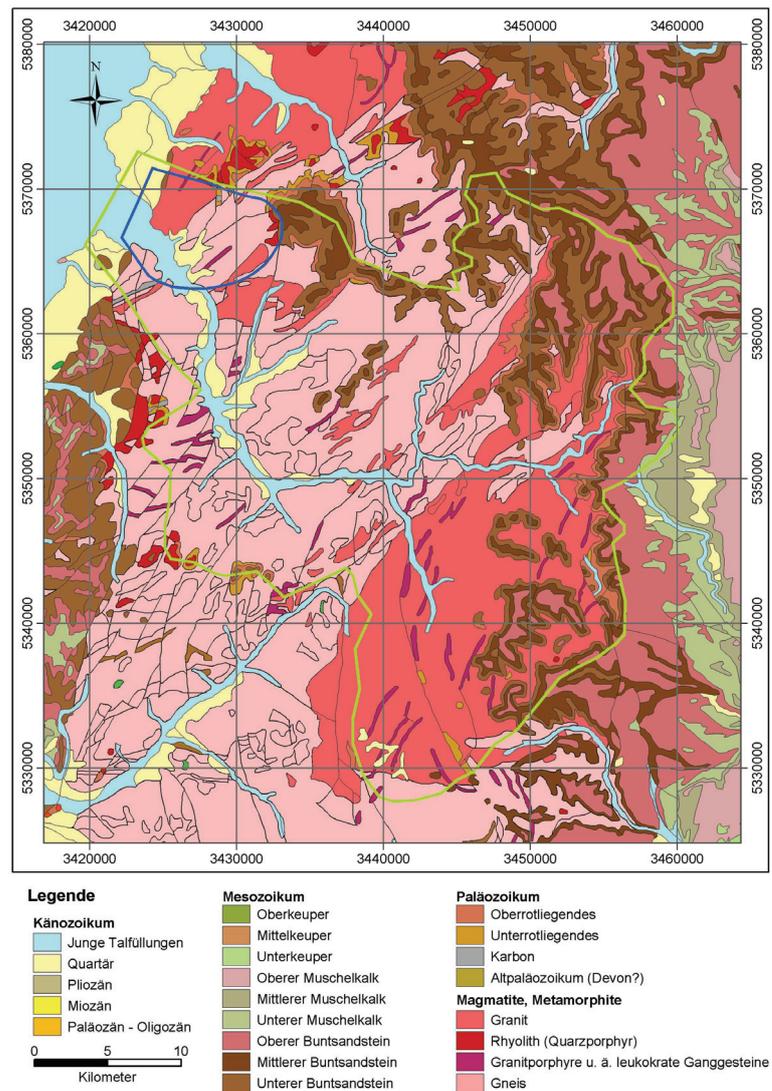


Abb. 9: Geologische Karte, Ausschnitt Kinzigtal aus: LGRB (1998). Die blaue Linie kennzeichnet die Umgrenzung des Ergebnismodells „3D Ohlsbach“, während die grüne Linie das oberirdische Einzugsgebiet markiert.

Der Tiefenwasseraufstieg von Ohlsbach wurde durch drei Tiefbohrungen erschlossen und untersucht: die Tiefbohrung Ohlsbach 1 mit 118 m, die Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2 mit 65 m u. NN sowie eine weitere Tiefbohrung, die ebenfalls etwa 60 m tief reichte. Von der Tiefbohrung Ohlsbach 1 liegen nur wenige Daten einer chemischen Analyse des geförderten Wassers, veröffentlicht in STOBER et al. (1999), vor. Diese und die dritte Bohrung sind nach Auskunft des LGRB heute verfüllt und nicht mehr zugänglich (frdl. mdl. Mitteilung STOBER 2004). Aus der hydrochemischen Signatur des Wassers aus Ohlsbach 1 lässt sich durch Geothermometerberechnungen eine maximale Zirkulationstiefe von 3000 m u. Gel. abschätzen (STOBER et al. 1999). Die heute noch offene Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2 erschließt ein 18°C warmes Wasser, von dem keine Schüttungsmessungen vorliegen. Das geologische Profil dieser Bohrung ist in Abb. 10 dargestellt.

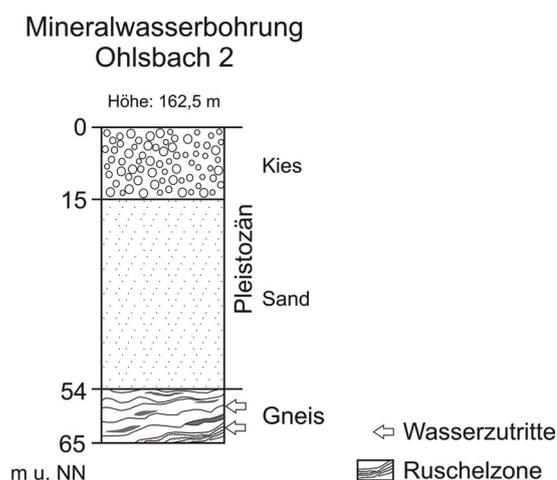


Abb. 10: Geologisches Profil der Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2 (Datenquelle: LGRB Bohrarchiv)

Der Abstrombereich des Tiefenwasseraufstieges wurde im Zuge einer Diplomarbeit hydrochemisch und im Rahmen von laufenden Arbeiten im LGRB geoelektrisch kartiert. Die daraus resultierenden Daten sind unter anderem in STOBER et al. (1999) veröffentlicht. MEINKEN (1999) untersuchte die Grundwasserbeschaffenheit im Rheingrabenanteil des Ortenaukreises durch Auswertung hydrochemischer Analysen der Messstellen im Gebiet sowie einzeln

vorliegender Isotopendaten, Grundwassermodelle und Pumpversuchsdaten. Auch Studien zur Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten im Quartär des Oberrheingrabens gehen auf MEINKEN et al. (1997) zurück.

Hydrochemisch ist das (ursprünglich 27,3 °C warme) Tiefenwasser von Ohlsbach als eine Na-Cl-Therme zu klassifizieren. Der gesamte Feststoffgehalt beträgt rund 13 g/l. Aus den Chlorid-Konzentrationen des aufsteigenden Grundwassers in der Tiefbohrung Ohlsbach 1 und in der Abstromfahne sowie der Menge des abströmenden Grundwassers im Quartär wurde die Schüttung der Aufstiegszone errechnet. Unter der Annahme von chloridfreiem flach zuströmendem Grundwasser ergibt diese Abschätzung eine Tiefenwasserschüttung von etwa 11,5 m<sup>3</sup>/d. Insgesamt fließen ca. 1500 m<sup>3</sup>/d innerhalb der quartären Talfüllung bei Ohlsbach nach Nordwesten.

Im Rahmen der Vorerkundungen zur kontinentalen Tiefbohrung wurden in den 80er Jahren mehrere Bohrungen im mittleren Kinzigtal abgeteuft und vor allem im Hinblick auf geothermische Parameter untersucht (JENKER et al. 1986). Der aus sieben 180 m bis 300 m tiefen Bohrungen ermittelte durchschnittliche Temperaturgradient beträgt 3,2 K/100 m. An Gesteinsproben im Labor sowie in situ gemessene Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen 2,5 und 2,9 J/m/s/K (BURKHARDT et al. 1989). Die in der gleichen Studie bestimmten radiogenen Wärmeproduktionsraten betragen für Gneisgesteine zwischen 1 und 4  $\mu\text{W}/\text{m}^3$  und für Granite zwischen 2 und 6  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ .

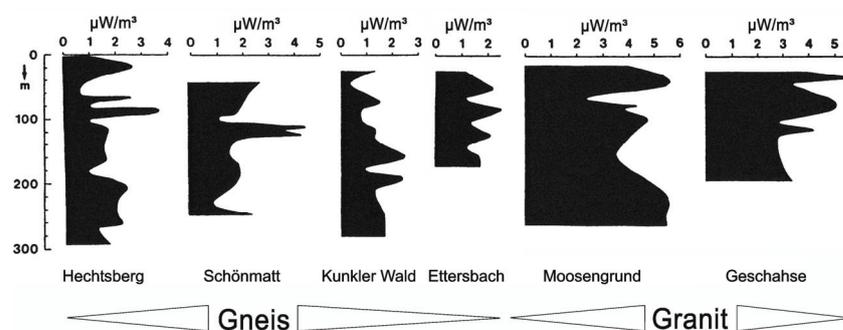


Abb. 11: Radiogene Wärmeproduktion in den Bohrungen im mittleren Schwarzwald im Rahmen der KTB-Vorerkundung (aus BURKHARDT et al. 1989)

STOBER (1994) ermittelte unter anderem aus diesen Daten die oberflächliche Wärmestromdichte des Kinzigtales zu  $86 \text{ mW/m}^2$  und die Wärmestromdichte in 3000 m u. NN zu  $82 \text{ mW/m}^2$ . Die radiogene Wärmeproduktion der Schwarzwaldgesteine beträgt nach STOBER (1994) für Granit im Schnitt  $4,2 \mu\text{W/m}^3$  und für Gneis  $1,4 \mu\text{W/m}^3$ .

#### 4.1.2 Konzeptmodell

Das bei Ohlsbach aufsteigende Grundwasser stammt den vorliegenden Daten zufolge aus den östlich gelegenen Kristallingebieten des Schwarzwaldes, wo es bis in Tiefen von 3 km u. Gel. zirkuliert, bevor es entlang von Klüften aufsteigt. Das oberirdische Einzugsgebiet der Kinzig bei Ohlsbach ist geologisch von Gneisen und Graniten des Grundgebirges dominiert, die stark tektonisch beansprucht wurden. Entsprechend werden die kompakten Gesteine von Klüften und Störungen durchbrochen, welche zum Teil durch Ton- und Mineralbeläge abgedichtet, zum Teil aber auch wasserdurchlässig sind, wie die im mittleren Schwarzwald häufigen Wasseraustritte aus Klüften am Wegrand zeigen, die im Winter durch Galerien von Eiszapfen markiert werden.

Der Aufstiegszone kommt eine besondere Bedeutung zu, denn die im Hinterland infiltrierten und sich im Untergrund bewegenden Grundwässer müssen zusammengeführt und konzentriert werden, um permanent schüttende Quellen bzw. Bohrungen zu speisen. Im Falle des Tiefenwasseraufstieges bei Ohlsbach geht die Autorin davon aus, dass sich zwei Störungszonen kreuzen: eine Oberrheingraben-parallele Störung und eine nahezu senkrecht dazu NW-SE unterhalb der Kinzig verlaufende Störung. Der Verlauf der Kinzig zwischen Haslach und Offenburg legt große Störungen, welche eine Vorzeichnung der Talstruktur bilden, nahe. Die grabenparallele Störung ist auf geologischen Karten verzeichnet und zum Teil aufgeschlossen. Die beiden Störungen und vor allem der vermutlich stark zerrüttete Kreuzungsbereich der Störungen bilden nach Ansicht der Autorin die bevorzugten Wegsamkeiten, entlang derer sich die Grundwässer sammeln und mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit aufsteigen können.

Aus den vorliegenden Daten wird das folgende quantitative Konzeptmodell abgeleitet:

Tabelle 2: Parameter des Konzeptmodells Ohlsbach (Quellen siehe Datengrundlage)

Tiefenwasseraufstieg	11,5 m <sup>3</sup> /d	
Grundwasserabstrom gesamt	1500 m <sup>3</sup> /d	
maximale Zirkulationstiefe	3000 m u. Gel.	
Temperatur der Aufstiegswasser	27,3°C	(Originaltemperatur)
Oberflächentemperatur	10°C	
Wärmeflussdichte in 3000 m u. NN	82 mW/m <sup>2</sup>	

### 4.1.3 Vorstudien

#### 4.1.3.1 Ermittlung des Einzugsgebietes

Das unterirdische Einzugsgebiet ist zunächst nicht bekannt. Als erste Arbeitshypothese wird das oberirdische Einzugsgebiet der Kinzig bei Offenburg als Modellumfang gewählt. Da eine quantitative Betrachtung der Grundwasserströmung notwendig ist, um das Einzugsgebiet abzugrenzen, werden dreidimensionale Strömungsmodelle erstellt. Die Modelltiefe wird zunächst mit 4000 m u. NN angesetzt, um die nach Geothermometermessungen ermittelten 3000 m Zirkulationstiefe gut erfassen zu können.

Eine Randbedingung 1. Art öffnet das Modell für den Grundwasserabstrom im Nordwesten, während eine feste Zuflussrate auf der gesamten oberen Ebene die Grundwasserneubildung darstellt. Die Hauptvorfluter werden als Randbedingungen 3. Art eingefügt. Damit wird der Austritt von Grundwasser in die Oberflächengewässer, abhängig von der Höhe der Transferrate, ermöglicht. Die Modelldaten sind im Einzelnen in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgeführt. Da es sich in diesem Fall nur um eine grob kalibrierte Vorstudie handelt, weichen die Parameter leicht ab im Vergleich zu denen des Ergebnismodells in Tabelle 9 und Tabelle 10.

Tabelle 3: Eingangsparameter für das Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“

Gesteinsparameter	Quartär	Trias	Kristallin	Störung
$k_f$ -Wert (x,y) [m/s]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$k_f$ -Wert (z) [m/s]	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Porosität	0,1	0,05	0,01	0,1

Tabelle 4: Randbedingungen für das Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“

<b>Randbedingungen</b>			
Grundwasserneubildung:	2. Art	Ebene 1, Östlicher Teil	$3 - 7,8 \cdot 10^{-6}$ m/d höhengestuft
Hauptvorfluter:	3. Art	Ebene 1, Hauptvorfluter	Transferrate $+1 \cdot 10^{-14}$ und $-1 \cdot 10^{-4}$ 1/d
Grundwasserabstrom:	1. Art	Ebene 1, NW' Modellrand	Druckspiegelhöhe 152 m

Unter den gegebenen Modellbedingungen zeigen die Berechnungen, dass die bei Ohlsbach aufsteigenden Grundwässer bevorzugt aus dem nördlichen Gebietsteil stammen, weil die Hauptvorfluter die Grundwässer aus dem Süden und Osten aufnehmen. Je geringer die Transferrate der Vorfluter eingestellt wird, desto mehr Stromfäden erreichen die Tiefenwasser-Aufstiegszone, desto schlechter fällt jedoch auch die Anpassung der Grundwasseroberfläche an die Morphologie aus. Eine unter diesen Modellvoraussetzungen optimale Morphologie-Anpassung führt zu folgendem Strömungsfeld:

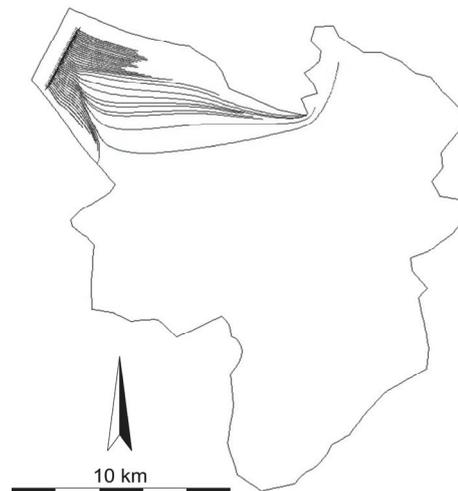


Abb. 12: Vom Abstrombereich aus rückwärts erzeugte Stromfäden im Modell „3D Einzugsgebiet Ohlsbach“ in der Draufsicht

Entsprechend dieser Ergebnisse wird ein im Vergleich zum oberirdischen Einzugsgebiet kleineres Gebiet die Grundlage der weiteren Modellberechnungen bilden. Damit wird auch eine geringere Modelltiefe notwendig, denn kürzere Strömungsfäden tauchen weniger tief ab. Die Berechnungsergebnisse lassen eine Modelltiefe von 3000 m u. NN sinnvoll erscheinen.

Eine gute Anpassung der Grundwassergleichen an die Oberflächenmorphologie ist in dieser Modellkonfiguration nicht möglich, da nur die Hauptvorfluter als Grundwasseraustrittszonen geöffnet werden, kleinere Quellen, z.B. am Ausstrich der Buntsandsteinschichten, werden jedoch nicht dargestellt. Werden, wie in diesem Fall, bevorzugt tiefreichende Prozesse simuliert, so ist die Aussagekraft der Ergebnisse in Oberflächennähe entsprechend gering. Die eingefügten Transfergrenzen entlang der großen Flüsse dominieren die Modellergebnisse sehr stark. Zudem ist der Tiefenwasseranteil an der Gesamtströmung im Modell so gering, dass eine Visualisierung und Kontrolle der Strömungsbedingungen in der Tiefe nur unzureichend möglich ist. Daher sollen die folgenden Modelle keine Transfergrenzen (Randbedingungen 3. Art) enthalten und nur den unterirdisch abströmenden Grundwasseranteil von 1500 m<sup>3</sup>/d simulieren.

Die folgende Abbildung zeigt das nach den Vorstudien plausibel erscheinende Einzugsgebiet der Ohlsbacher Tiefenwässer sowie die Lage des Profilschnittes für das 2D-Modell.

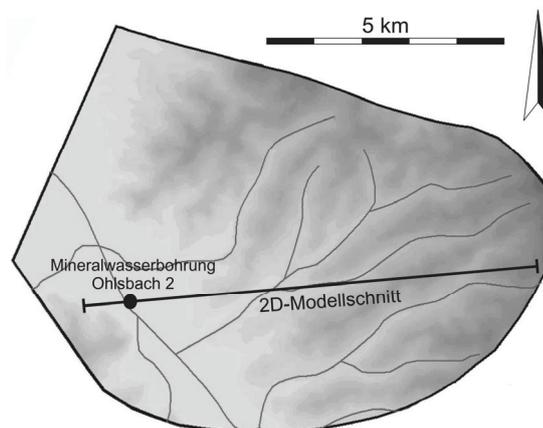


Abb. 13: Modellgebiet „Ohlsbach“ in der Draufsicht mit Lage des 2D-Modellschnittes

## 4.1.3.2 2D-Modell

Die Geometrie und die Randbedingungen des 2D-Modells „Ohlsbach“ sind in Abb. 14 dargestellt.

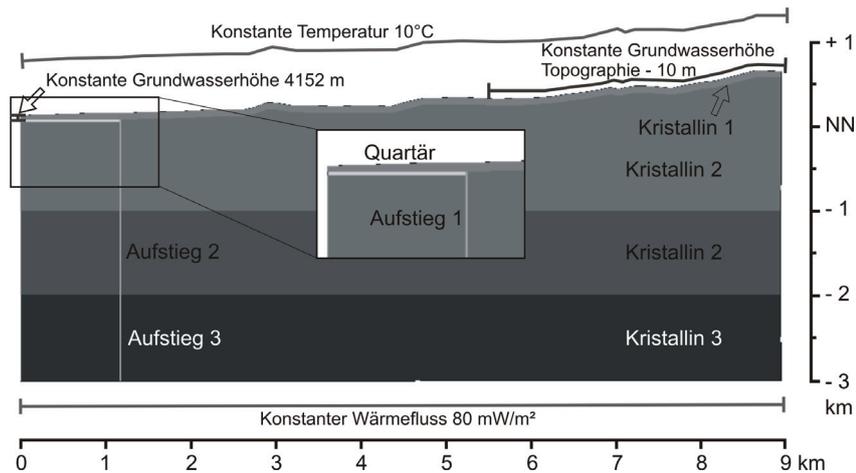


Abb. 14: 2D-Modell „Ohlsbach“ mit Randbedingungen und hydrogeologischen Einheiten

Es werden prinzipiell drei hydrogeologische Einheiten unterschieden, die zum Teil durch tiefengestufte  $k_f$ -Werte weiter untergliedert werden: Quartär, Kristallin und Aufstieg. „Quartär“ fasst dabei die Lockersedimente im Bereich der Kinzigtalau zusammen, „Kristallin“ beschreibt die Granit- und Gneisgesteine des Grundgebirges und „Aufstieg“ bezeichnet die wasserführende Störungszone bzw. einen Kreuzungsbereich zweier Störungen, die den schnellen vertikalen Wassertransport ermöglichen. Die Strömungs- und Wärmetransportparameter der Einheiten sind in der unten stehenden Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Strömungs- und Wärmetransportparameter im Modell „2D Ohlsbach“

	<b>k<sub>r</sub>-Wert (x) [m/s]</b>	<b>Aniso- tropie y/x</b>	<b>Porosität</b>	<b>Wärmeleit- fähigkeit [J/msK]</b>	<b>rad. Wärme- produktion [μW/m<sup>3</sup>]</b>
Quartär	1·10 <sup>-4</sup>	0,01	0,1	1,2	1
Aufstieg 1	5·10 <sup>-6</sup>	10	0,1	2,5	1
Aufstieg 2	8·10 <sup>-7</sup>	10	0,1	2,5	1
Aufstieg 3	1·10 <sup>-8</sup>	10	0,1	2,5	1
Kristallin 1	4·10 <sup>-11</sup>	1	0,01	2,5	3
Kristallin 2	2·10 <sup>-8</sup>	1	0,01	2,5	3
Kristallin 3	5·10 <sup>-10</sup>	1	0,01	2,5	3
Kristallin 4	5·10 <sup>-11</sup>	1	0,01	2,5	3

Im Vergleich zum Modell 3D Ohlsbach (Tabelle 9 und Tabelle 10) sind Unterschiede in der Parameterkonfiguration festzustellen. Diese lassen sich dadurch begründen, dass das 2D-Modell nur als grob kalibriertes Modell abgeschlossen wurde und durch die Zweidimensionalität großen Vereinfachungen unterliegt, während das Modell 3D Ohlsbach fein kalibriert und deutlich komplexer aufgebaut ist. Die hier dargestellten Werte sind daher nur als Ergebnisse einer Vorstudie zu sehen.

Sensitivitätsanalysen wurden für die k<sub>r</sub>-Werte durchgeführt. Dabei wurden zum einen einzelne Werte für die Durchlässigkeit der Aufstiegszone verändert und ihre Auswirkung auf die Temperatur der Aufstiegswasser untersucht (Abb. 15). Zum anderen wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte für alle Einheiten des Modells um den gleichen Faktor geändert und die resultierende Aufstiegstemperatur sowie Grundwasserneubildung und maximale Fließgeschwindigkeiten kontrolliert (Abb. 16).

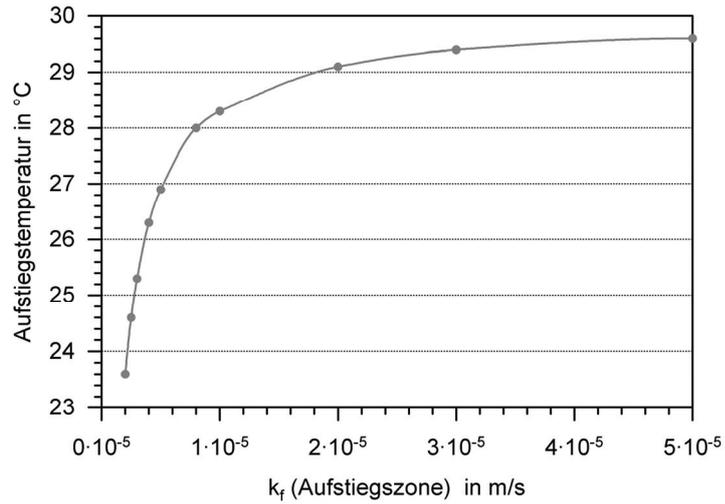


Abb. 15: Temperatur der Aufstiegswässer in Abhängigkeit des  $k_f$  (Aufstieg 1). Alle übrigen Parameter entsprechen Tabelle 5.

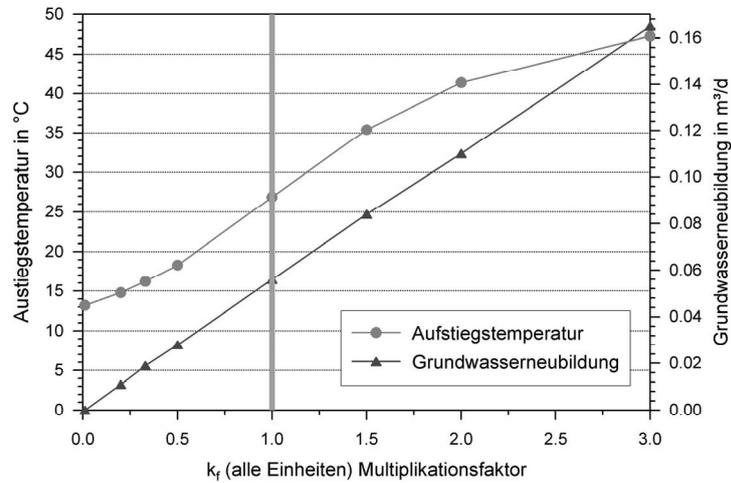


Abb. 16: Temperatur der Aufstiegswässer und Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der Modelldurchlässigkeit. Der Faktor bezieht sich auf die  $k_f$ -Werte aus Tabelle 5.

Die ermittelten  $k_f$ -Wert-Kombinationen, welche plausible Modelltemperaturen ermöglichen, müssen im 3D-Modell neu überprüft werden, weil erst dort auch die lateralen Fluidbewegungen mit erfasst werden können. Die Trends aus der Sensitivitätsanalyse und die Größenordnungen der ermittelten Parameter liefern jedoch wichtige Erfahrungswerte für die 3D-Modellierung.

Weitere Erkenntnisse aus dem 2D-Modell betreffen die Dichte- und Viskositätskopplung, deren Effekte auf die Modellergebnisse vor allem bei gleichzeitiger Anwendung beider Kopplungen schwer vorauszusagen sind und daher erst durch Modellberechnungen charakterisiert werden können. Die Einflüsse der einzelnen bzw. kombinierten Kopplungen auf die Höhe der Grundwasserneubildung, der Temperatur sowie der  $k_f$ -Werte sind in der folgenden Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Viskositäts- und Dichtekopplung in ihrer Auswirkung auf die Modellergebnisse im Vergleich zum ungekoppelten Modell; ↑ (↓) Wert steigt (sinkt) durch die Kopplung

<b>Nur Viskositätskopplung</b>	<b>Nur Dichtekopplung</b>	<b>Volle Kopplung</b>
GWN ↑ 45%		GWN ↑ 70%
Tiefenfiltration ↓		Tiefenfiltration ↓
Aufstieg etwas durchlässiger		Aufstieg etwas durchlässiger
	Aufstiegstemperatur ↑ 4%	Aufstiegstemperatur ↑ 52%
	Aufstiegs- geschwindigkeit ↑	Aufstiegs- geschwindigkeit ↑

Betrachtet man zunächst die Trends, so addieren sich die Effekte der Dichte- und Viskositätskopplung zur vollen Kopplung. Die prozentualen Änderungen der Parameter im Einzelnen zeigen jedoch, dass die volle Kopplung die Auswirkung der jeweiligen Einzelkopplung zusätzlich verstärkt. Ein voll gekoppeltes Modell muss daher im Vergleich zu einem ungekoppelten Modell eine höhere Grundwasserneubildung und, vor allem im unteren Modellbereich sowie in der Aufstiegszone, geringere  $k_f$ -Werte besitzen.

#### 4.1.4 Ergebnismodell „3D Ohlsbach“

##### 4.1.4.1 Geometrie

Die Modellgeometrie des vorliegenden 3D-Modells „Ohlsbach“ ist ein Ergebnis der vorangegangenen 2D- und 3D-Modellberechnungen. Diese Arbeiten ergaben unter anderem eine schrittweise Verkleinerung der Fläche und Verringerung der Tiefe des Modells, die in einer 64 km<sup>2</sup> großen, bis in 3 km u. NN reichenden Geometrie mündeten. Die Grundlage für die Netzgenerierung bildet ein Umriss, welcher sich vor allem an den oberirdischen Wasserscheiden orientiert. Im Süden und Osten des Modells dienen kleinere Höhenzüge als Modellbegrenzung bzw. wird der Fluss Kinzig rechtwinklig gequert. Diese Umgrenzung wird durch lineare Elemente zum Supermesh ergänzt. Die Elemente zeichnen die mutmaßlich bedeutendsten Störungen (siehe Konzeptmodell) in Form von ca. 25 m breiten Doppellinien nach. Zusätzlich werden lineare Begrenzungen für den Aufstiegsbereich und die Quartärschicht eingefügt (Abb. 17).

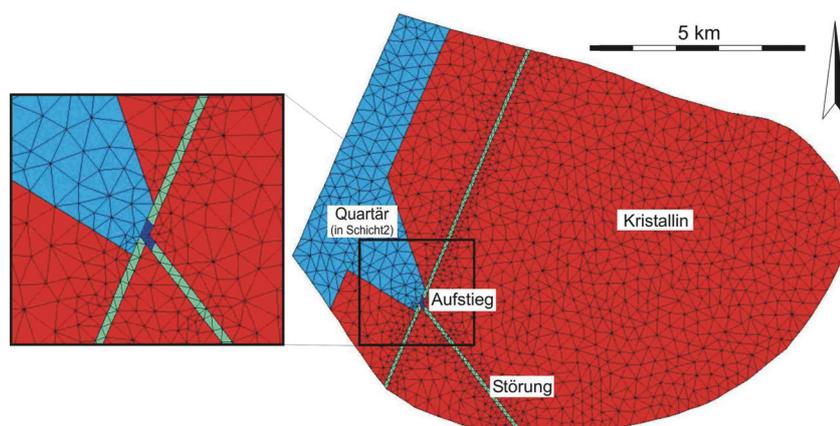


Abb. 17: Hydrogeologische Einheiten und horizontale Diskretisierung des Modells „3D Ohlsbach“

Die vertikale Diskretisierung des insgesamt 42928 Elemente umfassenden Gitters ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Ohlsbach“

Ebene 1	Topographische Höhen aus dem digit. Höhenmodell (150-980 m)
Ebene 2	Topographische Höhe - 10 m; oberhalb 270 m zusätzlich - 70 m
Ebene 3	Topographische Höhe - 40 m; oberhalb 250 m zusätzlich - 100 m und oberhalb 380 m = 380 m gesetzt
Ebene 4	98 m
Ebene 5	0 m
Ebenen 6 - 17	-250 m bis -3000 m in Abständen zu je 250 m

Es werden drei Referenzpunkte eingeführt. Punkt 1 liegt in Ebene 4 am Standort der „Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2“ ( $^{\circ}30190$ ,  $^{\circ}5366940$ ) und zeigt somit die Verhältnisse beim Eintritt der Grundwässer in die Bohrung an. Die Referenzpunkte 2 und 3 liegen bei  $^{\circ}3424620$ ,  $^{\circ}5365810$  im mittleren Bereich des Neubildungsgebietes auf den Ebenen 9 (-1000 m) bzw. 13 (-2000 m).

#### 4.1.4.2 Parameter

Das Modell unterscheidet neben den im 2D-Modell enthaltenen Einheiten Quartär, Kristallin und Aufstieg zusätzlich die Einheit Störung für die beiden großen Störungszonen (siehe Konzeptmodell) außerhalb ihres Kreuzungsgebietes, der durch die Einheit Aufstieg repräsentiert wird. Die folgenden Tabellen fassen die Modellparameter zusammen.

Tabelle 8: Randbedingungen des Modells „3D Ohlsbach“

<b>Strömung</b>		
Ebene 1, Östlicher Teil	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe = Topographische Höhe - 10 m
Ebenen 2+3, NW' Modellrand	Nebenbedingung 2. Art Randbedingung 1. Art	kein GW-Strom nach außen Druckspiegelhöhe 152 m
<b>Wärmetransport</b>		
Ebene 1	Randbedingung 1. Art	Temperatur 10°C
Ebene 17	Randbedingung 2. Art	Wärmefluss 80 mW/m <sup>2</sup>

Tabelle 9:  $k_f$ -Werte in m/s im Modell „3D Ohlsbach“

Schicht	Quartär (xy; z)	Kristallin	Störung	Aufstieg (z)
1		$2 \cdot 10^{-8}$		
2	$7 \cdot 10^{-4}$ ; $7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
3		$1,5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
4-6		$1 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$
7-8		$1 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-6}$
9-12		$5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$
13-16		$1 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 10: Wärmetransportparameter im Modell „3D Ohlsbach“

	Quartär	Kristallin	Störungen
Porosität	0,1	0,01	0,1
Wärmekapazität Gestein [MJ/m <sup>3</sup> K]	2,2	2,2	2,2
Wärmeleitfähigkeit Gestein [J/msK]	1,5	2,6	2,6
radiogene Wärmeproduktion [ $\mu$ W/m <sup>3</sup> ]	1	3	1

#### 4.1.4.3 Ergebnisse

Die dargestellte Parameterkonfiguration führt zu Modellergebnissen, welche den Vorgaben aus dem Konzeptmodell gut entsprechen. Die Grundwasserneubildung liegt bei 1492 m<sup>3</sup>/d. Dies entspricht einem Anteil von etwa 2,6% an der gesamten Grundwasserneubildung im Modellgebiet. Die Temperatur der aufsteigenden Tiefenwasser im Bereich der Bohrung „Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2“ beträgt 27,8°C. Die Temperaturverteilung ist in Abb. 18 als Farbverlauf am dreidimensionalen Modellkörper dargestellt.

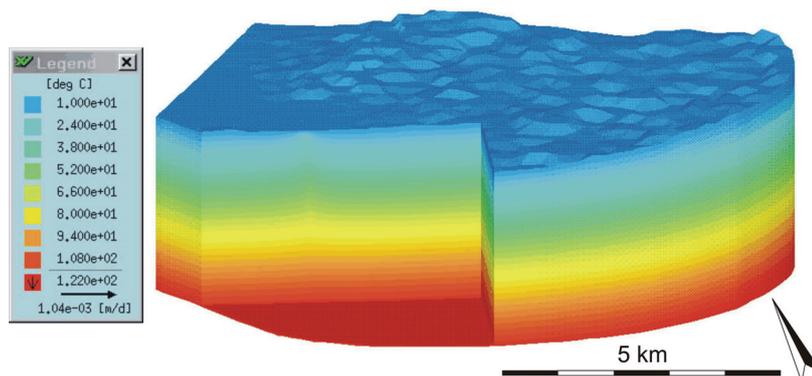


Abb. 18: Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Ohlsbach“  
 Sowohl die maximale Fließgeschwindigkeit wie auch die abgeschätzte mittlere Verweilzeit, die Temperaturen an den Referenzpunkten 2 und 3 sowie der Oberflächen-Wärmefluss liegen in plausiblen Größenordnungen. In Tabelle 11 sind die wichtigsten Berechnungsergebnisse im Überblick zusammengestellt.

Tabelle 11: Ergebnisse aus dem Modell „3D Ohlsbach“

Grundwasserneubildung	1492 m <sup>3</sup> /d (Konzeptmodell: 1500 m <sup>3</sup> /d)
Temperatur Aufstieg	27,8°C (Konzeptmodell: 27,3°C)
Temperatur Referenzpunkt 2	56,7°C (geotherm. Gradient 3,4 °K/100 m)
Temperatur Referenzpunkt 3	88,8°C (geotherm. Gradient 3,3 °K/100 m)
Temperatur an der Modellbasis	116-121°C (geotherm. Gradient 3,4 - 2,9 °K/100 m)
Oberflächen-Wärmefluss	88 mW/m <sup>2</sup>
Max. DARCY-Geschwindigkeit	6,4 m/d
Mittlere Verweilzeit	5000 – 7500 a

Das berechnete Strömungsfeld ist in Abb. 19 durch Stromfäden verdeutlicht. Schematisch ist angedeutet, dass der Hauptteil der Grundwässer in flacheren, kühleren Tiefen verbleibt, während nur wenig Wasser größere Tiefen erreicht und dort auf bis zu 120 °C aufgeheizt wird. Quantitativ ausgedrückt zirkulieren 21% der 1500 m<sup>3</sup>/d unterhalb von 0 m ü. NN, 2% unterhalb von 1000 m u. NN und 0,5% unterhalb von 2000 m u. NN. Die Bewegungsbahnen der Grundwässer beschreiben vom Infiltrationsgebiet aus weite Bögen nach unten in das Kristallin hinein und zum nordwestlichen Modellrand hin. Beim Erreichen der Störungszonen werden die Bahnen abgelenkt und strömen nun innerhalb der durchlässigeren Störungsbereiche. In der Aufstiegszone fließen die Wässer, konzentriert auf einen schmalen Bereich, vertikal nach oben, um dann in Schicht 3 innerhalb der quartären Sedimente abzuströmen und das Modell zu verlassen.

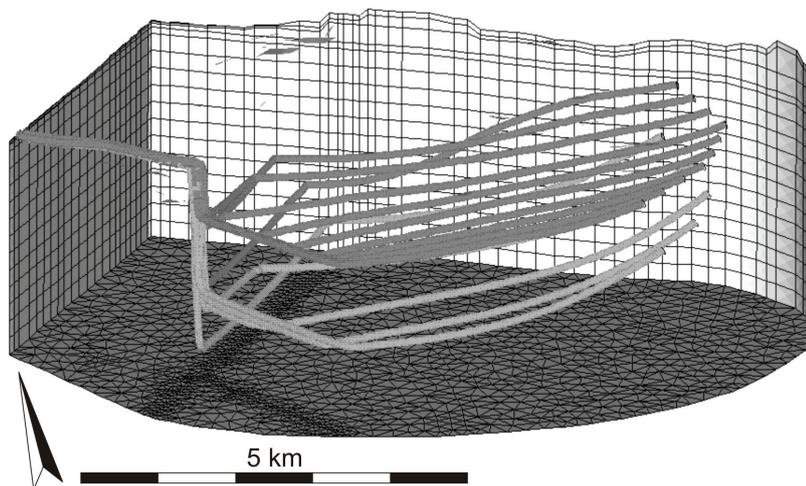


Abb. 19: Berechnetes Strömungsfeld der Grundwässer im Modell „3D Ohlsbach“

#### 4.1.4.4 Sensitivitätsanalyse

##### *Wärmetransportparameter*

Die Abhängigkeit der Modellergebnisse von den Wärmetransportparametern Wärmefluss, Wärmeleitfähigkeit des Kristallins und radiogene Wärmeproduktion des Kristallins wurde getestet. Dabei wurden die Parameter innerhalb der Größenordnungen variiert, die nach vorliegenden Messwerten aus der Region oder aus vergleichbaren geologischen Situationen plausibel sind (siehe Konzeptmodell). Als Referenzparameter wurden die Temperaturen an den Referenzpunkten verwendet. Referenzpunkt 1 ist dabei aus der Bohrung „Mineralwasserbohrung Ohlsbach 2“ bekannt, die beiden übrigen Temperaturen wurden aus einem geothermischen Gradienten von  $3,4 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$  errechnet. Die Modellkonfiguration ergibt für jeden der Parameter einen schmalen Wertebereich, in dem die Ergebnisse der Modellberechnungen mit den Referenztemperaturen übereinstimmen. Diese Werte werden jeweils als Idealparameter eingesetzt, während Sensitivitätsanalysen mit anderen Parametern durchgeführt werden. Abb. 20 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen der Wärmetransportparameter.

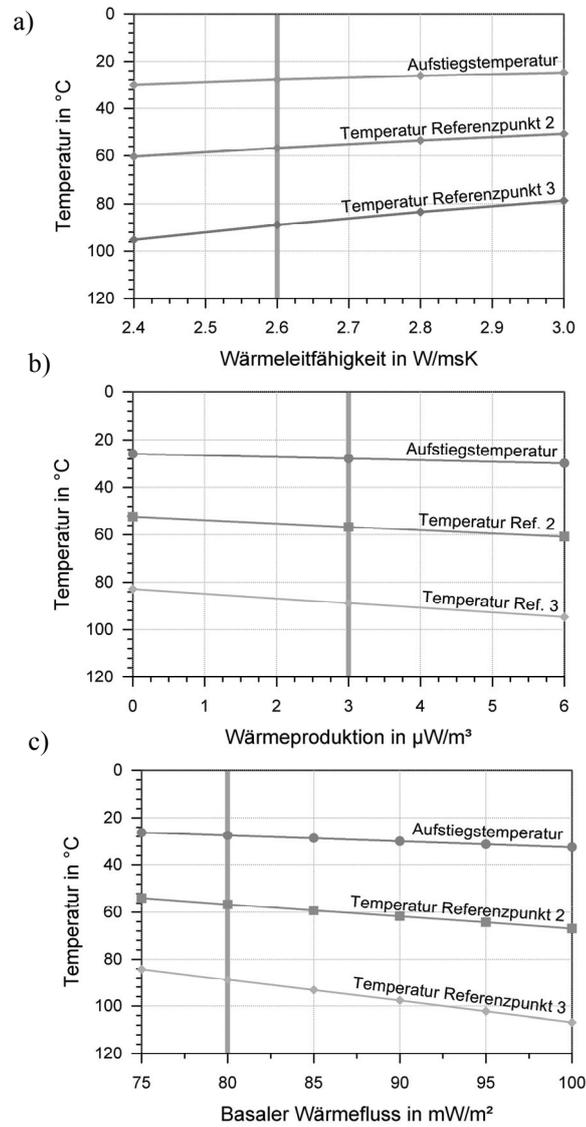


Abb. 20a-c: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für a) Wärmeleitfähigkeit, b) radiogene Wärmeproduktion und c) basale Wärmeflussdichte für das Modell „3D Ohlsbach“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar (Erläuterung siehe Text).

### Hydraulische Durchlässigkeiten

Eine Änderung aller  $k_f$ -Werte um einen Faktor hat Auswirkungen auf die Temperaturverteilung und die Grundwasserneubildung im Modell. In Abb. 21 wird deutlich, dass sich alle Referenztemperaturen und die Grundwasserneubildung ändern und außer bei einem Multiplikationsfaktor von 1 dem Konzeptmodell nicht mehr genügen.

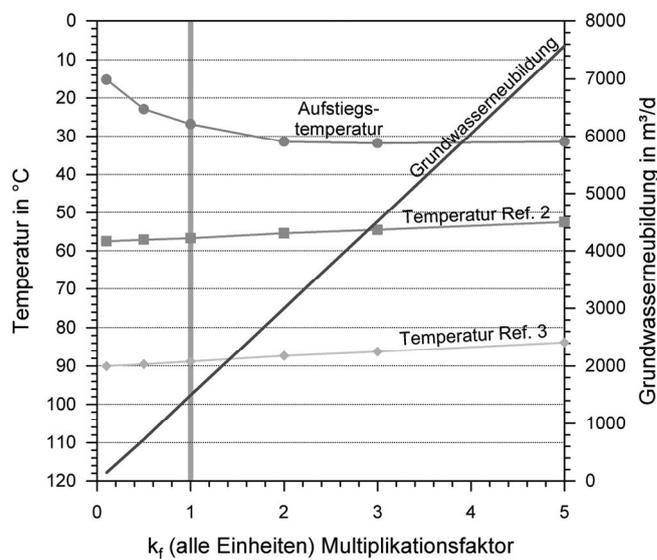


Abb. 21: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Modelldurchlässigkeit für das Modell „3D Ohlsbach“. Die  $k_f$ -Werte aller Einheiten wurden jeweils mit dem Faktor multipliziert. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.

Wird die Durchlässigkeit der Aufstiegszone erhöht, während die übrigen  $k_f$ -Werte unverändert bleiben, so kommt es zu einer Ablenkung der berechneten Stromfäden nach unten bevor sie aufsteigen. Die hohe Durchlässigkeit der Aufstiegszone ermöglicht in diesem Fall die Zirkulation der Grundwässer innerhalb des schmalen Aufstiegsbereiches, während die im Ausgangsmodell „3D Ohlsbach“ eingestellten Mindest- $k_f$ -Werte zu einem direkten Grundwassertaufstieg führen. Dieser Effekt ist in Abb. 22 anhand der 3D-Stromfäden

dargestellt. Die Temperaturverteilung wird im Übrigen durch eine Erhöhung der Aufstiegsdurchlässigkeit nicht beeinflusst.

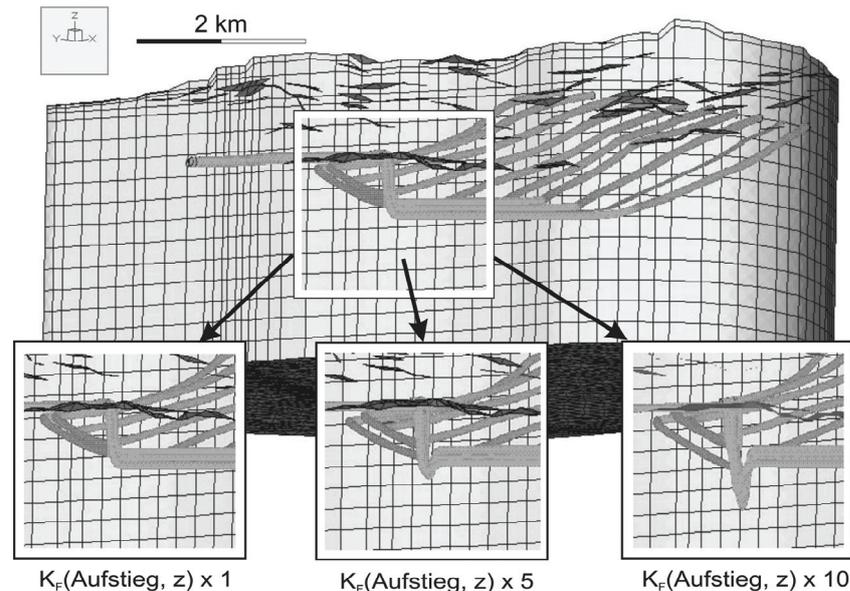


Abb. 22: Veränderung des Strömungsfeldes bei Erhöhung der Durchlässigkeit im Aufstiegsbereich. Je mehr die  $k_f$ -Werte erhöht werden, um so stärker biegen die Stromfäden nach unten ab, bevor sie aufsteigen.

Wird die Durchlässigkeit der Aufstiegszone verringert, so weichen die Stromfäden aus der Aufstiegszone aus und laufen in den Störungsbereich hinein, um erst kurz vor Erreichen der Quartärschicht wieder im Kreuzungsbereich der Störungen zusammenzutreffen. Die Durchlässigkeit der Aufstiegszone liegt damit unterhalb der Mindestdurchlässigkeit für die Aufnahme der über das Kristallin und die Störungen zugeführten Grundwasser. Die Temperatur der Aufstiegswasser sinkt unter Einsatz geringerer Durchlässigkeiten.

Aus den dargestellten Sensitivitätsstudien folgt, dass Änderungen der Wärmetransportparameter oder der hydraulischen Durchlässigkeiten zu einer Verschlechterung der Modellergebnisse führen, sofern nicht parallel andere Parameter angepasst werden. Denkbar wäre zum Beispiel eine weniger starke

Abnahme der  $k_f$ -Werte mit der Tiefe verbunden mit einer leichten Verringerung der  $k_f$ -Werte der oberen Schichten und einem geringeren basalen Wärmefluss. Damit könnten sowohl die Aufstiegstemperaturen als auch die Grundwasserneubildung konstant gehalten werden. Die Temperaturen im unteren Modellbereich wären jedoch geringer und würden damit nicht mehr den Vorstellungen des Konzeptmodells genügen. So ist die vorgestellte Parameterkonfiguration des Modells „3D Ohlsbach“ die optimale Lösung unter den gegebenen geometrischen Voraussetzungen.

## 4.2 Baden-Baden

### 4.2.1 Datengrundlage

Betrachtet wird zunächst das Gebiet südöstlich der Quellaustritte, das als wahrscheinliches Einzugsgebiet gilt (BENDER 1995). Die Datenrecherche erstreckte sich über das Gebiet des Stadtkreises Baden-Baden, welches dem derzeitigen Quellschutzgebiet entspricht. Wichtige historische Arbeiten zum Thermalwasseraustritt Baden-Baden stammen von KIDERLEN (1953), KIRCHHEIMER (1959), SAUER (1966) und MAUS et al. (1972).

Die geologische Karte 1:25.000 von Baden-Baden (Blatt Nr. 7215) auf der Basis der Kartierungen um 1900 bildet eine wichtige Grundlage für die Ausgliederung der hydrogeologischen Einheiten des Konzeptmodells. Die geologische Karte des Baden-Badener Permokarbons von SITTIG (2003), Geländebegehungen im Jahre 2004 sowie die Auswertung der neueren Aufschlüsse – vor allem Bohrungen und der Michaelstunnel – führten zu einer Erweiterung des Verständnisses der tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse. Eine geologische Übersichtskarte des Einzugsgebietes ist in Abb. 23 dargestellt.

Das mutmaßliche Einzugsgebiet der Thermalwässer wird von Graniten dominiert, die in den hochgelegenen Bereichen von Buntsandstein überlagert werden. Der nördliche Teil des Gebietes umfasst karbonische und permische Sedimentit- und Vulkanitfolgen, die bis über 900 m mächtig das kristalline Grundgebirge überlagern. Aus geologischen Aufnahmen und hydrogeologischen sowie geothermischen Untersuchungen ist bekannt, dass die Störungszonen innerhalb und am Rand dieses Permokarbondrages die Aufstiegswege der Thermalwässer erheblich beeinflussen. Starke wasserführende Störungen ermöglichen den seit über 2 Jahrtausenden existierenden Austritt heißer Tiefenwässer. Für eine eingehende Beschreibung der geologischen und tektonischen Verhältnisse wird an dieser Stelle auf SCHRAGE (2004) verwiesen.

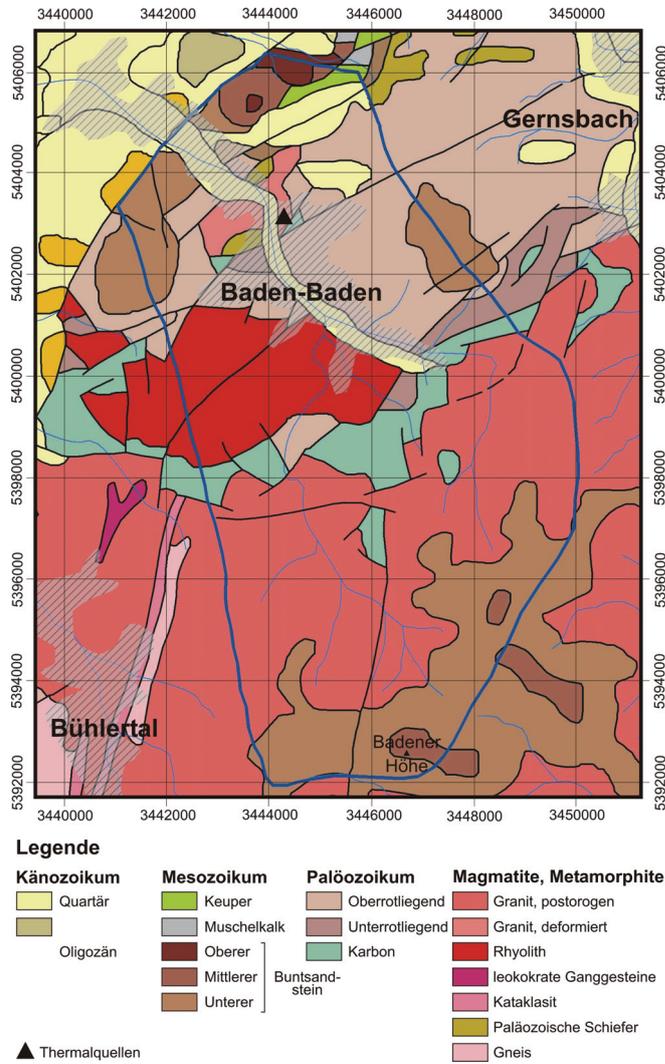


Abb. 23: Geologische Einheiten und Verlauf der wichtigsten tektonischen Elemente im Einzugsgebiet Baden-Baden, bearbeitet nach LGRB (1998)

Kenndaten zu den Quellen und Bohrungen entstammen den Unterlagen im Umweltamt Baden-Baden, dem LGRB sowie der Carasana Bäderbetriebe GmbH. In der folgenden Tabelle sind die aktuellen Temperatur- und Schüttungswerte der wichtigsten Quellen sowie der beiden Bohrungen im Pflutterloch zusammengestellt:

Tabelle 12: Schüttung und Temperatur der Baden-Badener Thermalquellen und der Pflutterloch-Bohrungen (Carasana Bäderbetriebe GmbH 2004, LGRB und Umweltamt Baden-Baden 2004)

	Schüttung [l/s]	Temperatur [°C]
Friedrichquelle		64,6
Höllquelle	4,700	68,8
Brühquelle		66,1
Judenquelle		66,1
Ursprungsquelle	1,250	66,4
Fettquelle	0,755	64,1
Murquelle	0,031	56,0
Klosterquelle	0,092	56,3
Höllgaßquelle	0,067	51,0
Kühlquelle	0,300	59,3
Freibadquelle	0,127	58,6
Rosen- und Kirchenstollen	0,819	54,8
Neuer Stollen	0,238	60,7
Bohrung Pflutterloch I	0,667	59,5
Bohrung Pflutterloch II	0,370	51,2
Gesamtschüttung	9,5 l/s = 814 m <sup>3</sup> /d	
Nach Schüttung gewichtetes Temperaturmittel		63,5°C

Die chemische und isotopische Beschaffenheit der Quell- und Bohrungswässer weist auf ein altes Kristallin-Grundwasser hin, das sich durch lang andauernde Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen und Mischung mit eingeschlossenem Meerwasser aus ursprünglich meteorischem Wasser entwickelt hat (STÖBER et al. 2000). Das Thermalwasser kann als Na-Cl-Therme klassifiziert werden und weist einen Feststoffgehalt von ca. 3 g/l auf. Die <sup>14</sup>C-Datierungen ergeben Alter von 26.500 Jahren für die Friedrichsquelle und 10.225-17.000 Jahren für die erbohrten Grundwässer im Pflutterloch, während die Gehalte an

stabilen Isotopen eine Bildung der Grundwässer unter warmzeitlichen Bedingungen anzeigen (BENDER 1995). Unter Betrachtung der gleichzeitigen Ungenauigkeit der  $^{14}\text{C}$ -Methode für die vorliegenden geringen C-Gehalte in Verbindung mit der hohen sonstigen Mineralisation sind diese Altersdaten daher mit Vorsicht zu interpretieren.

Der Zusammenhang zwischen den natürlichen Quellen und den im Pflutterloch erbohrten Grundwässern ist noch nicht völlig geklärt. Nach SCHRAGE (2004) entstammen beide Wassertypen vermutlich dem gleichen unterirdischen Reservoir, wobei die Aufstiegswege schließlich so deutlich voneinander getrennt verlaufen, dass nur eine sehr schwache hydraulische Verbindung zwischen Bohrungen und Quellen nachgewiesen werden kann.

Das Einzugsgebiet umfasst nach SCHRAGE (2004) und LGRB (1974, 1998) die südlich der Lichtentaler Senke liegenden Höhenzüge und wird durch die unterirdische Wasserscheide entlang der Linie Sand-Seekopf-Oberes Seebachtal-Wanneck im Süden begrenzt.

Die Thermalwasseraustritte bleiben hauptsächlich auf den engeren Quellbezirk beschränkt. Nur in einigen wenigen Baugruben der Umgebung und beispielsweise beim Bau des Michaelstunnels im Bereich der Störungszone zwischen paläozoischen Schiefen und Oberkarbon-Sedimenten wurden stark mineralisierte Grundwässer mit leicht erhöhten Temperaturen angetroffen (SCHRAGE 2004). Erhöhte geothermische Gradienten in den oberen 10er Metern der Erdkruste wurden jedoch auch in der weiteren Umgebung und vor allem nördlich des Neuen Schlosses im Pflutterloch festgestellt (NLFB 1962 im Auftrag des GLA), woraufhin die Pflutterloch-Bohrungen an dieser Stelle angesetzt wurden.

Die Lufttemperaturen im Stadtkreis Baden-Baden betragen nach (DWD 1999) im langjährigen Mittel zwischen 4,5 und 9,6 °C je nach Höhenlage, welche zwischen 140 m im Oostal und 1000 m ü. NN auf der Badener Höhe variiert.

Der oberirdische Abfluss aus dem Gebiet beträgt am Pegel Baden-Baden/Oos  $4,7 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$  bzw. 666 mm/a. Die nach ARMBRUSTER (2002) ermittelte Grundwasserneubildung ergibt sich zu  $2,6 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$  bzw. 368 mm/a.

Die Wärmetransportparameter wurden vor allem BURKHARDT et al. (1989) und STOBER (1994) entnommen. Auch wenn beide Veröffentlichungen auf den mittleren Schwarzwald fokussiert sind und keine spezifischen Angaben zu den geothermischen Verhältnissen des Nordschwarzwaldes machen, werden die ermittelten Daten jedoch mangels alternativer Untersuchungen und in Anbetracht der ähnlichen lithologischen und tektonischen Situation als Richtwerte übernommen. Sie sind in Kapitel 4.1.1 aufgeführt.

Geothermometerberechnungen ergeben maximale Bildungstemperaturen von 150-160°C (STOBER 1995, BENDER 1995) und - unter Annahme eines geothermischen Gradienten von 3°K/100 m - maximale Zirkulationstiefen von ca. 4000 m. Für die Porosität des Nordschwarzwälder Granites gibt STOBER (1995) Maximalwerte von bis zu 2,1 % als Ergebnis von Pumpversuchen im Kristallin an. Die hydraulischen Durchlässigkeiten entsprechen Größenordnungen um  $6 \cdot 10^{-8}$  m/s (STOBER 1995).

### **Konzeptmodell**

Die Zusammenschau der vorliegenden Daten führt zum folgenden konzeptionellen Modell der Thermalwasserzirkulation bei Baden-Baden: Niederschlagswässer infiltrieren auf den Höhenzügen südlich von Baden-Baden, bewegen sich entlang von bevorzugten Kluft- und Störungszonen nach unten und folgen dem topographischen Gradienten in Richtung Norden. Die Grundwasserströmung dauert mehrere tausend Jahre und ist begleitet von einer Aufheizung des Wassers und von intensiven Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen. Im Aufstiegsbereich direkt unterhalb des Baden-Badener Stadtgebietes kommt es zu einem komplexen Zusammenwirken von Stau- und Leitungseffekten der Störungen am Rand des Permokarbondrogenes. Zusätzliche Stauwirkung bringen die Gesteine der Oostalfüllung einerseits und der wenig gestörten Forbach-Granite im Norden andererseits. Der eigentliche Aufstieg des Thermalwassers verläuft mit hohen Fließgeschwindigkeiten und entlang stark geklüfteter Bereiche, welche die stauenden Störungszonen selbst begleiten. Dabei spaltet sich eine bevorzugte Wasserwegsamkeit in Oberflächennähe in mehrere Fließwege auf, welche die einzelnen Quellen speisen. In einem noch tiefer gelegenen Bereich zweigen Grundwasseranteile weiter nach Norden ab, wo sie ebenfalls aufsteigen und die Bohrungen im Pflutterloch erreichen. Diese fördern jedoch zusätzlich Wasser aus einem stagnierenden Reservoir, welches sich durch die Druckentlastung langsam erschöpft (SCHRAGE 2004). Die nachfolgende Prinzipskizze verdeutlicht noch einmal die erläuterten mutmaßlichen Fließwege.

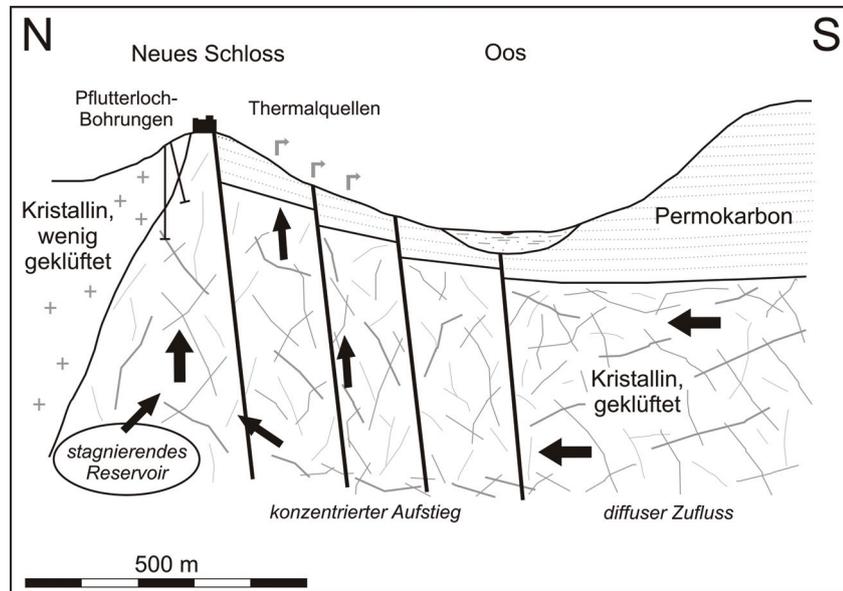


Abb. 24: Schematische Darstellung des Fließsystems im Aufstiegsbereich der Baden-Badener Thermalwässer

Im numerischen Modell sollen die Quellen und Bohrungen zu einem „Quellknoten“ zusammengefasst werden, da die Aufgliederung der Fließwege in Oberflächennähe einerseits nicht mit Daten belegt ist und andererseits einen im Vergleich zum gesamten Strömungsfeld nur geringen Effekt bedeutet. Die Gesamtschüttung der Baden-Badener Thermalwasseraustritte bestimmt die im Modell zirkulierende Wassermenge, so dass ausschließlich die Thermalwasserzirkulation simuliert wird und flachere Grundwasserbewegungen außer Acht gelassen werden. Aus den vorliegenden Daten wird schließlich das folgende quantitative Konzeptmodell abgeleitet:

Tabelle 13: Parameter des Konzeptmodells Baden-Baden (Quellen siehe Datengrundlage)

Gesamtschüttung Quellen + Bohrungen	814 m <sup>3</sup> /d
Größe des Einzugsgebietes	70 km <sup>2</sup>
maximale Zirkulationstiefe	4000 m u. Gel.
Temperatur der Aufstiegsässer	63,5°C
Oberflächentemperatur	10°C
Wärmeflussdichte in 3000 m u. NN	82 mW/m <sup>2</sup>
Alter der Thermalwässer	ca. 11.000-27.000 Jahre

#### 4.2.2 Vorstudien

Die Diplomarbeit SCHRAGE (2004) behandelt ausführlich die Entwicklung, den Aufbau und die Ergebnisse eines zweidimensionalen Strömungs- und Wärmetransportmodells des Baden-Badener Einzugsgebietes. Ein Profilschnitt von 9,5 km Länge und 3,5 km u. NN Tiefenreichweite wurde NW-SE streichend durch das Quellgebiet und den mutmaßlichen Anstrombereich gelegt. Zwar wurde die Kalibration nicht vollständig ausgeführt, doch konnte an dem Modell nachgewiesen werden, dass eine Simulation der Baden-Badener Strömungsverhältnisse in Verbindung mit der auftretenden Temperatursituation möglich ist und die Parameter des Konzeptmodells im numerischen Modell umgesetzt werden können.

Weiterhin wurde in der Arbeit ein dreidimensionales Modell vorgestellt, welches in den Grundzügen dem nachfolgend präsentierten Ergebnismodell „3D Baden-Baden“ entspricht. Für eine eingehendere Beschreibung des Entwicklungsprozesses beider Modelle wird auf SCHRAGE (2004) verwiesen. In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die aus den Vorstudien resultierende Ergebnis-Konfiguration erläutert.

#### 4.2.3 Ergebnismodell „3D Baden-Baden“

##### 4.2.3.1 Geometrie

Das Modellgebiet ist ca. 70 km<sup>2</sup> groß und reicht bis in 3,5 km u. NN Tiefe. Die topographischen Höhen liegen zwischen 138 m und 1006 m ü. NN. Eine 25 m breite Störungszone mit abgrenzbarem Aufstiegsbereich in direkter Umgebung des Quellknotens wird als Grundlage des Gitternetzes ebenso vorgegeben wie die nördliche Begrenzung des Kristallinvorkommens durch die Randstörungen des Permokarbondtroges. Die Netzkonfiguration ist auch Abb. 25 zu entnehmen.

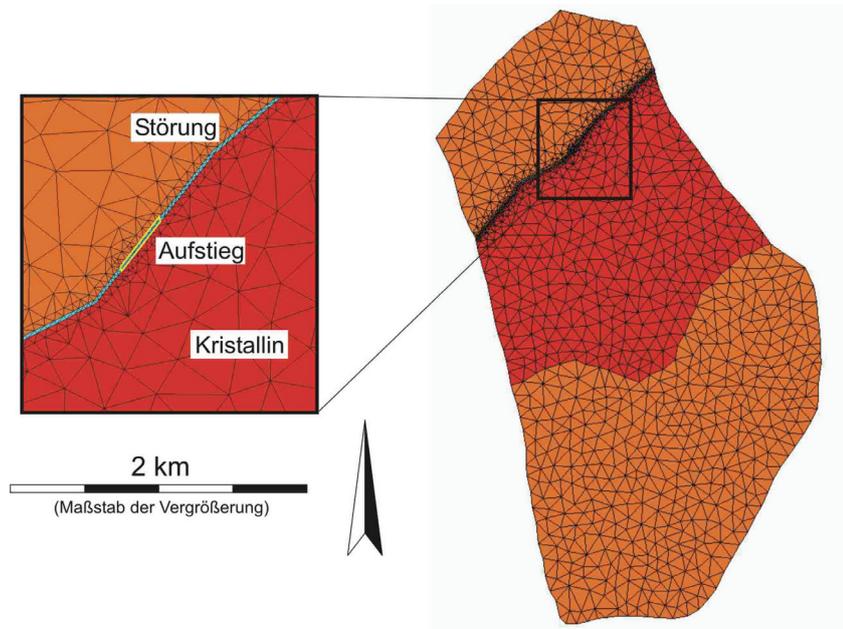


Abb. 25: Hydrogeologische Einheiten und horizontale Diskretisierung des Modells „3D Baden-Baden“

Die vertikale Diskretisierung des insgesamt 26140 Elemente umfassenden Gitters ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Baden-Baden“

Ebene 1	Topographische Höhen aus dem digit. Höhenmodell (138-1006 m)
Ebene 2	mittig zwischen den Ebenen 1 und 3
Ebene 3	+150 m, im nördlichen Oostal Topographische Höhe – 10 m
Ebene 4	0 m
Ebene 5	-250 m
Ebenen 6 - 18	-500 m bis -3500 m in Abständen zu je 250 m

Es werden drei Referenzpunkte eingeführt. Punkt 1 liegt in Ebene 1 an der Position der Thermalquellen (<sup>34</sup>44300, <sup>54</sup>03180) und zeigt somit die Verhält-

nisse beim Austritt der Grundwässer an der Oberfläche an. Die Referenzpunkte 2 und 3 liegen bei  $^{34}46100$ ,  $^{53}98050$  am nördlichen Rand des Neubildungsgebietes auf den Ebenen 8 (-1000 m) bzw. 14 (-2500 m).

#### 4.2.3.2 Parameter

Das Modell unterscheidet die Einheiten Kristallin, Permokarbon, Aufstieg und Störung (siehe Abb. 25). Die folgenden Tabellen fassen die Modellparameter zusammen.

Tabelle 15: Randbedingungen des Modells „3D Baden-Baden“

<b>Strömung</b>		
Ebene 1, Südlicher Teil	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe = Topographische Höhe - 10 m
	Nebenbedingung 2. Art	kein GW-Strom nach außen
Ebene 1, „Quellknoten“	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe 200 m ü. NN
<b>Wärmetransport</b>		
Ebene 1, außer „Quellknoten“	Randbedingung 1. Art	Temperatur 7°C
Ebene 18	Randbedingung 2. Art	Wärmefluss 80 mW/m <sup>2</sup>

Tabelle 16:  $k_f$ -Werte im Modell „3D Baden-Baden“

$k_f$ in m/s	Kristallin	Störung und Aufstieg (x,y)	Aufstieg (z)	Permokarbon
Schicht 1-4	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Schicht 5	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	
Schicht 6-7	$7 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$	
Schicht 8-9	$2 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	
Schicht 10-11	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-7}$	
Schicht 12-13	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	
Schicht 14-15	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$	
Schicht 16-17	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	

Tabelle 17: Wärmetransportparameter im Modell „3D Baden-Baden“

	Kristallin	Störungen, Aufstieg	Permo- karbon
Porosität	0,01	0,1	0,01
Wärmekapazität Gestein [MJ/m <sup>3</sup> K]	2,52	2,52	2,52
Wärmeleitfähigkeit Gestein [J/msK]	2,8	2,8	2,5
radiogene Wärmeproduktion [ $\mu$ W/m <sup>3</sup> ]	4	4	4

#### 4.2.3.3 Ergebnisse

Die Berechnungen ergeben Werte für die Temperaturverteilung und die Wasserbilanz, welche das Konzeptmodell gut wiedergeben. Sowohl die Grundwasserneubildung mit rund 815 m<sup>3</sup>/d als auch die Quelltemperatur mit 63,5°C werden vom Modell korrekt nachgebildet. Die Temperaturen an den Referenzpunkten in 1000 m bzw. 2500 m u. NN liegen im Rahmen plausibler Werte, wenn auch die Temperatur bei Referenzpunkt 2 einen relativ geringen geothermischen Gradienten von 2,5°K/100 m ergibt.

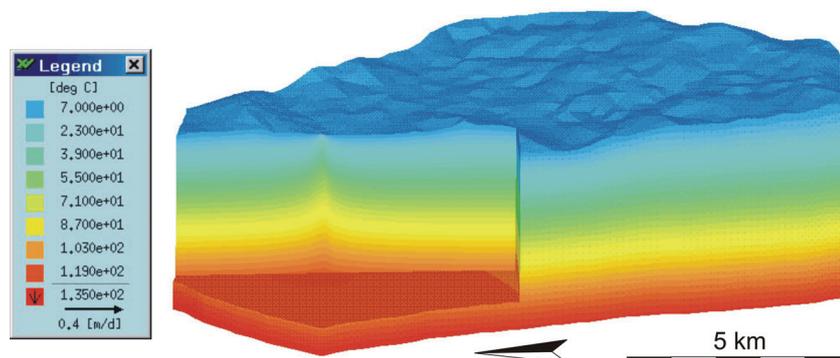


Abb. 26: Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Baden-Baden“

In Tabelle 18 sind die wichtigsten Berechnungsergebnisse im Überblick zusammengestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse aus dem Modell „3D Baden-Baden“

Grundwasserneubildung	816 m <sup>3</sup> /d (Konzeptmodell: 814 m <sup>3</sup> /d)
Quelltemperatur	63,6°C (Konzeptmodell: 63,5°C)
Temperatur Referenzpunkt 2	45°C (geotherm. Gradient 2,5K/100 m)
Temperatur Referenzpunkt 3	91°C (geotherm. Gradient 2,8K/100 m)
Temperatur an der Modellbasis	127 - 134°C (geotherm. Gradient 2,6 - 3,4K/100 m)
Max. DARCY-Geschwindigkeit	1,6 m/d
Mittlere Verweilzeit	10.400-12.000 a

Das berechnete Strömungsfeld ist in Abb. 27 durch Stromfäden verdeutlicht. Der Einfluss des Permokarbtroges ist am Absinken der Stromlinien in der oberen Modellmitte zu sehen. Wie im Modell „Kinzigtal 3D“ zirkuliert auch hier der Hauptteil der Grundwässer in relativ geringer Tiefe und nur ein Bruchteil erreicht die Nähe der Modellbasis. Die Durchflüsse der einzelnen Schichten sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Die Bewegungsbahnen verlaufen vom Infiltrationsgebiet aus nach unten und bewegen sich Richtung Nordwesten zum Oberrheingrabenrand. In der Störungszone strömen die Grundwässer gebündelt der Aufstiegszone zu und steigen in dieser vertikal nach oben, um an der Modelloberfläche durch den Quellknoten schließlich das Modell zu verlassen.

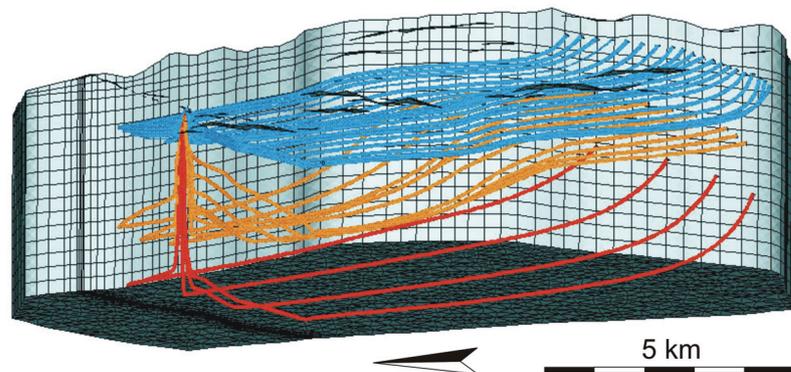


Abb. 27: Berechnetes Strömungsfeld der Grundwässer im Modell „3D Baden-Baden“

Tabelle 19: Vertikaler Durchfluss der einzelnen Modellschichten

Schicht	2	3	4	5	6	7	8	9
Durchfluss in m <sup>3</sup> /d	831	786	687	384	126	103	86	79
Schicht	10	11	12	13	14	15	16	
Durchfluss in m <sup>3</sup> /d	72	63	54	45	35	25	15	

## 4.2.3.4 Sensitivitätsanalyse

*Wärmetransportparameter*

Analog zum Modell „3D Kinzigtal“ wurde auch für das Modell des Standortes Baden-Baden eine Sensitivitätsanalyse der bedeutendsten Wärmetransport- und Strömungsparameter durchgeführt. Dargestellt sind die Ergebnisse als Graphen des jeweiligen Parameters und der resultierenden Modelltemperaturen, wobei zum Vergleich wiederum die Referenzpunkte herangezogen werden. Die Temperatur an Referenzpunkt 1 ist dabei mit der Quelltemperatur bekannt, die beiden übrigen Temperaturen wurden aus einem durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 3 °K/100 m errechnet. Wieder wurden die jeweils als geeignet resultierenden Parameter in der weiteren Sensitivitätsanalyse als „Idealparameter“ beibehalten.

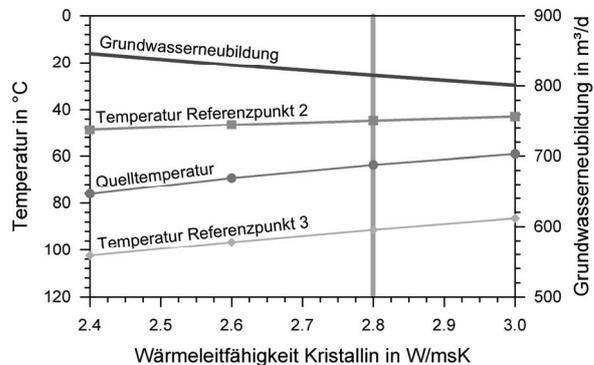


Abb. 28: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Wärmeleitfähigkeit des Granites für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar. (Erläuterung siehe Text)

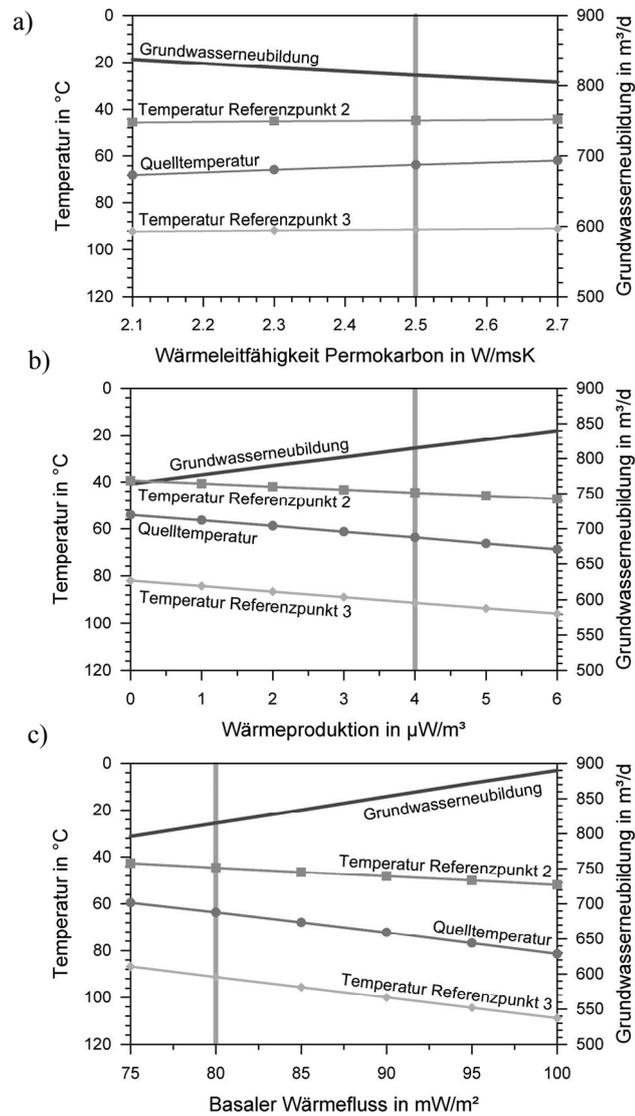


Abb. 29a-c: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für a) Wärmeleitfähigkeit des Permokarbon, b) radiogene Wärmeproduktion und c) basale Wärmeflussdichte für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar. (Erläuterung siehe Text)

### Hydraulische Durchlässigkeiten

Die Variation der hydraulischen Durchlässigkeiten führt erwartungsgemäß zu einer Verschlechterung der Modellergebnisse. Ohne gleichzeitige Anpassung anderer Parameter, wie der basalen Wärmeflussdichte oder der Gebietsgröße, führen veränderte  $k_f$ -Werte zu einer Abweichung der Grundwasserneubildung und der Temperaturverteilung von den Vorgaben des Konzeptmodells (siehe Abb. 30). Da die Wärmeparameter nur eine begrenzte Auswirkung auf die Temperaturverteilung besitzen und die Grundwasserneubildung gar nicht beeinflussen, ist damit eine wirkliche Gegensteuerung zur  $k_f$ -Wert-Änderung nicht möglich. Werden nicht alle  $k_f$ -Werte des Modells um den gleichen Faktor geändert, so hat dies Auswirkungen auf das Strömungsfeld, das sich vom idealen Ergebnis entfernt. Für diese Modellgeometrie und die geltenden Randbedingungen resultiert demzufolge die  $k_f$ -Wert-Verteilung als eindeutige Lösung.

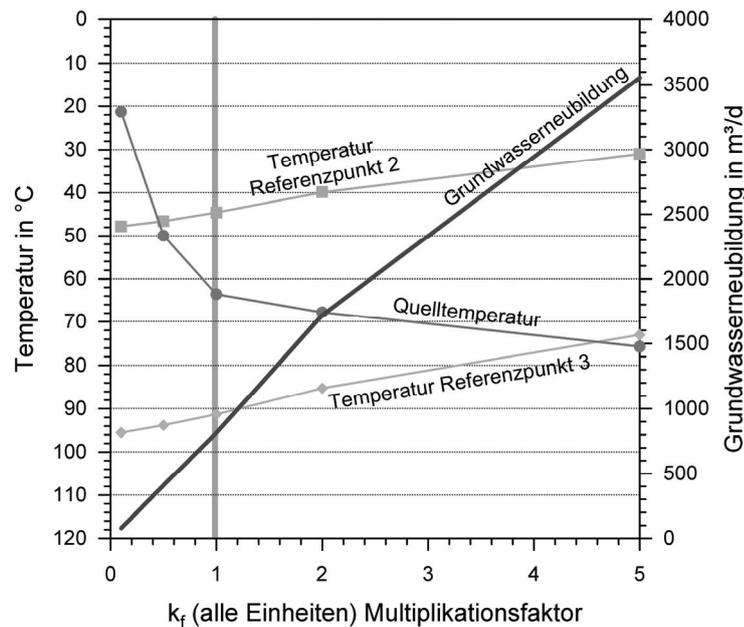


Abb. 30: Änderung der  $k_f$ -Werte um einen Faktor und Auswirkung auf die Modellergebnisse für das Modell „3D Baden-Baden“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.

## 4.3 Badenweiler

### 4.3.1 Datengrundlage

Die Darstellung soll zunächst die hydrochemischen und geothermischen Daten umfassen und erst im Anschluss daran die sehr komplexen geologischen Verhältnisse erläutern. Es treten drei natürliche Quellen aus, aber nur die sog. Römerquelle ist in einem Stollen gefasst und wird im Kurbetrieb verwendet. BERG et al. (1961) beschreiben die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse der Badenweilerer Thermen und gehen u. a. auf die Lage der einzelnen Quellaustritte im Stollen ein. Zusätzlich werden die beiden Bohrungen Badenweiler II und III genutzt (SAUER 1974). Die Bohrung Badenweiler II in der Vorbergzone erschließt zwei Thermalwasser führende Horizonte: den oberen Thermalwasserhorizont im Mittleren Muschelkalk bis Unteren Keuper sowie den unteren Thermalwasserhorizont im Rotliegenden bis Oberen Buntsandstein. Badenweiler III nutzt dagegen nur die Zuflüsse aus dem unteren Thermalwasserhorizont. Abb. 31 stellt die durchteuften Einheiten beider Bohrungen dar.

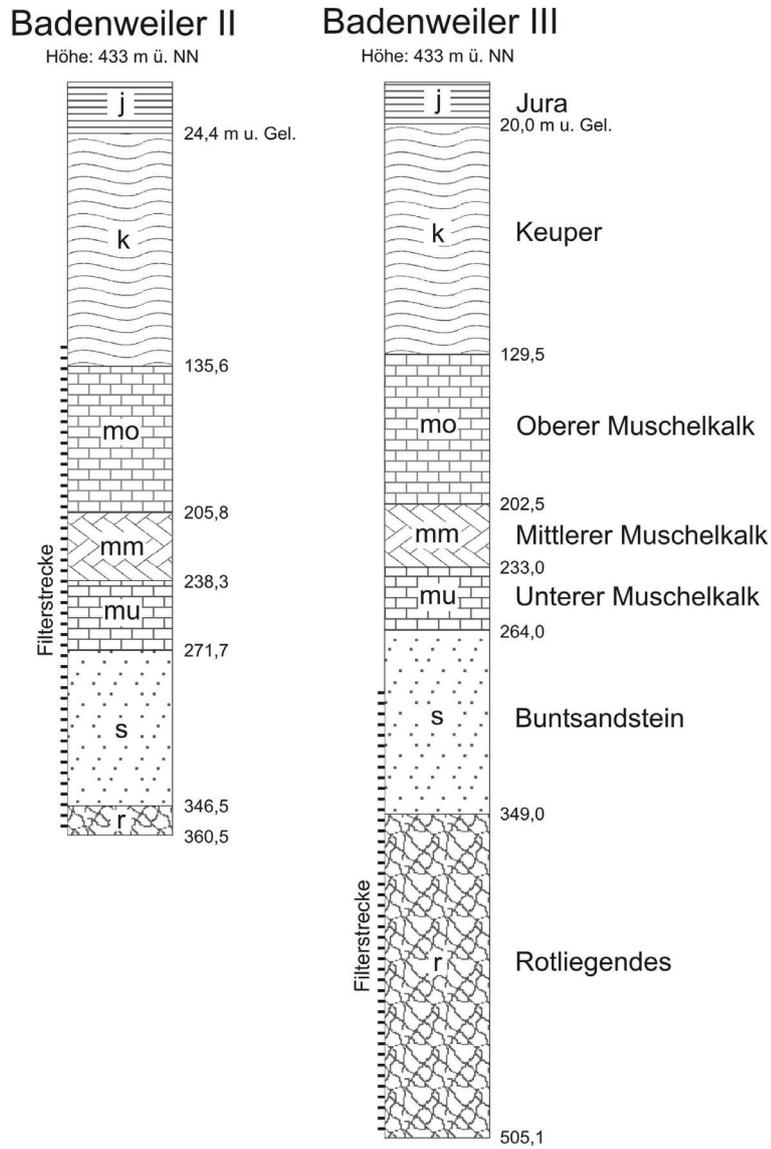


Abb. 31: Bohrprofile von Badenweiler II und Badenweiler III mit Kennzeichnung der Filterstrecke

Die Quell- bzw. Auslauftemperaturen aus dem Jahr 2004 sowie die zugehörigen Schüttungen bzw. Förderraten sind in Tabelle 20 zusammengestellt.

Tabelle 20: Temperaturen und Schüttungs- bzw. Förderraten der Quellen und Bohrungen in Badenweiler

	Temperatur in °C	Schüttung/Fördermenge in l/s
Römerquelle	26,0	12
Badermattquelle	19,5	2
Heidelquelle	20,3	0,5
Bohrung I	22,0	nicht genutzt
Bohrung II	20,5	3
Bohrung III	24,2	3

Die Quelltemperaturen sind in den letzten 40 Jahren nahezu konstant geblieben. Die gemessenen Differenzen betragen unter 2°C (HE 1998). Auch die Auslauftemperaturen der Bohrungen zeigten keine größeren Abweichungen vom Mittelwert.

Die Schüttung der Römerquelle unterliegt größeren Schwankungen. Einer mittleren Schüttung von 13 l/s im Zeitraum 1941-1993 stehen ein Maximalwert von 15 l/s und ein Minimalwert von 3 l/s gegenüber (HE 1998). Untersuchungen von BASTING (1977) wiesen für den Zeitraum 1967-1971 eine deutliche Niederschlagskopplung der Schüttung der Römerquelle nach. Mit einer Phasenverschiebung von 9-10 Monaten zeigen sich vor allem Niederschlagsminima in der Schüttungskurve ebenfalls als Minima. Die Kurve ist jedoch schwer zu interpretieren, weil sie stark gedämpft und verzerrt erscheint und eventuell durch die Pumpversuche in den Bohrungen Badenweiler II und III beeinflusst ist. Diesen Effekt untersuchte BASTING (1977) nicht.

Pumpversuche wurden in den Jahren ab 1967 jeweils für beide Bohrungen getrennt durchgeführt. Bei stufenweise gesteigerter Brunnenförderung über mehrere Tage wurden die Absenkung im Bohrloch und die Schüttung der Römerquelle gemessen. Dabei zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Brunnenförderung auf die Quellschüttung, wenn jene 6 l/s überstieg. Die Römerquelle sprach zwei bis fünf Tage nach Erhöhung der Fördermengen an. Bei geringeren Förderraten konnte keine hydraulische Verbindung zwischen Quellen und Bohrungen nachgewiesen werden. Die Absenkung in Bohrung III betrug bei einer Förderrate von 11 l/s ca. 30 m und die Quellschüttung im Stollen ging in diesem Fall um 3,6 l/s zurück (PV 12/1972). Die Bohrungen II

und III stehen im oberen Thermalwasserhorizont (Mm-Ku) hydraulisch miteinander in Verbindung, während im unteren Thermalwasserhorizont (So-Ro) und im darunter liegenden „Quarzporphyr“ keine Verbindung zu existieren scheint (BASTING 1977).

Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung führte im Jahre 1962 im Auftrag des GLA eine Geothermiestudie durch, die als Grundlage für die Neuerschließung von Thermalwässern durch Bohrungen dienen sollte. In diesem Rahmen wurden an einem Messstellenraster von  $50 \times 50$  m Bodentemperaturmessungen in 4 bis 10 m Tiefe im Stadtgebiet Badenweiler vorgenommen. Das Untersuchungsgebiet orientierte sich an den bekannten drei Thermalwasseraustritten Römerquelle, Badermattquelle und Heidelquelle sowie am Verlauf des „Quarzriff“. In 4 m Tiefe wurden Temperaturen zwischen 10 und 14 °C ermittelt. Die Maxima traten lokal in der Nähe der Thermalquellen und an weiteren Punkten im Gebiet auf, die sich aufgrund der beschränkten Aufschlussverhältnisse nur schwer mit geologischen Einheiten oder Strukturelementen korrelieren lassen. Sie weisen jedoch darauf hin, dass neben den Quellaustritten in geringer Tiefe weitere warme Grundwässer im Untergrund zirkulieren, welche nicht bis an die Erdoberfläche gelangen. An ausgewählten Punkten mit erhöhter Untergrundtemperatur wurden 10 m tiefe Bohrungen abgeteuft und Temperaturmessungen durchgeführt. Dabei wurden gegenüber dem normalen Temperaturgradienten von 3K/100 m um bis zu 5,4 °C erhöhte Temperaturen in 10 m Tiefe festgestellt (HÄNEL 1968).

Temperaturen in größerer Tiefe sind aus den beiden Bohrungen Badenweiler I und Badenweiler III bekannt. Beide Temperaturprofile (Abb. 32) wurden 1972 gemessen. Badenweiler I war zu diesem Zeitpunkt bereits 8 Jahre alt, während die Messungen in Badenweiler III etwa 10 Tage nach Abschluss der Bohrarbeiten erfolgten. Die Versteilung der Temperaturkurve von Badenweiler III im Teufenbereich 120 bis 200 m ist vermutlich auf erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten im Lettenkeuper und oberen Muschelkalk zurückzuführen, wo zirkulierende Grundwässer die kontinuierliche Temperaturzunahme mit der Tiefe stören. Die Ursache der starken Temperaturerhöhung an der Bohrlochbasis ist nicht geklärt. Auch in Badenweiler I kann die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit zwischen 100 und 175 m im stark gestörten Muschelkalk, Buntsandstein und Quarzriff für den sehr steilen Verlauf der Temperaturkurve verantwortlich gemacht werden.

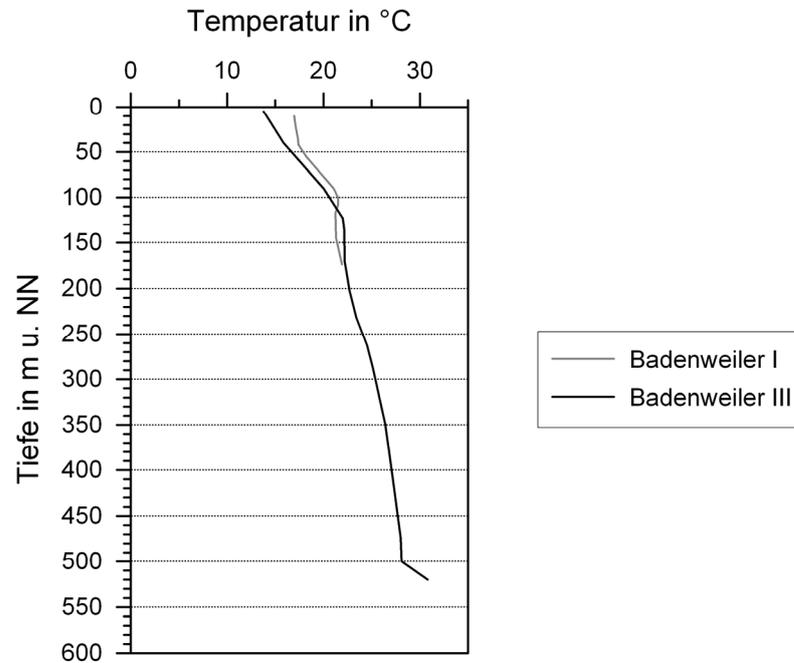


Abb. 32: Temperaturprofile der Bohrungen Badenweiler I und Badenweiler III (beide gemessen 1972, in Badenweiler III 10 Tage nach Abschluss der Bohrarbeiten)

Geothermometerberechnungen weisen auf Maximaltemperaturen von 27 bis 50 °C der Grundwässer aus Bohrungen und Quellen hin (HE et al. 1997). Setzt man einen geothermischen Gradienten von 3,8K/100 m ein, wie er in der Bohrung III bestimmt wurde, so entsprechen die Geothermometertemperaturen maximalen Eindringtiefen von 500-1100 m unter Gelände.

Die chemische Beschaffenheit der Wässer in Quellen und Bohrungen ist sehr ähnlich. In beiden Fällen wird als Wassertyp eine Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Akratotherme ermittelt. Die erbohrten Wässer zeigen gegenüber den Quellwässern leicht erhöhte Ca<sup>2+</sup>- und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Konzentrationen sowie Gesamtfeststoffgehalte (HE 1998). Dies ist auf die längere Fließstrecke in mesozoischen Sedimenten zurückzuführen, welche im Falle der Quellwässer geringmächtiger und stärker verkieselt als in der Vorbergzone auftreten. Sowohl in den Bohrungs- als auch in den Quellwässern treten erhöhte Urangelhalte auf

(BASTING 1977), die durch Lösung aus den im Blaugranit enthaltenen Uran-<sup>238</sup>U-Isotopen (KIRCHHEIMER 1957) zu erklären sind.

Die Quellen zeigen leichte Anteile von Rezentwasser. BASTING (1977) ermittelte aus Tritiumgehalten 2,65% Rezentanteil für die Römerquelle, 6,3% für die Badermattquelle und 24% für die Heidelquelle. Die Bohrung III weist im unteren Thermalwasserhorizont 0,5% Rezentwasseranteil auf.

Die <sup>14</sup>C-Modellalter, welche durch BASTING (1977) errechnet wurden, betragen 9.300 Jahre für die Römerquelle und 10.400 Jahre für die Bohrung III. Durch den Autor selbst relativiert und in ihrer Aussagekraft in Frage gestellt, sollten diese Werte jedoch nur als Größenordnungen für die Verweildauer betrachtet werden.

Das Grundgebirge östlich der Oberrheingrabenrandverwerfung besteht aus einer komplexen Serie von Graniten, Gneisen, Grauwacken, „Porphyren“ und Konglomeraten. Die geologische Übersichtskarte in Abb. 33 zeigt das Ausstreichen der wichtigsten Gesteinseinheiten an der Erdoberfläche.

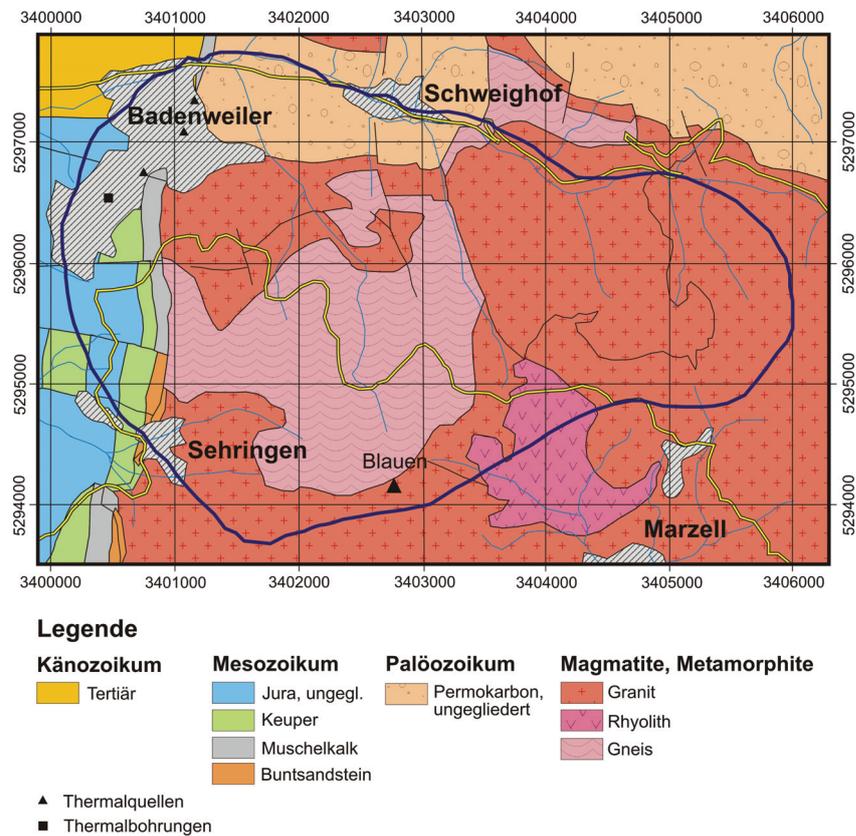


Abb. 33: Geologische Übersichtskarte des mutmaßlichen Einzugsgebietes der Thermalquellen und -bohrungen von Badenweiler

Der Aplitgranit ist ein feinkörniger, hellroter Granit mit vereinzelt großen Feldspäten. Der Malsburggranit ist mittelkörnig und rotgrau gefärbt. Seine Klüfte sind mit Chlorit verheilt. Der Klemmbachgranit ist ein mittelkörniges, hellgraues Gestein mit schwach geregelten Glimmern. Der Granit im Wehra-Wiese-Komplex ist mittel- bis grobkörnig und grau. Alle Granite werden nach Datierungen in das Unterkarbon um 334 bis 332 Ma gestellt. Sie werden von Gängen und eingeschalteten Linsen aus Granitporphyr durchschlagen, der auf 332 Ma datiert wurde. Im oberen Unterkarbon wurde das „Bunte Konglomerat“ in dem von großen Störungen begrenzten Permokarbon-Trog von Baden-

weiler-Lenzkirch abgelagert. Dieses Konglomerat setzt sich hauptsächlich aus Graniten, Vulkaniten, Grauwacken, Arkosen, Sandsteinen und Tonsteinen zusammen. Der Deckenporphyr vom Stockberg ist ein im unteren Rotliegend eruptierter Rhyolith, der ca. 250 m mächtig ist und in einer dichten, feinkörnigen Grundmasse eine große Menge an Einsprenglingen und Fremdgesteinseinschlüssen enthält (SAWATZKI 2000).

Der Wiese-Wehra-Komplex wird von mehreren Autoren unterschiedlich bewertet. SCHÄDEL (2002) bezeichnet die Serie als „Wild-Flysch“, der aus chaotisch gelagerten Grauwacken mit Gneis- und Granittrümmern besteht. SAWATZKI (2000) beschreibt dagegen dunkelgraue, biotitreiche Paragneise, denen wie den oben beschriebenen Graniten Gänge aus Granitporphyr eingeschaltet sind.

Es liegen keinerlei Daten über die Verbreitung der beschriebenen Gesteinseinheiten in der Tiefe vor. Ebenso wenig existieren Messwerte zu hydraulischen oder thermischen Eigenschaften dieser Gesteine.

Westlich anschließend an das Grundgebirge des Schwarzwaldes lagern bei Badenweiler mesozoische Gesteine, die durch mehrphasige, hydrothermale Vorgänge silifiziert wurden. Die ursprünglichen Gesteine dieses sogenannten „Quarziriffs“ sind hauptsächlich Kalke, Mergel und Sandsteine aus dem Muschelkalk und Buntsandstein. Nach der Silifizierung kam es durch die tektonischen Bewegungen am Oberrheingrabenrand zur Ausbildung von Klüften, welche für die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit des „Quarziriffs“ verantwortlich sind. Diese Durchlässigkeit ermöglicht den Austritt der Thermalquellen von Badenweiler an der westlichen Randstörung des „Quarziriffs“.

Die Vorbergzone westlich dieser Störung besteht wiederum aus einem Schollenmosaik mesozoischer Gesteine, welche hier keine Silifizierung erfahren haben. Die Störungen sind einerseits Staffelbrüche des Oberrheingrabens, die annähernd N-S verlaufen, und andererseits Querstörungen dazu, die E-W, parallel zur Badenweiler-Lenzkirch-Zone streichen. Die Gesteine der Vorbergzone umfassen Buntsandstein bis Jura und bestehen aus Kalken, Dolomiten und Sandsteinen mit guten Durchlässigkeiten, sowie Mergeln und Tonsteinen mit hydraulisch geringleitender Wirkung. Die tonig-mergeligen Serien des Keuper und Jura umfassen nach BASTING (1977) ca. 350 m und die Buntsandstein- und Muschelkalk-Schichten erreichen 180 m Mächtigkeit. Unter den mesozoischen Gesteinen lagern Rotliegend-Arkosen und Quarzporphyre. Eine besondere Rolle für den Thermalwasseraufstieg in Badenweiler spielen das Quarziriff und die in Oberflächennähe westlich anschließenden Keuper- und Juratone mit ihrer abdichtenden Wirkung. Diese tragen zu einer Stauung

des anströmenden Grundwassers bei, so dass sie zum Aufstieg und Austritt innerhalb des „Quarziriffs“ gezwungen werden. Dabei sind die Austrittspunkte offensichtlich an Querstörungen im „Quarziriff“ gebunden, wo besonders hohe Durchlässigkeiten herrschen (BASTING 1977).

Unterhalb der Jura- und Keuperserien existieren beschränkt hydraulische Verbindungen zwischen Schwarzwald-Kristallin und Vorbergzone, was aus den in Pumpversuchen ermittelten Zusammenhängen zwischen Bohrungen und Quellen abzuleiten ist. Ein unbekannter Anteil des aus dem Kristallin stammenden Grundwasserstromes fließt demnach unterhalb des Quarziriffes nach Westen. Eine direkte Verbindung zu den Bohrungen von Müllheim (3 km westlich) gibt es jedoch nicht (WERNER 1990). Eventuell liegt ein weniger dichter Bereich der Quarziriff-Randstörung südlich der Quellen im Bereich der Thermalbohrungen. Würde dieser durchlässige Bereich weiter nördlich liegen, müsste die Verbindung zwischen Bohrungen und Quellen deutlicher hervortreten. Auch nach Norden scheint kein Grundwasserstrom möglich zu sein, wofür vermutlich die E-W verlaufende Klemmbachverwerfung verantwortlich ist (WERNER 1990).

Nach den dargestellten hydraulischen und hydrochemischen Daten ist davon auszugehen, dass die Bohrungswässer ebenso wie die Quellwässer aus dem Schwarzwaldkristallin stammen. Die Westhänge des Blauen-Massivs südöstlich von Badenweiler bieten Infiltrationsmöglichkeiten über die Klüfte des Grundgebirges. Mit ihrer Höhenlage kann das hydraulische Potential begründet werden, welches als ein wesentlicher Faktor die Grundwasserzirkulation steuert.

Inwieweit sich die Einzugsgebiete der Quellen und Bohrungen überschneiden ist nach derzeitigem Kenntnisstand schwer zu entscheiden. Der Abstand zwischen Bohrungen und Quellen sowie die durch Pumpversuche nachgewiesene schwache hydraulische Verbindung zwischen beiden lassen vermuten, dass das Einzugsgebiet der Quellen nördlich von dem der Bohrungen liegt, sich mit diesem aber bei entsprechend hoher Brunnenförderung (ab ca. 6 l/s) überschneidet. Unter der Annahme, dass der Thermalwasseraufstieg zu den Quellen keine bedeutenden Temperaturverluste mit sich bringt, kann aus den ähnlichen Temperaturen in Bohrungen und Quellen darauf geschlossen werden, dass die maximale Zirkulationstiefe in beiden Einzugsgebieten ähnlich ist.

### 4.3.2 Konzeptmodell

Niederschlag, der auf den Westhängen des Blauen-Massivs fällt, infiltriert durch Klüfte in den Untergrund und bewegt sich dort mindestens bis in eine Tiefe von 500 m unter Gelände. Die laterale Bewegung folgt dem topographischen Gradienten und ist vorrangig nach Nordwesten gerichtet. Das Wasser steigt entlang von Klüften und Störungen im Granit, Permokarbon und schließlich im Quarzriff auf, wenn es auf stauende Bereiche trifft oder durch Querstörungen besonders durchlässige Zonen erreicht.

Die an den Quellen austretenden Grundwässer sammeln sich zunächst im gut durchlässigen Quarzriff, fließen lateral den Zonen erhöhter Durchlässigkeit zu und treten schließlich an der Oberfläche aus, wobei zusätzlich gering durchlässige Gesteine eine weitere Bewegung nach Westen verhindern. Der Durchlässigkeitsunterschied zwischen Quarzriff und Aufstiegsbereich ist dabei so zu wählen, dass auch innerhalb des Quarzriffs ein Thermalwasseraufstieg erfolgt und die engere Aufstiegszone erst in Oberflächennähe die Fluidkonzentration ermöglicht. Vereinfachend wird nur die stärkste und wärmste der drei Thermalquellen – die Römerquelle – in das Modell implementiert. Um die Wasserbilanz trotzdem korrekt nachzubilden, wird ihre Schüttung um 2 l/s (die Schüttungsmenge der Badermattquelle) auf 14 l/s erhöht.

Die Bohrungen II und III werden zusammengefasst und durch eine 505 m tiefe Bohrung repräsentiert, aus welcher seit 1967 durchschnittlich 6 l/s 22°C warmes Grundwasser gefördert werden. Diese Bohrung durchteuft die Vorbergzone westlich des Quarzriffs und endet im Rotliegend-„Quarzporphyr“. Ihr Einzugsgebiet liegt im westlichen Blauenmassiv und überschneidet sich – bei dieser Förderrate – nicht wesentlich mit dem der Badenweilerer Quellen. Das Grundwasser strömt von den Hängen aus westwärts und fließt dabei zum einen im Grundgebirge unterhalb des Quarzriffs und zum anderen durch das Quarzriff hindurch in die Thermalwasserhorizonte I und II hinein. Die Bohrung erschließt nur einen Teil der anströmenden Grundwässer. Der übrige Teil dieses Wassers fließt, vor allem innerhalb der beiden Thermalwasserhorizonte, weiter westwärts.

Es werden folgende hydrogeologische Einheiten unterschieden: Keuper/Jura, Buntsandstein /Muschelkalk, Quarzriff, Aufstiegszone, Grundgebirge und Stauzonen. Der Schicht Keuper/Jura in der Vorbergzone wird eine maximale Mächtigkeit von 340 m zugewiesen, der Schicht Buntsandstein/Muschelkalk und entsprechend auch dem Quarzriff 180 m.

Die Jahresmitteltemperatur beträgt im Gebiet etwa 9°C. Setzt man einen konstanten geothermischen Gradienten von 3°/100 m voraus, so ergeben sich in einer Tiefe von 1000 m u. NN Temperaturen zwischen 54°C im Norden und 86°C im Süden des Gebietes. Diese sollen als Richtwerte zur Kalibrierung des Modells genutzt werden. Sie stellen Ausgangswerte dar, die zum einen durch die Grundwasserkonvektion verändert werden und zum anderen im Südteil des Gebietes durch den Einfluss der Topographie verringert werden können.

Um die Integration aller vorliegenden Daten in die numerische Modellierung zu ermöglichen, werden mehrere Szenarien (dreidimensional und voll gekoppelt) simuliert: Ein stationäres Strömungs- und Wärmetransportmodell analog zu den Ergebnismodellen Baden-Baden und Ohlsbach beschreibt die natürliche Tiefenwasserzirkulation ohne Berücksichtigung der Bohrungen, wie sie bis zum Jahre 1967 herrschte. Ein instationäres Modell simuliert die Thermalwasserzirkulation seit 1967 mit einer durchschnittlichen Förderrate von insgesamt 6 l/s aus beiden Bohrungen. Und schließlich werden die beiden Pumpversuche von 1967 und 1972 in instationären Modellen mit einer Laufzeit von nur 25 Tagen nachgebildet. Die instationären Modelle unterstützen die Aussagekraft des Ergebnismodells, indem unter verschiedenen Szenarien Kalibrierungen vorgenommen werden können.

### 4.3.3 Vorstudien

Im Zuge der Modellentwicklung wurden zunächst dreidimensionale Strömungsmodelle erstellt, mit deren Hilfe die Modellgeometrie und die Konfiguration der hydrogeologischen Einheiten optimiert wurde. Größe und Tiefe des Einzugsgebietes wurden dabei nur wenig verändert, da die Annahmen aus dem Konzeptmodell bereits gute Simulationsergebnisse erbrachten. Die Verteilung der hydrogeologischen Einheiten in der Vorbergzone wurde dagegen leicht angepasst. Zunächst wurden eine Stauzone und Quarzriff-Gesteine eingeführt (Abb. 34a), die später wieder entfernt werden konnten (Abb. 34b). Um den Grundwasserabstrom aus der Vorbergzone heraus kontrollieren zu können, wurde statt dessen eine Stauzone am Modellrand eingeführt (Abb. 34c), welche die weitere Reliefverflachung und tektonische Versätze weiter westlich in ihrer grundwasserstauenden Wirkung ersetzt.

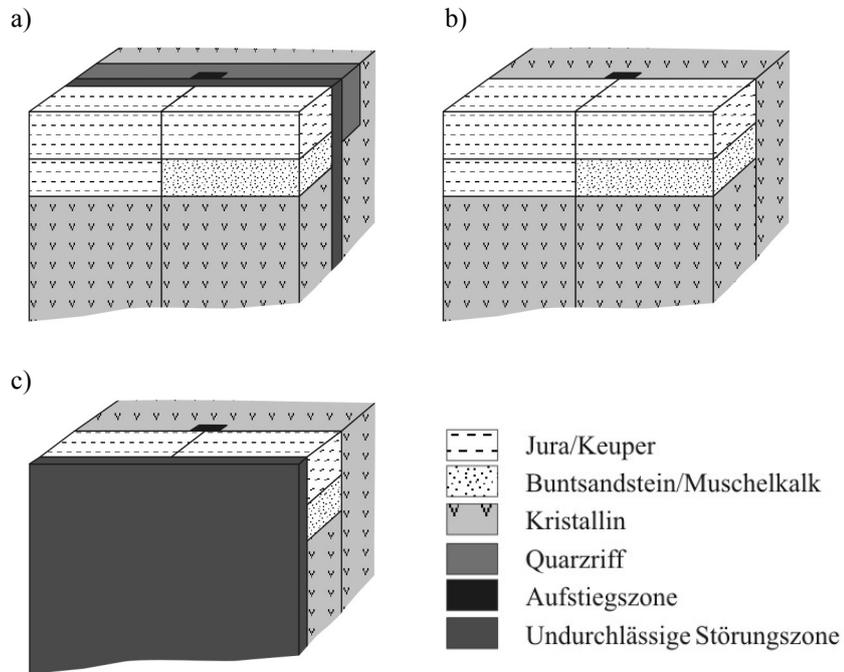


Abb. 34a-c: Schematische Darstellung der möglichen Verteilung hydrogeologischer Einheiten in der Vorbergzone.

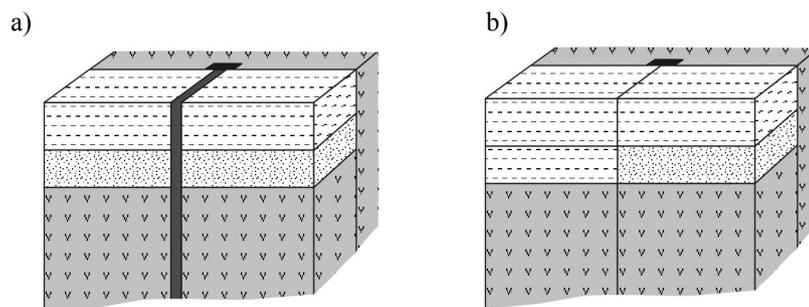


Abb. 35a-b: Schematische Darstellung beider Möglichkeiten zur Umsetzung einer undurchlässigen Störung in der Vorbergzone. Legende siehe Abb. 34

Weiterhin wurde die E-W-verlaufende Störung in der Vorbergzone im Vergleich zur geologischen Karte geringfügig nach Süden verlegt. Die Störung versetzt Buntsandstein und Muschelkalk im Süden gegen geringer durchlässige Jura- und Keuper-Sedimente im Norden. Eine Verschiebung der Störung war sinnvoll, da ihre genaue Position ohnehin nicht bekannt ist und durch die Begrenzung der durchlässigen Bereiche in Buntsandstein und Muschelkalk nach Norden eine wesentlich stabilere Simulation erreicht werden konnte. Aus dem gleichen Grund wurden die durchlässigeren Einheiten Buntsandstein und Muschelkalk auf der nördlichen Vorbergscholle wie geringer durchlässiger Keuper und Jura behandelt (Abb. 35b), da ein Grundwasserstrom nach Norden ausgeschlossen wird (WERNER 1990). Diese Konfiguration ist analog zu einer undurchlässigen Störung in der Vorbergzone, wie sie durch das Konzeptmodell vorgegeben ist, führt jedoch im Gegensatz zu einem schmalen undurchlässigen Band mit dahinterliegendem durchlässigen Bereich (Abb. 35a) zu einer stabileren Berechnung.

Umfangreichere Vorstudien mit 2D-Modellen, Parameterstudien etc. entfielen in diesem Fall, weil die vorhergehende Bearbeitung der Modelle Baden-Baden und Ohlsbach bereits entsprechende Vorinformationen lieferte.

#### **4.3.4 Ergebnismodell „3D Badenweiler stationär“**

##### **4.3.4.1 Geometrie**

Das dreidimensionale Ergebnismodell hat eine maximale horizontale Ausdehnung von ca. 4 mal 6 km und deckt eine Fläche von ca. 16 km<sup>2</sup> ab. Die Modellbegrenzung orientiert sich vornehmlich an topographischen Wasserscheiden im Süden und Osten, reicht jedoch um ca. 500 m über diese hinaus. Im Norden besteht die Begrenzung im Talboden des Klemmbachs, und im Westen endet das Modell in ausreichender Entfernung zu Quellen und Bohrungen in der Vorbergzone. Für die Netzgenerierung mit dem automatischen Generator „Triangle“ wurden die Position der Quellen und Bohrungen, die Lage der Randverwerfung des Oberrheingrabens und der E-W-Störung in der Vorbergzone sowie die Begrenzung einer Aufstiegszone und des Quarzriffes vorgegeben. Eine manuelle Verfeinerung erfolgte um den Knoten der Bohrung herum. Das Modell reicht bis in eine Tiefe von 1500 m u. NN und ist in 12 Ebenen untergliedert, welche in Tabelle 21 aufgeführt sind. Die Diskretisierung erzeugt damit 49.005 finite Elemente.

Tabelle 21: Vertikale Diskretisierung des Modells „3D Badenweiler“

Ebene 1	Topograph. Höhen aus dem digit. Höhenmodell (339-1144 m)
Ebene 2	gemittelt zwischen Ebenen 1 und 4 (319-872 m)
Ebene 3	gemittelt zwischen Ebenen 1 und 4 (270-597 m)
Ebene 4	98 m
Ebene 5	83 m
Ebene 6	-70 m
Ebenen 7 - 12	-250 m bis -1500 m in Abständen zu je 250 m

Zwei Referenzpunkte werden eingeführt: Referenzpunkt 1 am Quellknoten in Ebene 1 (Position <sup>34</sup>00688, <sup>52</sup>96725) sowie Referenzpunkt 2 an der Basis der Bohrung III auf Ebene 6 (503 m u. NN, Position <sup>34</sup>00354, <sup>52</sup>96525).

In Abb. 36 sind das Gitternetz und die hydrogeologischen Einheiten dargestellt. Das Ergebnismodell unterscheidet fünf geologische Einheiten, denen zum Teil noch tiefengestufte Parameter zugewiesen sind (siehe Tabelle 23 und Tabelle 24).

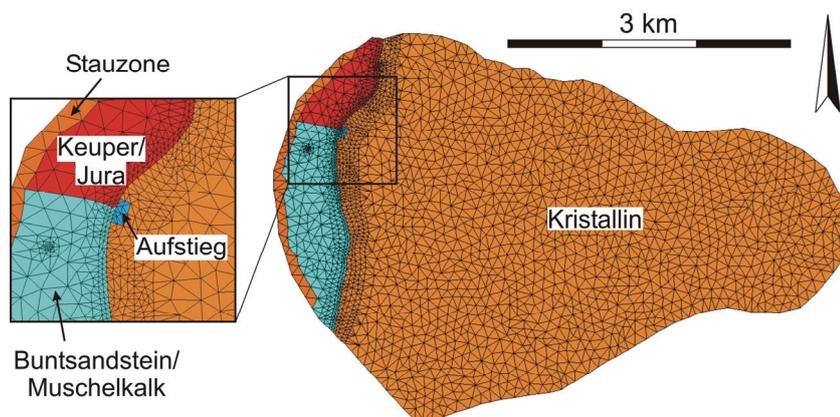


Abb. 36: Hydrogeologische Einheiten und Diskretisierung des Ergebnismodells „3D Badenweiler stationär“

## 4.3.4.2 Parameter

Analog zu den beiden vorher beschriebenen Modellen werden die Randbedingungen und Materialparameter des Modells „3D-Badenweiler“ tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 22: Randbedingungen des Modells „3D Badenweiler stationär“

<b>Strömung</b>		
Ebene 1, östlicher Teil	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe = Topographische Höhe - 10 m
	Nebenbedingung 2. Art	kein GW-Strom nach außen
Ebene 1, Querknoten	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe 440 m
Ebenen 2-6, westl. Modellrand	Randbedingung 1. Art	Druckspiegelhöhe = Topographische Höhe
<b>Wärmetransport</b>		
Ebene 1	Randbedingung 1. Art	Temperatur 10°C
Ebene 12	Randbedingung 2. Art	Wärmefluss 80 mW/m <sup>2</sup>

Tabelle 23:  $k_f$ -Werte im Modell „3D Badenweiler stationär“

$k_f$ in m/s	Kristallin	Buntsandstein/Muschelkalk	Keuper/Jura	Aufstieg	Stauzone
Schicht 1	$1.3 \cdot 10^{-8}$		$1 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-4}$	
Schicht 2	$1.3 \cdot 10^{-8}$		$1 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-4}$	
Schicht 3-6	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-5}$ *		$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-9}$
Schichten 7-8	$1.3 \cdot 10^{-8}$			$5 \cdot 10^{-5}$	
Schicht 9-10	$1.3 \cdot 10^{-8}$			$5 \cdot 10^{-6}$	
Schicht 11	$5 \cdot 10^{-9}$			$5 \cdot 10^{-6}$	

\*: Buntsandstein/Muschelkalk nur in Schichten 3 und 4

Tabelle 24: Wärmetransportparameter im Modell „3D Badenweiler stationär“

	<b>Kristallin</b>	<b>Buntsand- stein/ Muschel- kalk</b>	<b>Keuper/ Jura</b>	<b>Aufstieg</b>	<b>Stau- zone</b>
Porosität	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01
Wärmekapazität Gestein [MJ/m <sup>3</sup> K]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Wärmeleitfähigkeit Gestein [J/msK]	2,8	2,0	2,5	2,8	2,8
Rad. Wärmeproduktion [μW/m <sup>3</sup> ]	3	1	1	1	1

## 4.3.4.3 Ergebnisse

Für das stationäre Modell konnte eine gute Anpassung der Parameter Quelltemperatur, Quellschüttung und Referenztemperatur 1 (Basis der Bohrung) an die vorliegenden Daten erreicht werden. Die Vorgaben aus dem Konzeptmodell werden erfüllt, wie auch aus Tabelle 25 hervorgeht. Die Grundwasserneubildung der Tiefenwässer liegt bei 1445 m<sup>3</sup>/d, und nach Abzug der Quellschüttung verbleiben 223 m<sup>3</sup>/d als Grundwasserabstrom, welcher aus Tiefenwässern gespeist wird. Im Vergleich zur Grundwasserneubildung des Gebietes nach ARMBRUSTER (2002) von 222 mm/a, entsprechend 9883 m<sup>3</sup>/d, macht die Tiefenzirkulation des Modells ca. 15 % der gesamten Grundwasserneubildung aus.

Tabelle 25: Ergebnisse aus dem Modell „3D Badenweiler stationär“

<b>Parameter</b>	<b>Modell</b>	<b>Bemerkung</b>
Grundwasserneubildung	1445 m <sup>3</sup> /d	
Quellschüttung	1222 m <sup>3</sup> /d	Konzeptmodell: 1220 m <sup>3</sup> /d
Temperatur Quelle	26,0°C	Konzeptmodell: 26°C
Temperatur Referenzpunkt 1	27,8°C	Konzeptmodell: 28°C
Temperatur an der Modellbasis	41-60°C	→ geothermischer Gradient 1,6 – 3,2 °K/100 m
Oberflächen-Wärmefluss	130 mW/m <sup>2</sup>	
Maximale DARCY-Geschwindigkeit	0,43 m/d	
Mittlere Verweilzeit	990-1200a	

Die beiden folgenden Abbildungen verdeutlichen die Temperaturverteilung im dreidimensionalen Modellkörper sowie die Bewegungsbahnen der im Neubildungsgebiet infiltrierenden und an der Quelle bzw. als Grundwasserabstrom austretenden Grundwässer.

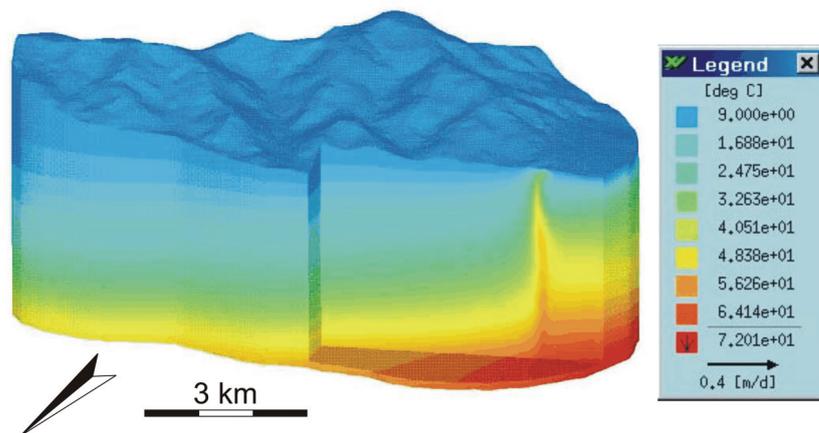


Abb. 37: Temperaturverteilung des Ergebnismodells „3D Badenweiler stationär“

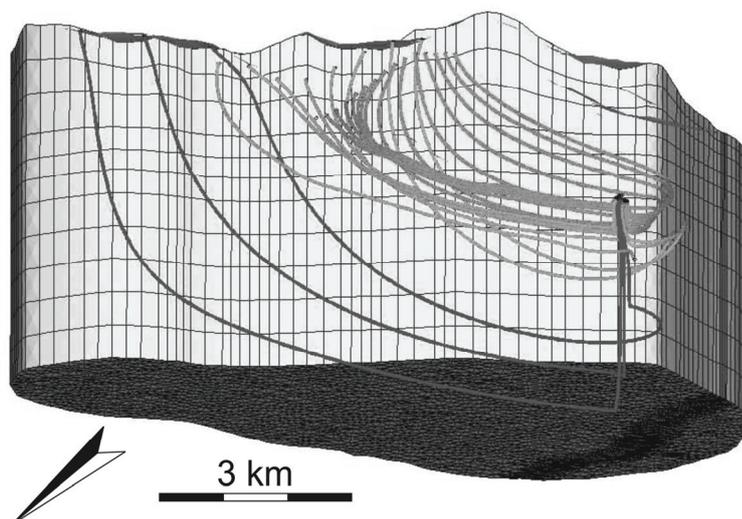


Abb. 38: Strömungsfeld im Ergebnismodell „3D Badenweiler stationär“

#### 4.3.5 Instationäre Simulation der Pumpversuche

Ausgangssituation für die Durchführung der Pumpversuche war das natürliche Grundwasserzirkulationssystem ohne Bohrungen. Daher gilt auch für die Modellierung der Pumpversuche als Anfangsbedingung das Ergebnis der stationären Simulation „3D Badenweiler stationär“. Die Pumpversuche wurden in einem voll gekoppelten dreidimensionalen Modell über eine Laufzeit von 25 Tagen berechnet, wobei sowohl Strömung als auch Wärmetransport instationär behandelt wurden.

Die Materialparameter sind gegenüber „3D Badenweiler stationär“ nicht verändert. Auch die Randbedingungen im Grundwasserneubildungsbereich und am Quellaustritt werden beibehalten. Für die Simulation der Pumpversuche wird zusätzlich eine Randbedingung 4. Art als Brunnen eingeführt. Die einzelnen Knoten der Brunnen in den Ebenen 3 bis 5 (Badenweiler II, Pumpversuch 1967) bzw. 3 bis 6 (Badenweiler III, Pumpversuch 1972) werden als hydraulisch verbunden betrachtet. Die Verteilung der Gesamtförderung über alle Knoten geschieht damit im Verhältnis der  $k_f$ -Werte im Anstrombereich (siehe auch Kap. 2.4 Modellentwicklung). Die zugewiesenen Förderraten für die beiden Pumpversuche aus 1967 und 1972 sind in Abb. 39a-b aufgetragen.

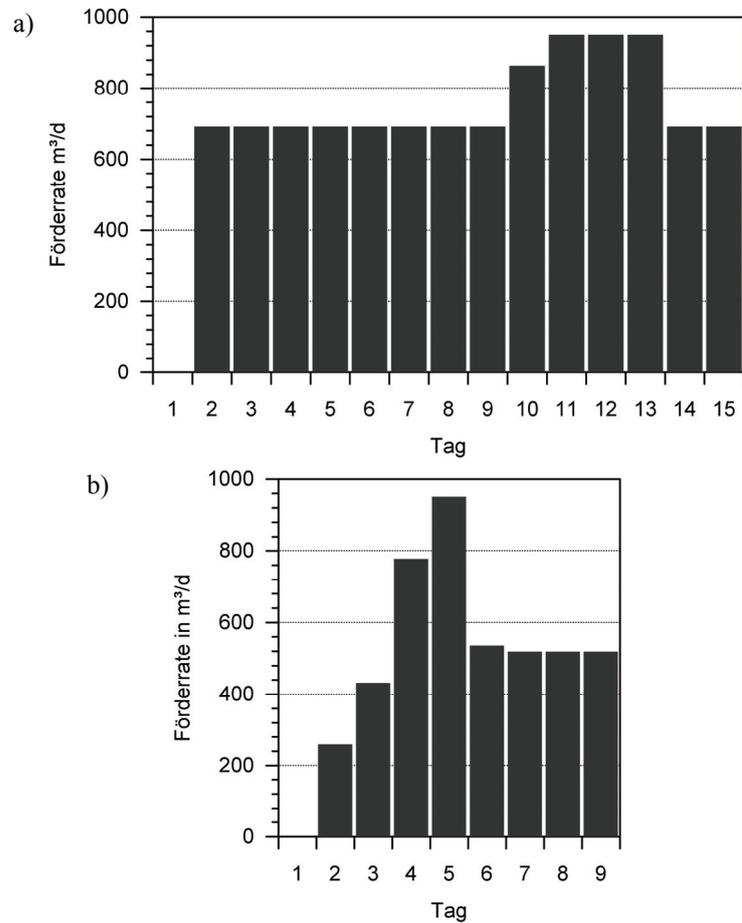


Abb. 39a-b: Brunnenförderraten aus a) Badenweiler II während Pumpversuch 1967 und b) Badenweiler III während Pumpversuch 1972

Im Zuge der Kalibrierung wurden die  $k_f$ -Werte aller Gesteinseinheiten dahingehend verändert, dass einerseits die Ergebnisse der stationären Simulation mit dem Konzeptmodell übereinstimmen und andererseits die Pumpversuche möglichst genau nachgebildet werden. Während der Pumpversuche in den Bohrungen wurden die Absenkung im Brunnen und die Reaktion der Quellschüttung gemessen. Das präsentierte Modell ist nicht detailliert genug, um

die tatsächliche Brunnenabsenkung abzubilden; das Quellverhalten wird jedoch gut repräsentiert. Als Kontrollgrößen dienen daher:

- $\Delta t$ : die Zeitdifferenz zwischen Beginn des Pumpversuchs und Erreichen des Schüttungsminimums der Quelle,
- $\Delta Q_{\min}$ : die Differenz zwischen Quellschüttung vor dem Pumpversuch und minimaler Quellschüttung während des Pumpversuches und
- $\Delta Q_{\text{Ende}}$ : die Differenz zwischen Quellschüttung vor dem Pumpversuch und Quellschüttung nach 25 Tagen (Ende der Pumpversuchs-Simulation).

Der Verlauf der Quellschüttung während des Pumpversuches 1967 ist in Abb. 40 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Quelle im Modell im Vergleich zu den Messwerten ihr Schüttungsminimum zum richtigen Zeitpunkt erreicht. Das Schüttungsminimum liegt jedoch etwas zu hoch, während die Quellschüttung zum Ende der Simulation zu gering ist.

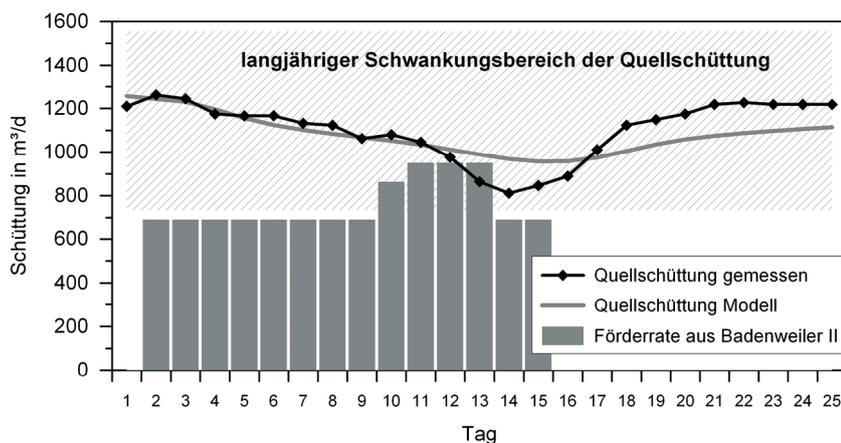


Abb. 40: Quellschüttung während des Pumpversuchs 1967 nach Messungen und Modellberechnungen

Ähnliche Ergebnisse resultieren aus dem Modell des Pumpversuches 1972 in Abb. 41. Auch hier ist die zeitliche Anpassung des Quellschüttungsrückganges gut, während die Amplitude der Schüttungskurve aus dem Modell zu flach ist. In diesem Fall liegt die Quellschüttung des Modells generell zu hoch, weil zum Zeitpunkt des Pumpversuches 1972 eine geringere Quellschüttung

herrschte. Über langfristige Schüttungsschwankungen und Niederschlagskopplung siehe auch Kap. 4.3.1 Datengrundlage. Zum besseren Vergleich und weil die allgemein geringe Schüttung unabhängig vom Pumpversuch ist, wird deshalb ein Betrag von 2 l/s von der modellierten Quellschüttung abgezogen und mit dargestellt.

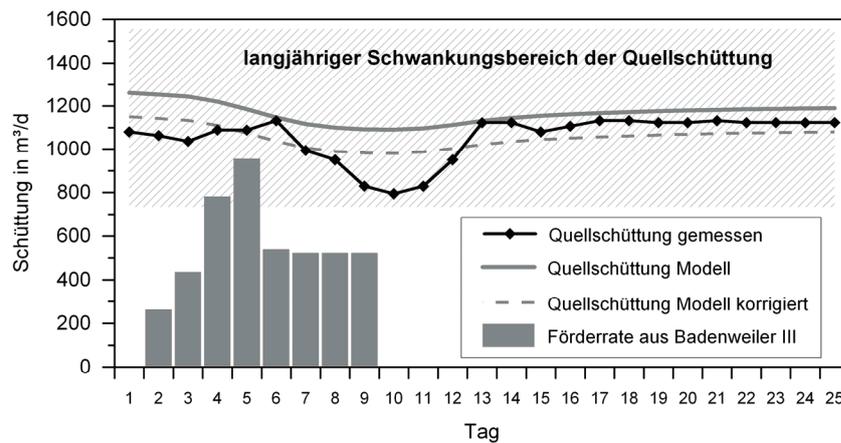


Abb. 41: Quellschüttung während des Pumpversuchs 1972 nach Messungen und Modellberechnungen

Eine detailgetreue Simulation der Pumpversuche wird dadurch erschwert, dass die gesamte Modellkonfiguration mit Größe, Diskretisierung und Simplifikationsgrad dahingehend ausgerichtet ist, den Thermalwasserkreislauf vom Infiltrationsgebiet zum Quellaustritt zu simulieren. Die Pumpversuche haben nur in einem kleinen Teil des Modellkörpers Auswirkungen und müssten daher eigentlich mit einem kleinen Detailmodell bearbeitet werden. Gerade aus diesem Grund zeigt jedoch die verhältnismäßig gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Modellergebnissen aus dem großen 3D-Modell, dass die Simulationen insgesamt realitätsnah sind und die notwendigen Vereinfachungen die Ergebnisse nur geringfügig beeinträchtigen.

#### 4.3.6 Instationäre Simulation der Dauerförderung aus Badenweiler II und III

Die Förderung aus den beiden Produktionsbohrungen Badenweiler II und III wurde für einen Zeitraum von 34 Jahren instationär simuliert. Damit ist der Produktionszeitraum seit Bestehen der Bohrungen ab ca. 1970 bis 2004 abgedeckt. Grundlage für das instationäre Modell bildete wiederum das Ergebnismodell „3D Badenweiler stationär“, dessen Parameterkonfiguration auf das Modell „Dauerförderung“ übertragen wurde und dessen resultierende Temperaturverteilung als Anfangsbedingung gilt. Die zusätzlichen Modellparameter sind in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Modellparameter von „3D Badenweiler Dauerförderung“

Zeitschrittlänge	automatisch
Simulationsdauer	12410 Tage
Förderrate Badenweiler II und III	518 m <sup>3</sup> /d

Die Ergebnisse der Simulation nach obenstehender Konfiguration weichen stark von den Vorgaben des Konzeptmodells ab. Die Quellschüttung sinkt durch die Dauerförderung von 6 l/s (518 m<sup>3</sup>/d) um 43 % auf 697 m<sup>3</sup>/d während die Quelltemperatur nach 34-jähriger Förderung von 26°C auf 32°C steigt. Stationäre Verhältnisse werden nach 12 Jahren erreicht. Eine Verringerung der Auswirkung der Dauerförderung auf die Quellen ist durch eine Anpassung der Modellparameter nicht möglich ohne gleichzeitig die Modellergebnisse des stationären und des Pumpversuchs-Modells zu beeinträchtigen. Der gesamte Modellaufbau ist auf die Simulation der tiefen Grundwasserzirkulation ausgelegt. Wie bereits unter 4.3.4.3 erläutert, nehmen die flachen Grundwasseranteile jedoch großen Einfluss auf das Verhalten der Bohrungen. Aus diesem Grund wurde auf die gezielte Kalibration des Dauerförderungs-Modells verzichtet. Nach der Darstellung der Modellergebnisse folgt anstelle dessen eine eingehende Diskussion der auftretenden Diskrepanzen zum Konzeptmodell.

Tabelle 27: Ergebnisse von „3D Badenweiler Dauerförderung“ im Vergleich zum Konzeptmodell

Parameter	Modell	Konzeptmodell
Quelltemperatur	31,6°C	26°C
Temperatur Ref. 2 (Bohrung)	27,9°C	28°C
Quellschüttung	697 m <sup>3</sup> /d	1220 m <sup>3</sup> /d
Grundwasserneubildung	1464 m <sup>3</sup> /d	-
Grundwasserabstrom	243 m <sup>3</sup> /d	-

Die simulierte Dauerförderung hat einen starken Einfluss auf das Quellverhalten, der aus den tatsächlichen Messwerten nicht hervorgeht. Dies liegt in der Geometrie und Parametrisierung des Modells begründet. Um ausschließlich die Tiefenwasserzirkulation im Modell zu berücksichtigen, wurde die Grundwasserneubildung auf die Hügel im östlichen Gebietsteil beschränkt und gegenüber der tatsächlichen Neubildungsrate erheblich geringer angesetzt. Die Höhe der Grundwasserneubildung ergibt sich im Modell aus dem hydraulischen Gradienten und der hydraulischen Durchlässigkeit vor allem der Modellrand-Stauschicht (siehe 4.3.4.3). Während der Simulation der Dauerförderung treten daher keine wesentlichen Änderungen der Grundwasserneubildung auf, weil die steuernden Parameter konstant bleiben. Die Höhe der Grundwasserabstrommenge ist wiederum abhängig von der Durchlässigkeit der Stauzone. In Form der Brunnenförderung wird eine neue Randbedingung eingeführt, welche negativ in die Gesamtbilanz eingeht. Diese zusätzliche Wasserentnahme führt zu einer Verringerung des hydraulischen Potentials in der Vorbergzone und verursacht damit einen Rückgang der Quellschüttung bei etwa konstantem Grundwasserabstrom. Die verringerte Quellschüttung hat wiederum einen Temperaturanstieg zur Folge, da das durch die Bohrung abgezogene Grundwasser hauptsächlich aus geringer Tiefe stammt und damit kühle Anteile für die Quelle verloren gehen. Laut BASTING (1977) sind die während der Pumpversuche ansteigenden  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalte in den geförderten Grundwässern ein deutlicher Hinweis darauf, dass Grundwässer aus den mesozoischen Schichten der Vorbergzone beigezogen werden. Diese Vorgänge werden im vorliegenden Modell durch die Konfiguration der Randbedingungen nicht berücksichtigt.

Für eine bessere Anpassung der Modellergebnisse an die Messwerte wäre die Einbeziehung der flachen Grundwasseranteile ebenso notwendig wie eine genauere Darstellung der hydrogeologischen Eigenschaften der Vorbergzone, die im großmaßstäblichen Modell nur stark vereinfacht repräsentiert werden.

Dazu würde es jedoch genaueren Kenntnissen zur Stratigraphie und  $k_f$ -Verteilung der Vorbergschollen bedürfen, als sie derzeit vorliegen.

#### 4.3.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalysen wurden prinzipiell am stationären Modell „3D Badenweiler stationär“ vorgenommen. Für die  $k_f$ -Werte wurde zusätzlich dazu das Modell „3D Badenweiler PV67“ getestet, um exemplarisch die Auswirkungen der Durchlässigkeitsänderungen auf die Simulation der Pumpversuche zu ermitteln.

##### *Wärmetransportparameter*

Es wurden die drei Parameter basale Wärmeflussdichte, Wärmeleitfähigkeit und radiogene Wärmeproduktion des Gesteins betrachtet. Jeder dieser Parameter hat einen deutlichen Einfluss auf die Modellergebnisse, wobei sich jedoch Art und Höhe der Variationen unterscheiden. Die Erhöhung des Wärmeflusses führt zur starken Erwärmung der Modellbasis und zur etwas schwächeren Erhöhung der Quell- und Bohrungstemperatur. Die Abhängigkeiten zwischen Wärmefluss und Temperaturen sind etwa linear. So verursacht eine Erhöhung des Wärmeflusses um 33,3 % folgende Temperaturerhöhungen: Modellbasis 20,5 - 23,6 %, Quelltemperatur 9,7 % und Bohrungstemperatur 12,5 %.

Die Wärmeleitfähigkeit führt im Bereich zwischen 2,4 und 3 W/msK zu sehr geringen Änderungen der Quell- und Bohrungstemperatur. Eine 25 %-ige Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit hat eine Erhöhung der Quelltemperatur um 1,1 % und eine Verringerung der Bohrungstemperatur um 2,1 % zur Folge. Dabei ist der Verlauf der Bohrungstemperatur streng linear, während die Quelltemperatur mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit zunächst ansteigt und dann wieder leicht fällt. Die Temperaturen an der Modellbasis sprechen mit 7,3 - 10,6 % Verringerung stärker auf die Wärmeleitfähigkeitsänderung von 25 % an, jedoch weniger deutlich, als dies bei der Wärmeflussänderung der Fall ist.

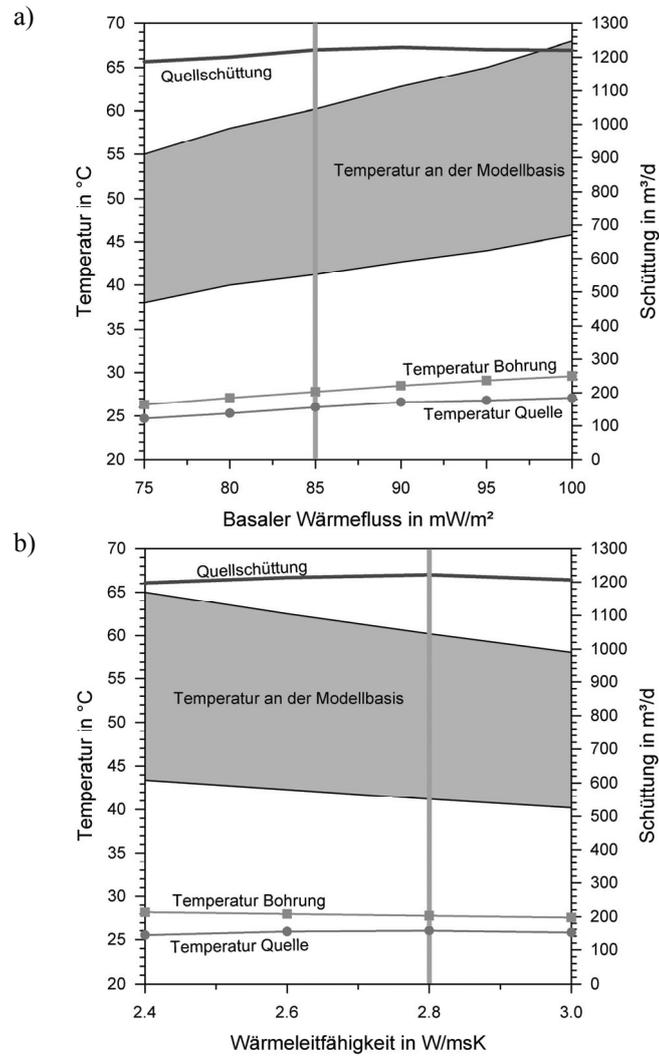


Abb. 42a-b: Sensitivität der Modellergebnisse auf die Wärmetransportparameter: a) basaler Wärmefluss und b) Wärmeleitfähigkeit des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.

Die radiogene Wärmeproduktion hat im Vergleich zu den beiden o.g. Wärmetransportparametern nur wenig Einfluss auf die Modellergebnisse. Die Erhöhung von  $0 \mu\text{W}/\text{m}^3$  auf den maximal an Schwarzwaldgraniten im Labor gemessenen Wert von  $6 \mu\text{W}/\text{m}^3$  (BURCKHARDT et al. 1989) führt zu einem Temperaturanstieg in der Quelle um 5,5 %, in der Bohrung um 5,9 % und an der Modellbasis um 4,5 %. Alle Temperaturkurven verlaufen streng linear.

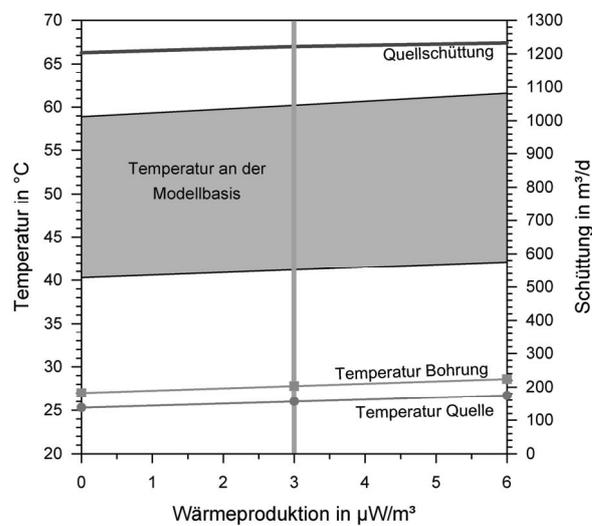


Abb. 43: Sensitivität der Modellergebnisse auf die radiogene Wärmeproduktion des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. Die vertikale Linie stellt das Idealmodell dar.

#### *Hydraulische Durchlässigkeiten*

Kristallingestein ist die vorherrschende Gesteinseinheit im Modellkörper. Aus diesem Grund ist die Sensitivität der Modellergebnisse auf Änderungen der gesamten Modelldurchlässigkeit sehr ähnlich derjenigen der Kristallindurchlässigkeiten. Bei Erhöhung der Gesamtdurchlässigkeit fällt die Temperatur in der Bohrung zunächst langsam und später exponentiell bis zu einem Änderungsfaktor von 10. Die Quelltemperatur steigt zunächst, um dann ebenfalls etwa parallel zur Bohrungstemperatur zu fallen. Dieser Effekt kann damit begründet werden, dass die Förderrate am Bohrloch konstant gehalten wird, während die Quellschüttung linear vom gesamten Grundwasserdurchsatz

abhängt. Bei geringen Durchlässigkeiten zieht die Bohrung thermales Grundwasser von der Quelle ab, deren Temperatur sich damit verringert. Mit steigenden Durchlässigkeiten nimmt der konvektive Wärmetransport eine größere Stellung ein, so dass das kühl infiltrierende Wasser zu einer Verringerung der gesamten Modelltemperatur führt. Die maximale DARCY-Geschwindigkeit fällt mit zunehmender Durchlässigkeit. Die Erhöhung der Kristallin-Durchlässigkeit führt ebenso zu einem etwa linearen Anstieg der Quellschüttung und einer Verringerung der Fließgeschwindigkeiten.

Um die Qualität der simulierten Pumpversuche darzustellen, wurde die minimale Quellschüttung nach Anwendung des 1967er Pumpversuches in Badenweiler II als prozentuale Abweichung der durchschnittlichen Quellschüttung zu 33 % errechnet. Der in den Säulendiagrammen dargestellte Fehler errechnet sich aus der Differenz dieses Wertes und der jeweils im Modell ermittelten prozentualen Abweichung der Minimalschüttung von der Normalschüttung. Damit zeigen geringe Säulenhöhen gute Pumpversuchs-Simulationen an, während in den Fällen der hohen Säulen die Modelle weiter von den Originaldaten abweichen. Für das Ergebnismodell gilt ein Fehler von 11,4 %. Die beschriebene Darstellungsweise lässt sowohl den Zeitpunkt des Quellschüttungsminimums als auch die Anpassung der simulierten Quellschüttungen an die vorliegenden Daten außerhalb des Minimums außer acht. Die angezeigte „Qualität“ bewertet damit nur einen Teilaspekt der Pumpversuchs-Modelle.

Bei Änderung der Gesamtdurchlässigkeit variiert der Pumpversuchsfehler zwischen 5,2 und 12,7 % mit einem Maximum bei Faktor 2. Eine Verringerung der Gesamtdurchlässigkeit führt zur langsameren Ansprache der Quellschüttung auf den Pumpversuch, das heißt das Schüttungsminimum wird später erreicht. Gleichzeitig verschlechtert sich die Anpassung der Modellschüttungskurve an den wirklichen Verlauf der Quellschüttung, indem die modellierte Quellschüttung nach Erreichen des Minimums zu langsam wieder ansteigt.

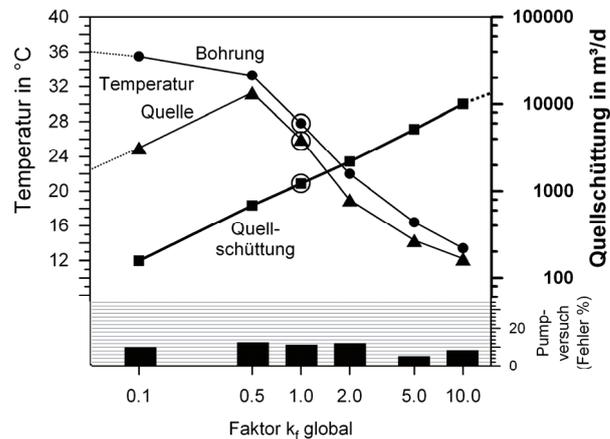


Abb. 44: Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit der gesamten Modellkörpers „3D Badenweiler stationär“. Im unteren Teil der Diagramme ist der Fehler der Pumpversuchsimulationen (Szenario PV67) dargestellt. Die Kreise markieren die Werte des Idealmodells. (Erl. siehe Text).

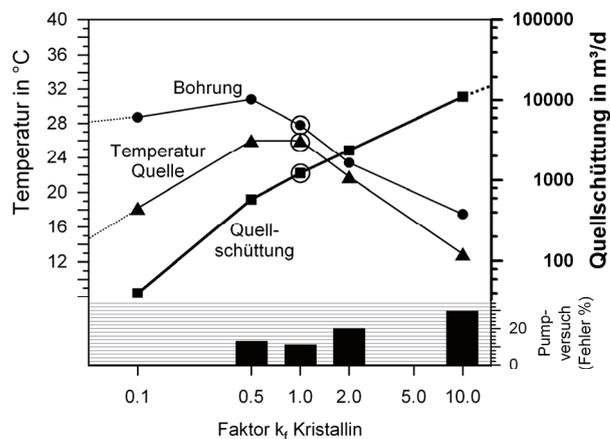


Abb. 45: Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit des Kristallingesteins im Modell „3D Badenweiler stationär“. (Erl. siehe Abb. 43 und Text)

Im Falle der Erhöhung der kristallinen Durchlässigkeiten ist ein deutlicher Trend zur Verschlechterung der Pumpversuchssimulation zu erkennen, indem die Quelle zu schwach auf den Pumpversuch reagiert. Bei Verringerung der Durchlässigkeiten spricht die Quelle andererseits zu stark auf den Pumpversuch an, bis hin zu einer negativen Quellschüttung, also Infiltration, bei einem Faktor von 0,1. Der Zeitpunkt des Schüttungsminimums verändert sich dabei nicht.

Die Stauzone beeinflusst in ihrer Durchlässigkeit vor allem die Quellschüttung. Je höher die Durchlässigkeit der Stauzone ist, um so geringer fällt die Quellschüttung aus. Die Temperaturen der Bohrung und der Quelle bleiben konstant bei geringen Durchlässigkeiten. Bei einer Erhöhung fällt die Temperatur der Bohrung leicht, während die der Quelle ansteigt. Auch die Ergebnisse der simulierten Pumpversuche sind bei niedrigen Durchlässigkeiten der Stauzone etwa konstant und variieren erst bei Erhöhung der  $k_f$ -Werte. Dann tritt bei Faktor 5 eine deutliche Verbesserung mit einem Fehler von 0 % auf, während der Fehler für Faktor 10 bei 23 % liegt. Ein eindeutiger Trend zeichnet sich in der nicht dargestellten Anpassung der gesamten Quellschüttungskurve an die Pumpversuchsdaten ab. Je geringer die Durchlässigkeiten sind, um so besser ist diese Anpassung.

Eine Änderung der Durchlässigkeit der mesozoischen Grundwasserleiter Muschelkalk und Buntsandstein beeinflusst die Modellergebnisse geringfügig. Die Temperatur der Bohrung ist bei 0.5fachen  $k_f$ -Werten des Ergebnismodells maximal und sinkt sowohl bei Verringerung als auch - deutlicher - bei Erhöhung der  $k_f$ -Werte ab diesem Wert. Die Temperatur der Quelle sinkt mit steigender Durchlässigkeit. Die Quellschüttung ist maximal bei 2fachem  $k_f$ -Wert. Sie schwankt nur unerheblich zwischen 1179 und 1229 m<sup>3</sup>/d. Der Einfluss der Durchlässigkeit des Mesozoikums auf die Simulation des Pumpversuches ist deutlich. Mit steigender Durchlässigkeit verringert sich der Fehler bis auf 0,9 % bei Faktor 10.

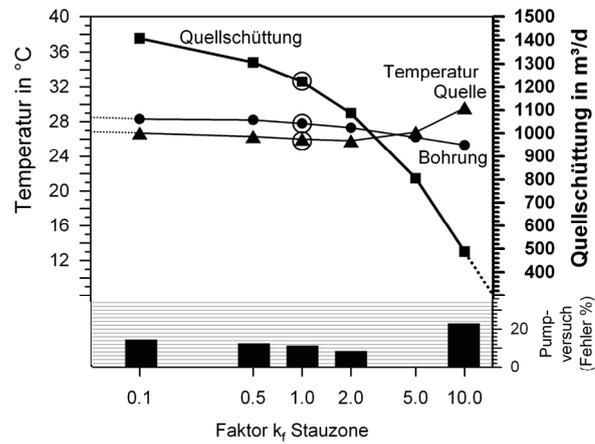


Abb. 46: Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit der Stauzone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)

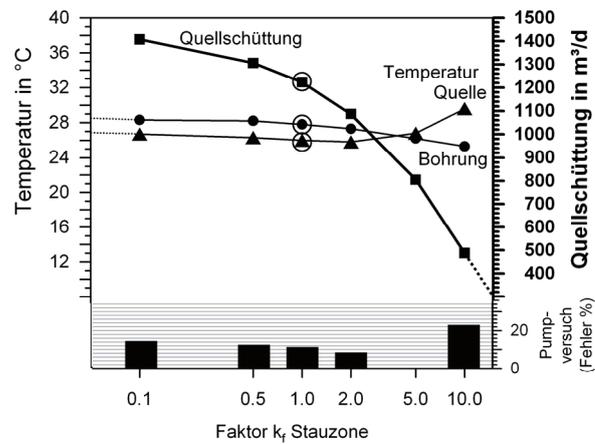


Abb. 47: Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit des Buntsandstein/Muschelkalk im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)

Die Durchlässigkeit des Aufstiegsbereiches ist ein sehr sensibler Parameter, weil in diesem Bereich des Modellkörpers die Auswirkungen der Dichte- und

Viskositätskopplung besonders deutlich hervortreten. Je höher die Durchlässigkeit ist, um so mehr Raum steht für die freie Konvektion zur Verfügung, die vor allem durch temperaturinduzierte Dichteunterschiede angetrieben wird. Diese Konvektionen in einem sehr engen Bereich sind mit der vorliegenden Diskretisierung und den angewendeten Berechnungsverfahren nicht darstellbar, so dass die Modelle mit zu hohen Durchlässigkeiten (ab > Faktor 2 für den gesamten Aufstieg) keine stabilen Lösungen erbringen. Die Temperatur der Bohrung sinkt mit steigender Aufstiegsdurchlässigkeit, weil ihre Förderrate konstant ist. Die Temperatur der Quelle bleibt bei steigender Aufstiegsdurchlässigkeit bis Faktor 0,5 konstant und fällt erst bei höheren Faktoren parallel zur Bohrungstemperatur. Die Quellschüttung ist beim Ergebnismodell maximal. Die Qualität des Pumpversuches steigt mit zunehmender Durchlässigkeit.

Die Verringerung der horizontalen Durchlässigkeit bei konstantem vertikalem  $k_f$ -Wert führt zu leichtem Rückgang der Quellschüttung und deutlichem Temperaturanstieg in der Bohrung. Die Quelltemperatur bleibt unbeeinflusst. Die Qualität des simulierten Pumpversuches sinkt. Eine einseitige Erhöhung der vertikalen Durchlässigkeit bei konstanten horizontalen  $k_f$ -Werten ist in dieser Konfiguration nicht möglich ohne die numerische Stabilität der Berechnungen stark zu beeinträchtigen.

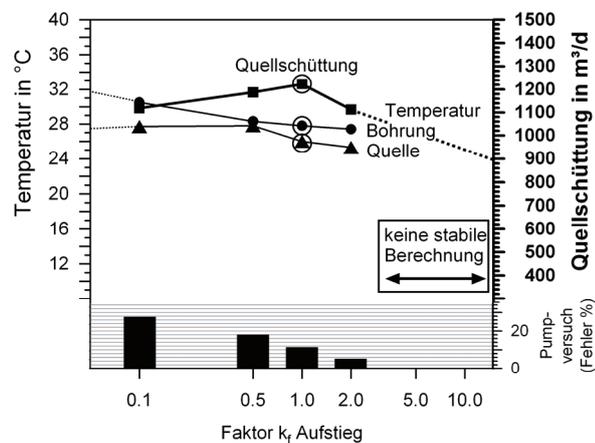


Abb. 48: Sensitivität der Modellergebnisse auf die hydraulische Durchlässigkeit der Aufstiegszone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)

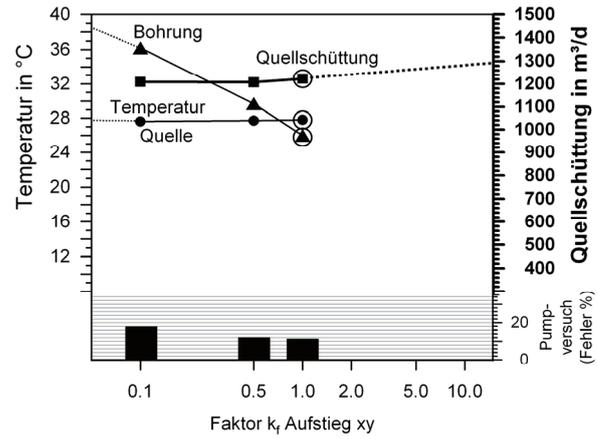


Abb. 49: Sensitivität der Modellergebnisse auf die horizontale hydraulische Durchlässigkeit der Aufstiegszone im Modell „3D Badenweiler stationär“ (Erl. siehe Abb. 43 und Text)

## 5 AUSWERTUNG DER MODELLBERECHNUNGEN

### 5.1 Fehlerdiskussion

Die Komplexität der betrachteten natürlichen Systeme, der Datensätze und der angewandten Methodik erschweren eine Fehleranalyse außerordentlich. Es fehlen sowohl ein Validierungsdatensatz als auch statistisch belegte Fehlerbetrachtungen aus vergleichbaren Modellstudien. Ohne diese ist keine umfassende Quantifizierung der Modellunsicherheiten möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden jedoch neben den eigentlichen Modellergebnissen auch Aussagen zur Eignung der Methodik besprochen. Eine qualitative Zusammenstellung der auftretenden Fehler scheint aus diesem Grunde unerlässlich. Zudem ist die Kenntnis der Vorgehensweise und der damit verbundenen Unsicherheiten wichtig für die Bewertung der Modellergebnisse. Jeder Präsentation numerischer Modellberechnungen sollte daher eine Diskussion der jeweiligen Datenqualität und der Aussagekraft der Modelle folgen.

Die möglichen Modellunsicherheiten werden zunächst, untergliedert in die Fehlerquellen der Datenbasis, der Konzeptmodelle und der Software, dargestellt und quantifiziert, sofern dies möglich ist. Im Anschluss daran folgt eine vergleichende Analyse der Fehlerquellen mit dem Ziel einer Gewichtung. Diese bildet die Grundlage der abschließenden Fehlerdiskussion, welche u.a. die möglichen Ansatzpunkte zur Reduktion der Unsicherheiten aufzeigt.

#### 5.1.1 Datenbasis

*Temperatur Quellen:* Bei in Stollen gefassten Quellen, wie sie in Badenweiler und Baden-Baden auftreten, finden Temperaturmessungen an den Einzelquellen nur einmal jährlich während der Stollenreinigung statt. Eventuelle Schwankungen im Jahreslauf werden damit nicht erfasst. Häufigere Messungen können an den Stollenausgängen bzw. im Sammelbecken durchgeführt werden. Es fehlen jedoch Studien, welche die Parameterveränderungen der Quellwässer auf ihrem Weg bis zum Stollenausgang charakterisieren. Die Größenordnung der auf diese Weise entstehenden Unsicherheiten in den Temperaturmessungen kann mit  $\pm 5$  K abgeschätzt werden. Die Messungen selbst werden aktuell mit Temperatursonden im Durchfluss vorgenommen und zeichnen sich durch eine Messgenauigkeit von  $\pm 0.1$  K aus. Ältere Ther-

momentermessungen weisen höhere Fehler bis zu  $\pm 1$  K auf. Für den Standort Baden-Baden ist zusätzlich anzumerken, dass langjährige detaillierte Messreihen vorliegen, die jedoch noch nicht in digitaler Form erfasst sind. Eine Auswertung aller Daten wäre mit großem zeitlichem und personellem Aufwand verbunden und musste bisher zurückgestellt werden.

*Temperatur Bohrungen:* In Bohrungen können der Temperaturverlauf entlang des Bohrlochs (z.B. Badenweiler III) oder die „Bottom Hole Temperature“ BHT (z.B. Pflutterloch II) gemessen werden. Dabei treten je nach zeitlichem Abstand zu den Bohrarbeiten Störungen durch die Bohrspülung auf. Bei dem Temperaturprofil aus Badenweiler III, das 10 Tage nach Abschluss der Bohrarbeiten aufgenommen wurde, waren solche Störungen vermutlich bereits abgeklungen. Im Pflutterloch der BHT ist der genaue Messzeitpunkt nicht aktenkundig. Für die Modelle Baden-Baden und Ohlsbach wurden die Auslauftemperaturen herangezogen. Mögliche Fehlerquellen bei den Temperaturmessungen in Bohrungen sind die Vermischung mit oberflächennahem Grundwasser, die Vermischung innerhalb des Bohrlochs, die Abkühlung während des Aufstieges bis zum Auslauf und die unzureichende Erfassung von Temperaturschwankungen bei Einzelmessungen. Die auftretenden Abweichungen können nicht generell quantifiziert werden. Sie hängen stark von der Art der Messungen und den Gegebenheiten in und um das Bohrloch ab.

*Wärmeleitfähigkeit:* Die Wärmeleitfähigkeit kann an Gesteinsproben im Labor gemessen oder in situ in Bohrungen bestimmt werden, wenn eine Beeinflussung durch Grundwasser ausgeschlossen werden kann. Sie ist abhängig von der Zusammensetzung der Gesteine und verhält sich daher im Untergrund ebenso heterogen wie die Verteilung der Gesteinseinheiten. In der Bohrung Hechtsberg (siehe Abb. 50) weichen die Ergebnisse der in situ-Messungen von den Laborwerten um durchschnittlich  $0,5$  W/mK und maximal  $2$  W/mK. Die Messgenauigkeit hängt stark von eventuellen Wasserbewegungen und der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit im Gestein ab. In BURCKHARDT et al. (1989) werden für die Wärmeleitfähigkeit in den oberen  $14$  km der Erdkruste Messgenauigkeiten von  $\pm 20\%$  angegeben.

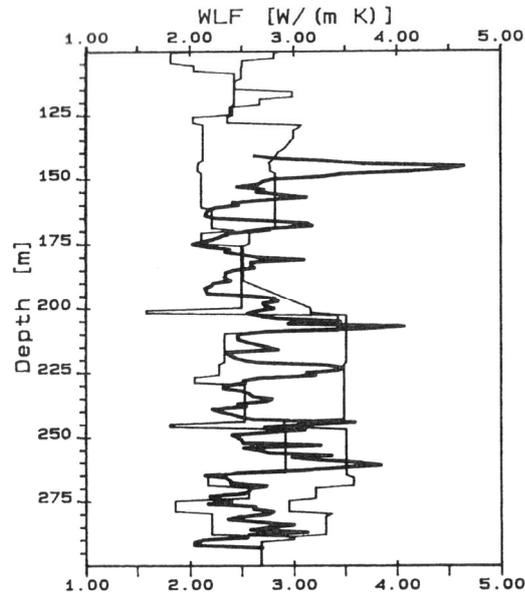


Abb. 50: Wärmeleitfähigkeit in der Bohrung Hechtsberg/Schwarzwald. Dicke Linie: in situ Messungen, dünne Linien: Labormessungen (linke Linie) parallel und (rechte Linie) senkrecht zur Foliation. aus BURCKHARDT et al. (1989)

*Radiogene Wärmeproduktion:* Dieser Parameter wird durch Laboranalysen an Gesteinsproben ermittelt. Er variiert je nach Mineralzusammensetzung und Alter des Gesteins. Auch hier liegen die hauptsächlichen Unsicherheiten in der Heterogenität des Untergrundes. Die für die vorliegenden numerischen Modelle verwendeten Werte wurden durch BURCKHARDT et al. (1989) im Schwarzwald ermittelt. Für Probenmengen zwischen 10 und 20 wurden dabei Standardabweichungen von 5 bis 12 % bei den Wärmeproduktionsraten errechnet.

*Basaler Wärmefluss:* Der Anteil des Oberflächenwärmeflusses, der aus der Tiefe stammt und als untere Randbedingung der numerischen Modelle angegeben wird, kann indirekt aus Temperaturmessungen abgeschätzt werden. Es existieren verschiedene Kartenwerke zur Verteilung des Oberflächen- und des Mantelwärmestromes in Europa und weltweit (HÄNEL et al. 1988, CERMAK

1995). Die Qualität dieser Daten ist abhängig von der Dichte und Tiefenreichweite der verwendeten Temperaturmessungen. Da der geothermische Gradient mit der Tiefe variiert, ist besonders die Extrapolation der Temperaturen in die Tiefe mit Unsicherheiten behaftet. Je besser jedoch der Oberflächenwärmefluss aus oberflächennahen Temperaturmessungen bekannt ist, und je genauer der Anteil der radiogenen Wärmeproduktion ermittelt werden kann, um so sicherer lassen sich Aussagen zur tiefen Wärmestromdichte treffen.

*K<sub>f</sub>-Werte:* Die verwendeten k<sub>f</sub>-Werte wurden aus Pumpversuchen abgeleitet, die in bis zu 300 m tiefen Bohrungen durchgeführt wurden. Die Qualität der aus Pumpversuchen gewonnenen Transmissivitätsdaten hängt von vielen Faktoren ab. Einige seien hier angeführt: Art und Mächtigkeit des Grundwasserleiters, Ergiebigkeit, Förderrate, Dauer des Pumpversuchs, Länge der Filterstrecke, Heterogenität und Anisotropie des Grundwasserleiters, etc. Für die Pumpversuche in Festgesteinen ergibt sich als weitere Schwierigkeit die große Schwankungsbreite der Durchlässigkeiten je nach Anzahl der angeschnittenen Klüfte und Störungszonen. Außerdem sind die Festgesteinsaquifere des Schwarzwaldes nach unten hin nicht abzugrenzen, so dass die Berechnung von k<sub>f</sub>-Werten aus Transmissivitäten über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters problematisch ist. STÖBER (1995) hat für den Bereich des Schwarzwaldes T/H-Werte bestimmt, wobei die Bohrlochstrecke als Mächtigkeit H eingesetzt wurde. In diese Arbeit wurden die T/H-Werte als k<sub>f</sub>-Werte übernommen. Eine exakte Angabe der Unsicherheit von ermittelten k<sub>f</sub>-Werten ist nicht möglich.

*Quellschüttung:* Für die Messungen der Quellschüttung in Stollen gilt ebenso wie für die Temperaturmessungen: sie werden nur höchstens einmal jährlich an den Einzelquellen vorgenommen und liegen darüber hinaus nur als Gesamtschüttungswerte der Stollen bzw. Sammelbecken vor. Die Genauigkeit der Messung selbst ist hoch, kann aber durch schlechte Quelfassung, z.B. bei ungefasst aus Spalten austretenden Wässern, beeinträchtigt werden. Da für die numerischen Modelle durchschnittliche Schüttungen verwendet wurden, spielen diese Faktoren keine große Rolle. Auch für die Quellschüttung trifft die unter Temperaturen getroffene Bemerkung zu, dass die Vielzahl der z.B. in Baden-Baden in Papierform vorliegenden Daten nicht im Detail ausgewertet werden konnte.

*Grundwasser-Abstrom:* Im Modell Ohlsbach wurden errechnete Abstromraten zur Kalibrierung genutzt, da in diesem Fall keine Quellschüttungen bzw. Förderraten relevant sind. Die mit der Berechnung verbundene Unsicherheit er-

gibt sich aus den Einzelfehlern des Grundwassergleichenplans, der  $k_f$ -Werte und der Mächtigkeit des Grundwasserleiters.

*Alter und Herkunft der Wässer:* Altersdatierungen nach der  $^{14}\text{C}$ -Methode liegen für die Thermalwässer von Baden-Baden und Badenweiler vor. Da die Mischungs-, Ausfällungs- und Entgasungsvorgänge vor und während der Quellaustritte nicht im Detail bekannt sind, ist die Interpretation der  $^{14}\text{C}$ -Messungen mit Unsicherheiten behaftet. Zudem handelt es sich bei der Datierung methodisch um die Ermittlung eines Modellalters (nach PEARSON et al. 1970), die mit mehreren Bedingungen und Annahmen verknüpft ist. Die Höhe des möglichen Fehlers ist jedoch nicht genau zu quantifizieren. Zu Aussagen über die Herkunft der Thermalwässer können stabile Isotope und Edelgasgehalte herangezogen werden. Diese können Hinweise auf die Temperatur während der Infiltration geben. Die für Baden-Baden und Badenweiler (hier nur stabile Isotope) ermittelten Werte können, analog zu den  $^{14}\text{C}$ -Daten, Fehler durch Mischungs-, Entgasungs- und Reaktionsvorgänge beinhalten. Die Interpretation der Infiltrationstemperatur im Hinblick auf Entstehungsgebiet und -zeit ist mehrdeutig.

*Zirkulationstiefe:* Die maximalen Zirkulationstiefen der Thermalwässer wurden vor allem aus dem sogenannten Silica-Geothermometer und dem durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 3 K/100 m ermittelt. Diese Methode setzt ein geschlossenes System und ausreichend Zeit für die Einstellung eines stabilen chemischen Gleichgewichtes voraus. Durch die in Wirklichkeit vorhandenen offenen Systeme kann es jedoch zu Mischungs- und Ausfällungsreaktionen kommen, welche die ursprünglich eingestellten Gleichgewichte verfälschen und die Anwendbarkeit der Methode einschränken. Bei zu kurzer Verweilzeit der Wässer unter Maximaltemperaturen wird das Gleichgewicht noch gar nicht erreicht. Unter diesen Umständen erbringen die Geothermometerberechnungen ungenaue Werte. Weitere wichtige Unsicherheiten liegen in dem verwendeten geothermischen Gradienten, der lokal verschieden von 3 K/100 m sein kann, sowie in den Analysen der Wasserinhaltsstoffe, die den Berechnungen zugrunde liegen.

Für viele der oben genannten Parameter gilt gleichermaßen eine weitere Unsicherheit, die zu den möglichen Fehlern bei der eigentlichen Ermittlung der Messwerte hinzukommt. Die Interpolation der Messwerte zwischen einzelnen Messpunkten und vor allem die Extrapolation in Bereiche, in denen keine Messwerte vorliegen, z.B. in größere Tiefen, stellt bei der Charakterisierung des natürlichen, heterogen aufgebauten Untergrundes eine der größten Schwierigkeiten dar. Wechselnde Gesteinszusammensetzungen bedeuten

gleichzeitig wechselnde Eigenschaften wie  $k_f$ -Wert, Porosität, Wärmeleitfähigkeit, etc. Die Temperaturverteilung kann regional zusätzlich von Grundwasserströmung, starkem Relief oder zusätzlichen Wärmequellen, z.B. aus Mantelplumes, beeinflusst sein. Generell kann festgehalten werden, dass mit zunehmender Entfernung vom Messpunkt die Unsicherheit in der Prognose eines Parameters zunimmt, und dies um so stärker, je heterogener der Untergrund ist und je weniger Eigenschaften über den gesuchten Parameter hinaus bekannt sind.

### 5.1.2 Konzeptmodelle

*Zirkulationsprinzip:* Die vorliegenden Daten tragen in ihrer Synthese zur Charakterisierung der Zirkulationsprinzipien bei. Zu den Fehlerquellen bei der Datenerhebung und -regionalisierung treten dabei Unsicherheiten in der Auswertung und Schlussfolgerung hinzu. Die aus hydrochemischen Analysen abgeleitete Herkunft der Oberrheingrabenrand-Thermalwässer aus Niederschlagswässern und Meerwassereinschlüssen stellt die derzeit plausibelste und allgemein akzeptierte Hypothese dar. Sie kann jedoch nicht mit völliger Sicherheit belegt werden. Sehr wahrscheinlich ist auch der Ursprung der Thermalwässer östlich ihrer Austrittsstellen im Schwarzwald zu suchen, wo der topographische Gradient eine der treibenden Kräfte für das Zirkulationssystem bildet. Aber auch in diesem Fall kann letztendlich eine alternative Interpretation der Beobachtungen nicht völlig ausgeschlossen werden.

*Einzugsgebiet:* Eines der größten Probleme bei der Quantifizierung der Thermalwassersysteme stellt die Bestimmung des Einzugsgebietes dar. Dieses kann nur überschlägig aus den Wasserbilanzen und der Geländemorphologie abgeleitet werden. Die Strömungsbedingungen in der Tiefe sind aber vor allem in Kluftgrundwasserleitern von der Oberfläche aus schwer einzuschätzen. Im Fall der bearbeiteten Standorte wird daher die Begrenzung der Einzugsgebietes aufgrund der tiefreichenden Zirkulation und der geringen Datendichte als sehr unsicher bewertet.

Die *Beschränkung auf tiefreichende Strömungsprozesse* in den numerischen Modellen ist notwendig, um die Thermalwassersysteme quantitativ erfassen zu können (siehe Kap. Methodik). Die mengenmäßig dominierende flache Zirkulation wird ausgeschlossen. Damit werden jedoch bestimmte Abweichungen der Modelle von der Realität in Kauf genommen. Das auf den Schwarzwald-Höhen infiltrierende Niederschlagswasser führt zum Aufbau des hydrostatischen Druckes und ist so bestimmend für die Potentialverhält-

nisse im Untergrund. Durch die ausschließliche Simulation der Tiefenwässer, die unter 2 % der gesamten Grundwasserneubildung ausmachen, kann die Potentialverteilung nicht in dieser Form wiedergegeben werden. Die Definition der Randbedingungen erzeugt in den Modellen gleichwohl den in der Realität herrschenden hydraulischen Gradienten, so dass die Darstellung der Thermalwasserzirkulation als solcher nicht beeinträchtigt wird. Die derart konfigurierten numerischen Modelle leisten jedoch aus den genannten Gründen nicht die originalgetreue Nachbildung der hydraulischen Verhältnisse im unmittelbaren Infiltrationsbereich und erlauben selbstverständlich keine Aussagen über die flach zirkulierenden Grundwasservorkommen.

Die *Nebenbedingung* im Infiltrationsgebiet, welche den Grundwasserstrom nach außen verhindert, bewirkt genau diesen Ausschluss der flachen Grundwasserzirkulation. Die Infiltration wird damit auf einzelne Modellknoten in den hochgelegenen Modellbereichen beschränkt, weil an den Knoten in Tallage Exfiltration auftreten würde, sobald überflurgespannte Verhältnisse herrschen. Die punktuelle Infiltration im Gegensatz zum flächigen Grundwasserantrag entspricht den hydrogeologischen Charakteristika der Einzugsgebiete. Nur in einzelnen Bereichen treten ausreichend durchlässige und miteinander vernetzte Klüfte auf, die eine Tiefenperkolation der Grundwässer ermöglichen. Große Teile der einsickernden Wässer treten nach relativ kurzer und flacher Fließstrecke an Kluft- und Störungsquellen wieder aus. Die in den numerischen Modellen betrachtete Tiefenwasserzirkulation kann somit durch die zwar vereinfachten, aber doch realitätsnahen Randbedingungen gut wiedergegeben werden.

Die Bearbeitung der Thermalwassersysteme mittels numerischer Modelle verlangt allgemein einen hohen Grad an Abstraktion und Vereinfachung. Nur ausgewählte Prozesse können umgesetzt werden. Diese Abstraktion leistet das Konzeptmodell, indem aus den vorliegenden Informationen diejenigen Parameter und Prozesse ausgegliedert werden, die wesentlich sind, um die Thermalwasserzirkulation in numerischen Modellen darzustellen. Es versteht sich von selbst, dass die Modelle um so realitätsnaher werden, je besser diese Trennung der bedeutenden von den unbedeutenderen Prozessen gelingt. Beschränkungen existieren dabei von Seiten der Software, die nicht alle Prozesse und Parameter integrieren kann. So müssen z. B. die komplexen Strömungsgesetze des Kluftgrundwasserleiters als vereinfachtes Kontinuumsmodell nach DARCY dargestellt werden. Mit zunehmendem Erfahrungsschatz des Modellierers im Umgang mit der Software und dem bearbeiteten Standort sowie mit steigender Datendichte und Konkretisierung der Fragestellung ver-

bessert sich die Modellgüte hinsichtlich der Abstraktion. In der starken Abstraktion der Realität ist eine bedeutende Fehlerquelle für die in dieser Arbeit vorgelegten numerischen Modelle zu sehen.

### 5.1.3 Software-bedingte Fehler

Obwohl ein großer Teil der modellierten Einzugsgebiete aus Festgesteinen aufgebaut ist, die als reine Kluftgrundwasserleiter fungieren, werden in FEFLOW die Fließ- und Transportgesetze für Porengrundwasserleiter (siehe Kapitel 2) verwendet. Die Diskrepanz zwischen Poren- und Kluftgrundwasserleitern ist um so geringer, je kleiner der Maßstab des betrachteten Gebietes ist, weil mit zunehmender Gebietsgröße die Besonderheiten der Kluftgrundwasserleiter mit ihren lokal sehr unterschiedlichen Durchlässigkeiten und bevorzugten Wegsamkeiten an Stellenwert verlieren. Trotzdem ist die Betrachtung von Kluftgrundwasserleitern als Kontinuum dahingehend schwierig, dass aus den Modellparametern (v.a. hydraulische Durchlässigkeit) keine Schlüsse über lokale Untergrundeigenschaften gezogen werden können. Die  $k_f$ -Werte der numerischen Modelle sind als kleinmaßstäbliche Gebirgsdurchlässigkeiten zu bewerten, die mit Pumpversuchen nicht zu ermitteln wären und demzufolge nicht überprüfbar sind.

Bei der eigentlichen Berechnung der numerischen Modelle handelt es sich um ein Iterationsverfahren, bei dem eine Näherungslösung für ein Problem entwickelt wird, für das eine analytische, exakte Lösung nicht möglich ist. Die Abbruchkriterien der Iterationen für die Strömungs- und Transportgesetze sind durch den Anwender frei wählbar. Für die vorliegenden numerischen Modelle wurde jeweils die default-Einstellung von  $10^{-3}$  eingesetzt (siehe auch Kapitel 2). Im Verhältnis zu den übrigen Unsicherheiten der Datenbasis und der Konzeptmodelle ist dieser Fehler vernachlässigbar gering.

Mit der zugeschalteten Option „Streamline Upwinding“ wird ein numerischer Fehler bewusst eingeführt (siehe Kapitel 2). Eine gewisse Verwischung der Temperaturverteilung wird damit hervorgerufen, die jedoch keinen bedeutenden Einfluss auf die Modellergebnisse hat. Die Vorteile der Option im Hinblick auf die Berechnungsstabilität überwiegen bei weitem.

### 5.1.4 Unsicherheitsanalyse

Nach Aufstellung der einzelnen möglichen Fehler im vorhergehenden Kapitel soll an dieser Stelle eine Gewichtung der Unsicherheiten versucht werden.

Geordnet nach ihrer Bedeutung und beginnend mit den kleinsten Fehlertoleranzen werden die Parameter im Folgenden dargestellt.

Tabelle 28: Übersicht der Modellunsicherheiten, gewichtet nach ihrer Priorität für die Modellergebnisse

<b>Parameter</b>	<b>Begründung</b>
Solver-Kriterium $10^{-3}$	vernachlässigbar gering
Streamline Upwinding	vernachlässigbar gering
rad. Wärmeproduktion	geringe Sensitivität
basale Wärmeflussdichte	geringe Sensitivität
Wärmeleitfähigkeit	geringe Sensitivität
Quellschüttung	Gesamtschüttung gut zu ermitteln
Quelltemperatur	Durchschnittstemperatur gut zu ermitteln
Temperatur der Bohrungen	oft nur Auslauftemperatur bekannt
Ausschluss flacher GW-Zirkulation	Abstraktion der Realität
Kluft-GWL wie Poren-GWL	Abstraktion der Realität
Zirkulationstiefe	indirekte Ermittlung
Grundwasserabstrom	indirekte Ermittlung
Zirkulationsmechanismus	indirekte Ermittlung
$k_f$ -Werte	Regionalisierung, Skalensproblematik im Kluft-GWL
Alter und Herkunft	indirekte Ermittlung, mehrdeutige Interpretation der Messwerte
Einzugsgebiete allgemeine Abstraktion	nur Abschätzung möglich numerisches Modell als vereinfachte Nachbildung der Realität ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Exaktheit

zunehmender Unsicherheitsfaktor

Es ist wichtig zu bemerken, dass es sich bei dieser Gewichtung um eine Abschätzung handelt, die sich aus den Erfahrungen im Zuge der Modellberechnungen ergibt. Wie bereits weiter oben erläutert, ist eine Quantifizierung der Unsicherheitsfaktoren im Einzelnen nicht möglich. Sie soll jedoch relativ, im Vergleich der einzelnen Fehler untereinander, erfolgen, um einerseits eine

Einschätzung der Modellqualität zu ermöglichen und andererseits die gezielte Erweiterung der Kenntnisse durch Messungen und Studien der für die Modelle wesentlichen Parameter zu unterstützen. Neben den jeweiligen Parametern ist eine stichwortartige Begründung für ihre Einstufung aufgeführt, die im vorigen Kapitel bereits näher erläutert wurde.

Drei der bedeutendsten Unsicherheitsfaktoren, die  $k_f$ -Werte, das Alter der Wässer und das Einzugsgebiet, stehen in den numerischen Modellen in engem Zusammenhang. Sobald einer dieser Parameter bekannt ist, können die beiden übrigen aus den Modellberechnungen ermittelt werden. Die wohl am besten einzugrenzende Größe ist dabei das Grundwasseralter, das mit entsprechender Isotopen- und Edelgasanalytik nach modernsten Methoden abgeschätzt werden könnte. Für weitere Erläuterungen dazu siehe Kap. 6.

Ein weiterer Ansatzpunkt für Verbesserungen der Modelle liegt in der Software selbst. Je mehr Prozesse integriert werden können und je realitätsnaher die Umsetzung der Prozesse in Gleichungen ist, um so exakter kann das numerische Modell die Wirklichkeit nachbilden. So sollten zum Beispiel die Fließ- und Transportgesetze stärker den Eigenschaften eines Kluftgrundwasserleiters angepasst werden. Diese Problematik ist sehr komplex und kann derzeit noch nicht ausreichend in numerischen Modellen umgesetzt werden. Auch die Flexibilität der Diskretisierung im dreidimensionalen Raum könnte erweitert werden, um zum Beispiel schräg einfallende Störungs- oder Aufstiegszonen gut darstellen zu können.

Auch nach umfangreicher Erweiterung der Datenbasis und Verbesserung der Software würde ein numerisches Modell für so komplexe Fälle wie die hier bearbeiteten Thermalwassersysteme keine eindeutige Lösung erbringen. Die Heterogenität des natürlichen Untergrundes und die Vielzahl ineinandergreifender Prozesse verhindern eine vollständige Darstellung der Wirklichkeit in numerischen Modellen. Je nach Fragestellung können jedoch, wie auch in den hier beschriebenen Fallbeispielen, durch gezielte Abstraktionen Aussagen zu Wasser- und Wärmebilanzen, Fließgeschwindigkeiten, Aufstiegsmechanismen etc. getroffen werden.

Die geringe Datendichte in den vorliegenden Fallbeispielen wird teilweise durch die Vergleiche der Modelle untereinander und mit Modellen anderer Autoren kompensiert. Die Übereinstimmung der Ergebnisse aus Berechnungen an verschiedenen Standorten und mit z.T. unterschiedlichen Methoden ist ein deutlicher Hinweis auf die prinzipielle Korrektheit der getroffenen Annahmen. Auch die Stimmigkeit der einzelnen Modelle in sich stützt in gewisser Hinsicht die Richtigkeit des Konzeptmodells und der darin enthaltenen

Hypothesen. Wären die Hypothesen unrichtig, so hätte eine modelltechnische Umsetzung in solcher Weise nicht erfolgen können.

Zum Abschluss sei ein Faktor angeführt, der ebenso wenig quantifizierbar ist, jedoch einen sehr bedeutenden Anteil an der Minimierung der Unsicherheiten trägt: Die Bearbeitung der sehr komplexen Problemstellung erfolgte unter Einbeziehung von Erfahrungen aus jahrzehntelangen intensiven hydrogeologischen Forschungen. Die Ergebnisse von Studien auf den Gebieten der Festgesteinsgrundwasserleiter, der Geothermie und der numerischen Modellierung sowohl im Schwarzwald als auch an anderen Standorten trugen entscheidend zum Aufbau der vorliegenden Konzept- und numerischen Modelle bei. Vor diesem Hintergrund entstanden die dargestellten Ergebnisse im ständigen Bewusstsein der wesentlichen ablaufenden Prozesse, aber auch der mit ihrer Bearbeitung verbundenen Unsicherheiten. Es ist daher möglich, auf Grundlage der vorliegenden Daten und im Rahmen der Fragestellung, gesicherte Aussagen zu treffen und gleichzeitig die Modellgüte zu bewerten. Zusätzliche Daten oder Erkenntnisse können und sollten unter Beachtung der vorstehenden Fehlerdiskussion jederzeit sinnvoll in die Betrachtungen einfließen und die Schlussfolgerungen erweitern.

## **5.2 Vergleich der numerischen Modelle**

### **5.2.1 Vergleich der Konzeptmodelle**

Mit Ausnahme der Austrittsmechanismen sind die Zirkulationsprinzipien der einzelnen Thermalwasserstandorte gleich. Bei Ohlsbach treten keine natürlichen Quellen aus. Hier ist die Stauwirkung, die im tieferen Untergrund den Abstrom der Grundwässer in Richtung Rhein verhindert, im Bereich der tertiären und quartären Talfüllung aufgehoben. Die Sedimente weisen Durchlässigkeiten um  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  m/s auf und erlauben damit den horizontalen Abfluss des gesamten aufsteigenden Grundwassers. In Baden-Baden und Badenweiler dagegen sind die Störungssysteme, welche den Aufstieg steuern, bis zur Erdoberfläche ausgebildet, so dass auch die aufsteigenden Grundwässer hier austreten, anstatt unterirdisch abzufließen.

In Ohlsbach wird von zwei großen, durchlässigen Störungsbereichen ausgegangen, während das Baden-Badener Modell mit einer Hauptstörung und einem permeableren Aufstiegsbereich auskommt. Im Modell „3D-Badenweiler“ gibt es nur einen schmalen Aufstiegsbereich und keine hydraulisch wirksame Störung.

Die Gesteinseinheiten unterscheiden sich, indem bei Baden-Baden neben Granit auch permische und karbonische Sandsteine, Arkosen, Tonsteine etc. auftreten. Bei Ohlsbach überwiegt im Kristallin der Gneis und jüngere Gesteinseinheiten treten, abgesehen vom Tertiär und Quartär am Grabenrand, nicht auf. In Badenweiler wird die Vorbergzone mit ihren mesozoischen Gesteinen und das Grundgebirge mit Granit repräsentiert.

Die Einzugsgebiete von Ohlsbach und Baden-Baden sind nahezu gleich groß. Das Gebiet von Ohlsbach ist mit 65 km<sup>2</sup> etwas kleiner als jenes von Baden-Baden mit 70 km<sup>2</sup>. Das Badenweilerner Modellgebiet umfasst nur 16 km<sup>2</sup>.

In den Modellen Ohlsbach und Badenweiler wird mit einem Gesamtwasserdurchsatz von 1500 m<sup>3</sup>/d gerechnet, während im Modell „3D-Baden-Baden“ nur 814 m<sup>3</sup>/d durch das Modell strömen.

Die maximale Zirkulationstiefe ist im Modell Baden-Baden nach Geothermometerberechnungen mit 3500-4000 m um ca. 1000 m größer als im Modell Ohlsbach. Im Modell Badenweiler zeigen Geothermometer Maximaltiefen von 1100 m an.

Die Temperatur der aufsteigenden Grundwässer liegt in Baden-Baden mit rund 63,5°C wesentlich höher als in Ohlsbach mit ursprünglich 27,3°C und in Badenweiler mit 26 °C.

Altersdatierungen liegen nur für die Quellen und Bohrungen von Baden-Baden und Badenweiler vor: Für die Baden-Badener Thermalwässer wurde eine Verweilzeit von 11.000 bis 27.000 Jahren ermittelt. Einschränkend muss jedoch bemerkt werden, dass stabile Isotope auf eine Infiltration der Wässer während warmzeitlicher Bedingungen hinweisen. Unter Umständen sind diese Daten also durch Abreicherung an <sup>14</sup>C verfälscht (BENDER 1995). Für die Badenweilerner Quellen wurden Alter von 9.300 bis 10.400 Jahren bestimmt (BASTING 1977). Für die Ohlsbacher Wässer werden nach geochemischen Gesichtspunkten mehrere Tausend Jahre Verweilzeit im Gestein angenommen, die die hohe Mineralisierung erklären würden. Datierungen liegen für diese Grundwässer nicht vor.

### 5.2.2 Vergleich der Ergebnismodelle

Das Modell Baden-Baden reicht bis in 3500 m u. NN, während das von Ohlsbach nur 3000 m u. NN und Badenweiler 1000 m u. NN tief ist. Alle Werte ergeben sich aus Geothermometer-Berechnungen und den entsprechenden Tiefenabschätzungen der Zirkulation. Sie wurden aber durch Vorstudien dreidimensionaler Modelle überprüft und angepasst. Die Höhenverteilung der

oberen Ebene liegt bei den Modellen Ohlsbach und Baden-Baden etwa im gleichen Bereich. „3D-Badenweiler“ reicht von 340 bis 1144 m ü. NN. Das Modell „3D Ohlsbach“ ist im oberen Bereich vertikal geringfügig feiner diskretisiert, um den Abstrom im Quartär gut abbilden zu können. Auch die horizontale Verfeinerung ist bei „3D Ohlsbach“ etwas stärker, was sich in einer höheren Gesamtzahl der Elemente niederschlägt. Ursache dafür sind die zwei Störungen im Ohlsbacher Modell. „3D-Badenweiler“ ist das am wenigsten verfeinerte Modell. Es weist keine Störungszone und nur einen leicht verfeinerten Bereich um die Bohrung herum auf.

Die Randbedingungen sind, mit Ausnahme des Grundwasseraustrittes, gleich. Dieser wird im Baden-Badener Modell durch einen einzelnen Quellknoten auf Ebene 1 repräsentiert, während im Ohlsbacher Modell der gesamte nordwestliche Modellrand in den Ebenen 2 und 3 geöffnet ist, um den Abstrom innerhalb der Quartärschicht zu simulieren. „3D-Badenweiler“ stellt eine Mischform der beiden Varianten dar, indem sowohl ein Quellknoten auf der oberen Ebene als auch ein geöffneter Modellrand im Westen existiert, über den Grundwasserabstrom stattfinden kann.

Die Durchlässigkeitsverteilung der Modelle Baden-Baden und Ohlsbach im Kristallin ist ähnlich, jedoch ist der untere Modellbereich im Gebiet Ohlsbach um ca. eine Größenordnung weniger durchlässig als im Gebiet Baden-Baden. Abb. 51 ist zu entnehmen, dass dieser Trend gleichermaßen bei den  $k_f$ -Werten für die Störungen zu bemerken ist.

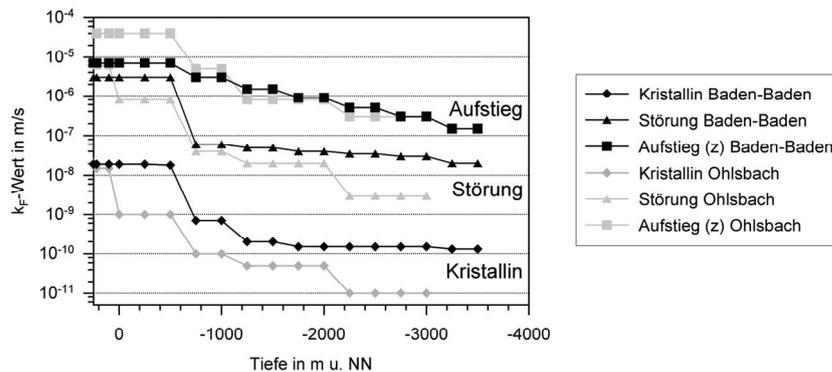


Abb. 51: Vergleichende Darstellung der  $k_f$ -Wert-Verteilung in den 3D-Modellen Baden-Baden und Ohlsbach

Für die Aufstiegszone gilt, dass im Modell „3D Ohlsbach“ durchweg höhere  $k_f$ -Werte eingesetzt sind, wobei die Differenz zu den Werten von Baden-Baden oben größer ist als unten. Durch diese Durchlässigkeitsverteilung wird erreicht, dass in Ohlsbach eine größere Wassermenge als in Baden-Baden mit jedoch wesentlich geringerer Temperatur aufsteigt. Weniger Zirkulation in großer Tiefe bewirkt einen geringeren Anteil sehr heißen Aufstiegswassers und eine große Aufstiegsdurchlässigkeit ermöglicht die Zusammenführung und den schnellen Transport einer großen Wassermenge. Gneis ist in der Tiefe weniger durchlässig als Granit, für den keine Tiefenabhängigkeit der  $k_f$ -Werte festgestellt werden konnte (STOBER 1995). Diese Tatsache wird durch die Modelle gut abgebildet.

Im Modell Badenweiler gilt in Oberflächennähe etwa die gleiche hydraulische Durchlässigkeit wie in den beiden übrigen Modellen, die sich mit der Tiefe aber nicht wie bei den beiden übrigen Modellen verringert, sondern bis in Schicht 10 konstant ist. Nur die unterste Modellschicht ist geringfügig undurchlässiger. In dem verhältnismäßig kleinen Modellkörper von Badenweiler (rund 25% der beiden anderen Modellkörper) zirkuliert die gleiche Wassermenge wie im Modell Baden-Baden. Die Umsetzung dieser Vorgaben erfordert höhere  $k_f$ -Werte. Zudem kommt das Badenweilener Modell gänzlich ohne hydraulisch durchlässigere Störungszonen aus, und bis zur Quelle fließt das Grundwasser ausschließlich durch Kristallin, die Aufstiegszone und zum Teil mesozoische Schichten der Vorbergzone. Die starke Beanspruchung der Badenweilener Gesteine durch tektonische Bewegungen im Permokarbon und Tertiär kann zu einer erhöhten Durchlässigkeit in diesem Gebiet geführt haben. Hydrothermale Überprägungen am Schwarzwaldrand (Quarziriff!) und in den höheren Lagen deuten auf eine auch früher schon rege Grundwasserzirkulation. Durch wiederholte tektonische Bewegungen wurden eventuell ausgeheilte Klüfte in den spröde reagierenden Gesteinen vermutlich mehrfach erneut geöffnet.

Die momentane hydrogeologische Situation im tieferen Untergrund kann mittels direkter Methoden nicht untersucht werden, und so kann das vorliegende numerische Modell erste Anhaltspunkte für die hydraulischen Durchlässigkeiten liefern, ohne diese jedoch eindeutig belegen zu können. Diese Aussage trifft für alle drei Modelle gleichermaßen zu.

Die Wärmetransportparameter unterscheiden sich geringfügig in der Wärmeleitfähigkeit und der radiogenen Wärmeproduktion. Beide Parameter sind im Modell „3D Ohlsbach“ geringer, weil der Anteil an Gneisgesteinen in diesem Gebiet sehr hoch ist, während in den Modellen Baden-Baden und Badenweiler

ausschließlich Granite das Kristallin ausmachen. Granit besitzt im Vergleich zu Gneis eine höhere radiogene Wärmeproduktion und eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Im Modell Badenweiler ist den Kristallingesteinen nur eine radiogene Wärmeproduktion von  $3 \mu\text{W}/\text{m}^3$  zugewiesen worden, weil hier nicht ausschließlich Granit, sondern auch Porphyre und Gneise vorkommen.

Die maximale Fließgeschwindigkeit ist im Modell Ohlsbach am höchsten, weil im Übergang vom Aufstiegsbereich zur Quartärschicht hohe Fließraten herrschen, die die beiden übrigen Modelle nicht ermöglichen. Das Modell Badenweiler hat die geringste Maximalgeschwindigkeit, wahrscheinlich aufgrund des großen Aufstiegsbereiches und der mächtige Buntsandstein/Muschelkalk-Schichten im Abstrom, wo sich die Grundwässer verteilen können.

Die mittlere Verweilzeit der Wässer beträgt in Baden-Baden mit 10.400 – 12.000 Jahren etwa doppelt so viel wie in Ohlsbach mit 5.000 – 7.500 Jahren. Im Ohlsbacher Modell ist die Fließstrecke im gering durchlässigen Kristallin kleiner und die Strecke innerhalb der durchlässigeren Störungszonen größer als in Baden-Baden. Aus diesem Grund fließen die Grundwässer im Baden-Badener Modell insgesamt langsamer. Im Modell Badenweiler verweilen die Grundwässer durchschnittlich 900-1.200 Jahre. Sie legen dabei eine wesentlich kürzere Strecke als in den beiden übrigen Modellen zurück, weil das Einzugsgebiet der Quellen von Badenweiler kleiner ist.

### 5.2.3 Vergleich der Plausibilitäts- und Sensitivitätsanalysen

Die drei präsentierten numerischen Modelle stimmen in sich und mit der Datenbasis gut überein. Sie geben für ihre jeweilige Geometrie eindeutige Lösungen an. So sind hinsichtlich der Plausibilität der numerischen Modelle keine Differenzen zwischen den einzelnen Modellstandorten festzustellen. Die Datenbasis, welche zur Kalibrierung bzw. Verifikation der Modelle verwendet wurde, gestaltet sich jedoch an jedem Standort verschieden, so dass damit die Sicherheit und Exaktheit der Lösungen jeweils individuell zu interpretieren sind. Nähere Ausführungen zur Problematik der Modellgüte finden sich in Kap. 5.1.

Der Vergleich der Sensitivitäten der numerischen Modelle auf die Wärmetransportparameter ergibt deutliche Unterschiede. Tabelle 29 ist zu entnehmen, dass das Modell „3D Baden-Baden“ für alle drei getesteten Parameter die stärkste Abhängigkeit der Quelltemperatur zeigt, während die Abhängigkeit im Modell „3D Badenweiler stationär“ am geringsten ausfällt.

Tabelle 29: Vergleich der Sensitivitäten auf Wärmetransportparameter

<b>3D Baden-Baden</b> Quelltemperatur	<b>3D Ohlsbach</b> Bohrungstemperatur	<b>3D Badenweiler</b> <b>stationär</b> Quelltemperatur
Basaler Wärmefluss $75 \rightarrow 100 \text{ mW/m}^2$		
+36,8% (59,5 $\rightarrow$ 81,4°C)	+26,6% (26,3 $\rightarrow$ 32,5°C)	+9,7% (24,7 $\rightarrow$ 27,1°C)
Wärmeleitfähigkeit $2,4 \rightarrow 3 \text{ W/msK}$		
-29,2% (76,1 $\rightarrow$ 59°C)	-21,9% (30,1 $\rightarrow$ 24,7°C)	+1,1% (25,5 $\rightarrow$ 25,8°C)
Radiogene Wärmeproduktion $0 \rightarrow 6 \mu\text{W/m}^3$		
+27,2% (54 $\rightarrow$ 68,7°C)	+15,3% (25,9 $\rightarrow$ 29,8°C)	+5,5% (25,3 $\rightarrow$ 26,7°C)

Die verhältnismäßig höhere Abhängigkeit des Modells „3D Baden-Baden“ kann damit begründet werden, dass an diesem Standort höhere Quelltemperaturen als an den beiden übrigen Standorten auftreten. Die Quellschüttung liegt dagegen in Baden-Baden unter dem Grundwasserdurchsatz der beiden übrigen Modelle. Die Bedeutung der Wärmetransportparameter ist einerseits um so größer, je höher der Anteil des konduktiven Wärmetransportes gegenüber dem konvektiven Transport ist. Andererseits weichen die Baden-Badener Quelltemperaturen am weitesten von den normalen Grundwassertemperaturen ab. Die erhöhten Temperaturen der Aufstiegswässer resultieren aus den hohen Aufstiegsgeschwindigkeiten aus größeren Tiefen als bei den übrigen Modellstandorten. Eine Verringerung der Temperaturen in der Tiefe, wie sie z. B. ein geringerer basaler Wärmefluss oder geringere radiogene Wärmeproduktion zur Folge hätten, würde sich hier besonders stark auf die Quelltemperaturen auswirken und diese reduzieren. Im Modell Badenweiler ist der Einfluss der Wärmetransportparameter vergleichsweise gering, weil dieser Standort gleichzeitig durch eine hohe Quellschüttung, geringere Quelltemperaturen und eine wesentlich geringere Zirkulationstiefe gekennzeichnet ist.

Die Sensitivitäten der hydraulischen Durchlässigkeiten spiegeln ähnliche Abhängigkeiten wider. Für das Modell „3D Badenweiler stationär“ fällt die Quelltemperatur mit steigender Modelldurchlässigkeit (um 53% bei 5-facher Erhöhung der  $k_f$ -Werte). Hier führt der erhöhte Grundwasserdurchsatz zu einer Verringerung der Aufstiegstemperatur, weil die Zirkulationstiefe relativ gering und das Einzugsgebiet im Verhältnis zur Grundwasserneubildung kleiner als bei den beiden übrigen Modellen ist. Die große Bedeutung des konvektiven Wärmetransports kommt daher im Modell Badenweiler zum Tragen. In

den Modellen für Baden-Baden und Ohlsbach steigen dagegen die Quelltemperaturen mit zunehmender Modelldurchlässigkeit in etwa gleichem Maße (Baden-Baden 19% und Ohlsbach 17% bei 5-facher Erhöhung der  $k_F$ -Werte). Eine Verringerung der Durchlässigkeiten führt im Modell „3D Baden-Baden“ zu einer stärkeren Temperaturabnahme (bei 10-facher Verringerung der  $k_F$ -Werte  $-63,3\%$ ) als im Modell „3D Ohlsbach“ (entsprechend  $-43,3\%$ ). Die Verringerung der Durchlässigkeit verursacht die Annäherung der Quell- bzw. Bohrungstemperaturen an den Normalzustand ohne Thermalwasseraufstieg. Da die Baden-Badener Temperaturen am weitesten von dieser Normaltemperatur abweichen, ist hier die Änderung demzufolge stärker als in Ohlsbach.

#### 5.2.4 Übersicht

Der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellte Modellvergleich soll zusammenfassend noch einmal veranschaulicht werden. Die wesentlichen gemeinsamen und unterschiedlichen Eigenschaften der drei Standortmodelle sind stichwortartig bzw. tabellarisch unten aufgeführt.

Gemeinsamkeiten aller drei Modelle:

- Lage der Thermalwasseraustritte am östlichen Oberrheingrabenrand,
- hauptsächlich meteorologisch gespeister Wasserkreislauf im Schwarzwald-Kristallin,
- Hauptfließrichtung ESE-WNW,
- Höhenunterschied innerhalb der Einzugsgebiete ca. 150 bis 1100 m ü. NN,
- hydrochemischer Wassertyp: Na-Cl-Thermalwässer,
- Randbedingungen und prinzipielle Modellkonfiguration,
- gute Anpassung der numerischen Modelle an vorliegende Daten.

An dieser Stelle soll zunächst diese Darstellung der gemeinsamen Standort- und Modelleigenschaften genügen. Eine weiterführende Diskussion und Auswertung der einzelnen Punkte ist Kap. 5.5 zu entnehmen.

Tabelle 30: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Modelle Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler

	<b>Baden-Baden</b>	<b>Ohlsbach</b>	<b>Badenweiler</b>
Modellgebiet:	70 km <sup>2</sup>	64 km <sup>2</sup>	16 km <sup>2</sup>
maximale Tiefe:	3500 m u. NN	3000 m u. NN	1500 m u. NN
Grundwasseraustritte:	11 Quellen, 2 Bohrungen	1 Bohrung	3 Quellen, 2 Bohrungen
Temperatur:	63,5°C	27,3°C	25°C
Quellschüttung:	735 m <sup>3</sup> /d	-	1250 m <sup>3</sup> /d
Förderrate Bohrungen:	85 m <sup>3</sup> /d	-	520 m <sup>3</sup> /d
mittlere Verweildauer:	10400-12000 a	5000-7500 a	990-1200 a
Feststoffgehalt:	ca. 3.000 mg/l	ca. 14.000 mg/l	ca. 350 mg/l
maximale DARCY-Geschwindigkeit:	1,6 m/d	6,4 m/d	0,4 m/d
Grundwasserdurchsatz:	815 m <sup>3</sup> /d	1500 m <sup>3</sup> /d	1445 m <sup>3</sup> /d
Sensitivität Wärmeparameter:	hoch	mittel	gering
Sensitivität k <sub>f</sub> -Werte:	mittel	mittel	hoch
k <sub>f</sub> -Wert-Verteilung:	in der Tiefe höhere k <sub>f</sub> als in Ohlsbach	k <sub>f</sub> der Auf- stiegszone oben höher als in Baden- Baden	keine k <sub>f</sub> - Abnahme mit der Tiefe

Auch die lokalen Besonderheiten der einzelnen Standorte werden in Kap. 5.5 einer eingehenderen Analyse unterzogen.

### 5.3 Vergleich mit Modellen anderer Autoren

#### 5.3.1 PRIBNOW (2003)

In CLAUSER (2003) ist als Anwendungsbeispiel für die Software SHEMAT ein Modell beschrieben, welches von DANIEL PRIBNOW entwickelt wurde. Es handelt sich um ein zweidimensionales Strömungs-, Massen- und Wärmetransportmodell für einen vertikalen Schnitt quer zum Oberrheingraben auf der Höhe von Baden-Baden. Ziel der Modellierung war die Nachbildung der thermalen Anomalie in der Umgebung von Soultz-sous-Forêt. Die verwendete Software SHEMAT ist unter 2.2.2.1 beschrieben.

Der modellierte Schnitt ist 80 km lang und erstreckt sich zwischen 1 km ü. NN und 15 km u. NN. Das Gitternetz besteht aus 112.000 quadratischen, 100\*100 m großen Zellen. Die Simulationen wurden stationär durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeiten sind dabei an die Temperatur und die Fluidichte an den Salzgehalt gekoppelt PRIBNOW (2003).

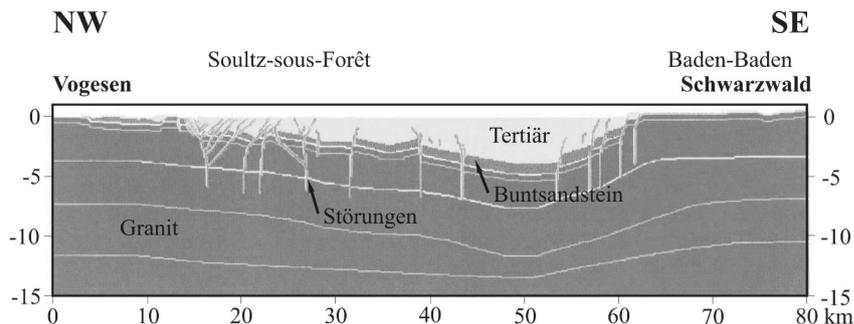


Abb. 52: 2D-Modell von PRIBNOW (2003) mit den hydrogeologischen Einheiten. Im Granit sind die Zonen mit verschiedenen  $k_f$ -Werten und radiogenen Wärmeproduktionsraten durch weiße Linien getrennt (bearbeitet nach PRIBNOW 2003)

Als Randbedingungen gelten für Strömung, Massen- und Wärmetransport jeweils Dirichlet-Bedingungen (1. Art) an der Erdoberfläche und für den Wärmetransport zusätzlich ein Wärmefluss von  $100 \text{ mW/m}^2$  an der Basis (PRIBNOW 2003). Die Materialparameter sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31: Materialparameter des 2D-Modells von PRIBNOW (2003)

	<b>Tertiär</b>	<b>Buntsandstein</b>	<b>Granit</b>	<b>Störungen</b>
Porosität [-]	0,1	0,15	0,03	0,3
K [m <sup>2</sup> ]	10 <sup>-18</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-16</sup> -10 <sup>-20</sup>	10 <sup>-14</sup> -10 <sup>-17</sup>
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	2,8	3,5	2,5	2,8
Rad. Wärmeproduktion [ $\mu$ W/m <sup>3</sup> ]	1,2	0,8	0,25-3,5	0,8

Die thermohaline Simulation führt zu einer modellierten Temperaturverteilung, die ungefähr den vorliegenden Daten entspricht. Auf eine detaillierte Kalibrierung wurde verzichtet, weil das 2D-Modell quer zum Schnitt verlaufende Störungen nicht abbilden kann, diesen aber ein bedeutender Einfluss auf Strömung und Temperaturverteilung zugesprochen wird. Das simulierte Strömungsfeld ist bestimmt von Konvektionszellen im Buntsandstein unterhalb des Oberrheingrabens. Aus den Grabenschultern infiltrierende Grundwässer beschreiben jedoch größere Zirkulationsschleifen und steigen am Oberrheingrabenrand wieder an die Erdoberfläche. Die maximale Darcy-Geschwindigkeit liegt bei 4 cm/a PRIBNOW (2003).

Die Grundwasserströmung am Oberrheingrabenrand ist prinzipiell ähnlich zu den 3D-Modellen der vorliegenden Arbeit. Da das PRIBNOW-Modell jedoch auf den zentralen Oberrheingraben mit der Wärmeanomalie von Soultz-sous-Forêt fokussiert war, ist jener Teil des Modells nicht genau kalibriert worden. Die Thermalquellen von Baden-Baden gehen trotz ihrer geringen Entfernung zum modellierten 2D-Schnitt nicht als Randbedingung oder Kalibriergröße ein. Zudem kann mit Hilfe einer 2-dimensionalen Modellierung keine Aussage zur Wasserbilanz getroffen werden, die eine weitere wichtige Kalibriergröße wäre. Als Durchlässigkeiten des Kristallin, bei PRIBNOW (2003) vereinfachend als Granit bezeichnet, werden für Tiefen bis 5 km u. NN 10<sup>-9</sup> bis 10<sup>-10</sup> m/s angegeben. Diese Werte stimmen sehr gut mit dem Modell „3D Baden-Baden“ überein. Mit 100 mW/m<sup>2</sup> wird ein höherer basaler Wärmefluss von PRIBNOW (2003) verwendet.

Im Vergleich zu den 3D-Modellen der vorliegenden Arbeit ist das Pribnow-Modell durch die Beschränkung auf 2 Dimensionen und die grobe Diskretisierung stark vereinfacht. Die Kopplung ist weniger umfassend, und es erfolgte keine vollständige Kalibrierung. Trotzdem konnten mit dem 2D-Modell die wesentlichen Zirkulationsmechanismen und Wärmetransportprozesse im Oberrheingraben und seiner Umgebung gut nachgebildet werden. Die ver-

wendeten Parameter liegen in vergleichbaren Größenordnungen. Die vorliegenden 3D-Modelle konzentrieren sich auf die Prozesse des Oberrheingrabenrandes und Schwarzwaldes und sind in Aufbau und Anwendungsbereichen detaillierter. Insofern stellen sie eine sinnvolle Weiterführung der Arbeiten von PRIBNOW (2003) dar.

### 5.3.2 BÄCHLER (2003)

Im Rahmen einer Dissertation an der ETH Zürich erstellte DOMINIQUE BÄCHLER numerische Modellstudien für die Temperaturanomalien von Landau und Soultz-sous-Forêt im Oberrheingraben. Das gekoppelte, thermisch-hydraulisch-chemische Modell von Soultz-sous-Forêt soll aufgrund seiner Parallelen zu den vorliegenden 3D-Modellen analysiert werden obwohl es nur 2-dimensional berechnet wurde. Die Fallstudie zur Region Landau ist 3-dimensional und erfasst die gekoppelten thermisch-hydraulischen Prozesse.

#### 5.3.2.1 Landau

Für die Fallstudie zur geothermalen Anomalie bei Landau wurde unter anderem ein 3-dimensionales gekoppeltes Strömungs- und Wärmetransportmodell erstellt. Der dabei verwendete Code TOUGH2 ist in Kap. 2.2.2 beschrieben. Der Modellkörper hat mit Abmessungen von  $3,6 \text{ km} \times 7,4 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  ein Volumen von rund  $133 \text{ km}^3$ . Er ist in ca. 70.000 quaderförmige Elemente mit 50 m bis 200 m Seitenlänge diskretisiert. Als hydrogeologische Einheiten treten quartäre und tertiäre Grabenfüllung mit Keuper, Muschelkalk mit Buntsandstein, Granit und eine 200 m breite Störungszone auf (Abb. 53). Die Materialparameter der einzelnen Einheiten sind in Tabelle 32 aufgeführt.

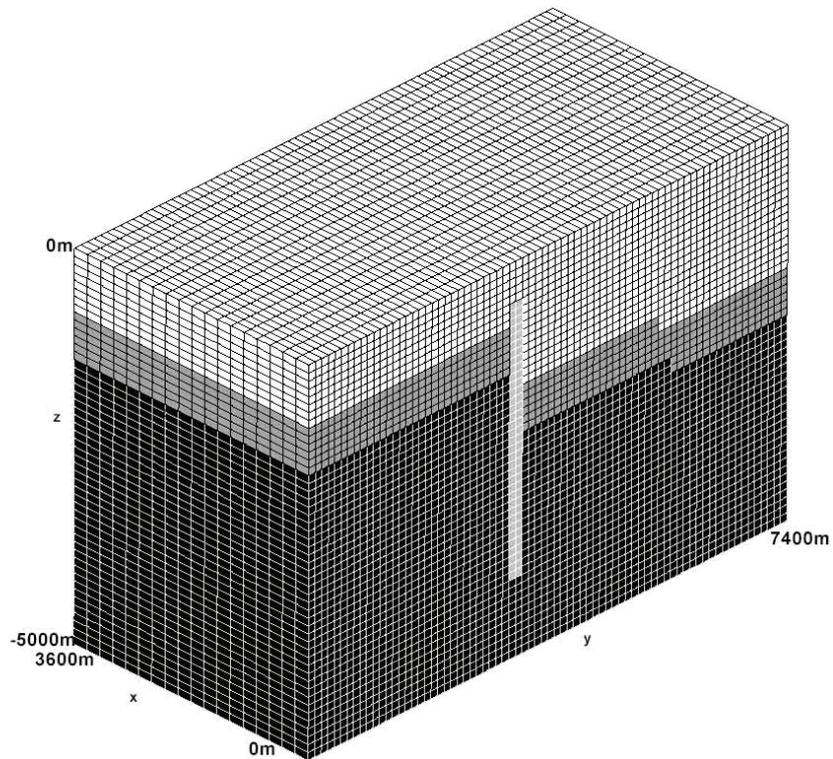


Abb. 53: Modellkörper der 3-D Fallstudie zur Temperaturanomalie von Landau (BÄCHLER 2003b). Hydrogeologische Einheiten sind von oben nach unten: Quartär/Tertiär/Keuper, Muschelkalk/Buntsandstein, Granit. Der hellgraue Bereich repräsentiert eine Störungszone.

Tabelle 32: Materialparameter des Modells 3D-Landau (BÄCHLER (2003))

	<b>Grabenfüllung</b>	<b>Muschelkalk/ Buntsandstein</b>	<b>Granit</b>	<b>Störung</b>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	2400	2650	2000
Porosität [-]	0,01	0,01	0,01	0,1
K [m <sup>2</sup> ]	5*10 <sup>-18</sup>	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-20</sup>	5*10 <sup>-13</sup>
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	3	4	2	2
Wärmekapazität [J/kgK]	1000	1000	1000	1000

Als Randbedingungen gelten an der Oberfläche konstante Temperatur und Druck und an der Modellbasis ein Wärmefluss von 100 mW/m<sup>2</sup>. Die Modellseiten sind undurchlässig. Zu Beginn der Simulation herrschen ein konstanter Temperaturgradient von 3K/100 m sowie ein konstanter Druckgradient von 10<sup>4</sup> Pa/m. Die radiogene Wärmeproduktion wurde ebenso ignoriert wie das Oberflächenrelief und der Salzgehalt des Grundwassers. TOUGH2 ermöglicht die Kopplung von Dichte und Viskosität des Fluids an die Temperatur.

Stationäre Bedingungen werden nach einer Simulationszeit von ca. 77.000 Jahren erreicht. Zu diesem Zeitpunkt haben sich vier Konvektionszellen innerhalb der Störungszone herausgebildet. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen hier zwischen 10<sup>-9</sup> und 10<sup>-10</sup> m/s, entsprechend ca. 0,3 bis 0,03 m/a. Die aus Bohrdaten ermittelte Temperaturverteilung wird durch das Modell annähernd wiedergegeben.

Im Vergleich mit den 3D-Modellen der vorliegenden Arbeit ergeben sich zahlreiche Gemeinsamkeiten:

- In einem 3-dimensionalen Modellkörper werden Strömung und Wärmetransport simuliert.
- Die Temperaturkopplung von Dichte und Viskosität des Wassers ermöglicht freie Konvektion.
- Störungen spielen eine wichtige Rolle für die Grundwasserzirkulation.
- Die hydraulische Durchlässigkeit der Störungszone liegt bei 5\*10<sup>-6</sup> bis 2\*10<sup>-5</sup> m/s im Modell Landau und 3\*10<sup>-8</sup> bis 7\*10<sup>-6</sup> m/s in „3D-Baden-Baden“.

Im Modell 3D-Landau nehmen die hydraulischen Durchlässigkeiten mit der Tiefe nicht ab. Unter Berücksichtigung der Dichte- und Viskositätseffekte werden in der Tiefe z.B. mit 2\*10<sup>-5</sup> m/s bei 100 °C sogar höhere k<sub>r</sub>-Werte erreicht als an der Erdoberfläche. Im Unterschied zu den Modellen der vorlie-

genden Arbeit, wo Störungs- und Aufstiegszonen eine Mächtigkeit von ca. 25 m besitzen, ist im Modell 3D-Landau von BÄCHLER (2003) die Störungszone 200 m mächtig. Diese Tatsache in Zusammenhang mit den höheren  $k_f$ -Werten in Landau bedeutet eine deutlich stärkere Durchströmung der Störung in diesem Modell. Angesichts der starken Temperaturanomalien als Gegenstand der Landauer Modellierung erscheint es plausibel, dass die Hauptstörung bei Landau großflächig über gute Durchlässigkeiten verfügt und dass große Wassermengen zirkulieren. Das Modell 3D-Landau sollte zudem die freie Konvektion des Grundwassers in der Störung darstellen und geht daher von genügend hohen Durchlässigkeiten aus. Im Gegensatz dazu werden in den 3D-Modellen der vorliegenden Arbeit Mindest-Durchlässigkeiten für die Durchströmung ermittelt, so dass nur im unmittelbaren Aufstiegsbereich und nahe der Erdoberfläche, wo die Grundwässer zusammenströmen,  $k_f$ -Werte in ähnlichen Größenordnungen wie im Modell Landau erreicht werden. Freie Konvektion auf den Störungsflächen wird in diesen Modellen bewusst verhindert. Die Konvektionszellen im Modell 3D-Landau sind kleiner als die in den vorliegenden 3D-Modellen simulierten Zirkulationskreisläufe. Hauptantriebskraft ist in Landau die durch Dichteunterschiede induzierte freie Konvektion, während in den vorliegenden 3D-Modellen der topographische Gradient den Grundwasserstrom antreibt, und Dichteunterschiede aufgrund der Temperaturen diese Zirkulation nur unterstützen.

#### 5.3.2.2 Saultz-sous-Forêt

Das Modell wurde mit dem Softwarepaket FRACTURE zur Strömungsmodellierung in Verbindung mit FRACHEM zur geochemischen Reaktions- und Transportmodellierung erstellt. Unter 2.2.2.3 sind einige Anmerkungen zu diesen Programmen zu finden. In Saultz-sous-Forêt wird ein Hot-Dry-Rock-Kraftwerk geplant, welches 6 MW elektrischen Strom erzeugen soll. Die Durchlässigkeit der Granite in 5 km Tiefe wird durch hydraulische Stimulation künstlich erhöht. Mittels einer Dublette soll Wasser durch das Gestein zirkulieren, gefördert und wieder re-injiziert werden. Ein im Rahmen der Forschungsarbeiten in 3500 m Tiefe durchgeführter Zirkulationstest aus dem Jahre 1997 wurde mit dem beschriebenen Modell nachgebildet.

Ein Horizontalschnitt in 3500 m Tiefe wird als 10 m mächtige Scheibe dargestellt, welche in 198 quaderförmige Elemente zerlegt ist. Eine sogenannte Kluftzone verläuft am unteren Modellrand entlang der X-Achse. An den Enden dieser Kluftzone befinden sich der Injektions- und der Produktions-

Knoten, welche die Bohrungen einer Hot-Dry-Rock-Dublette darstellen. Das Modell ist symmetrisch zur X-Achse und wurde daher nur für den in Abb. 54 dargestellten Bereich berechnet. BÄCHLER (2003)

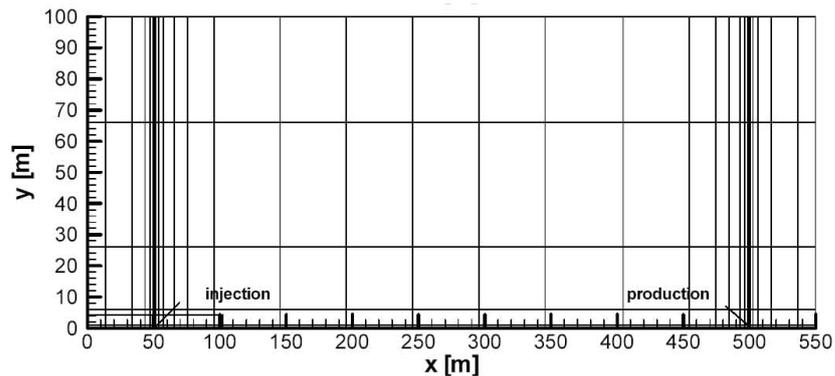


Abb. 54: Modellgeometrie des Modells 2D-Soultz von BÄCHLER (2003)

Die Initialtemperatur liegt bei 165 °C. Während des 2-jährigen Simulationszeitraumes gelten für die Temperatur Dirichlet-Randbedingungen an den oberen und seitlichen Rändern. Am Injektionspunkt wird bei konstantem Überdruck von 6 MPa Wasser mit einer Temperatur von 65 °C injiziert. Am Produktionspunkt herrscht der ungestörte hydrostatische Druck. Für die chemischen Transport- und Reaktionsprozesse gelten als Ausgangsbedingungen die aus hydrochemischen Analysen der Bohrungswässer aus Soultz-sous-Forêt bekannten Konzentrationen an einer ganzen Reihe von Stoffen. Die Konzentration im Re-Injektionswasser ist jeweils gleich der im geförderten Wasser. Lösungs- und Ausfällungsreaktionen durch Druck- und Temperaturänderungen werden ebenso simuliert wie deren Auswirkungen auf die Permeabilität BÄCHLER (2003).

Tabelle 33 zeigt die wichtigsten Materialparameter des Modells 3D-Landau. Der Granit wurde als Umgebungsgestein der hydraulisch wirksamen Klufthzone als quasi undurchlässig angenommen. Nur konduktiver Wärmetransport erfolgt durch das Gestein.

Tabelle 33: Materialparameter des Modells 3D-Landau (BÄCHLER (2003))

	<b>Kluftzone</b>	<b>Granit</b>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	-	2650
Porosität [-]	0,1	0
K [m <sup>2</sup> ]	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-19}$
Mächtigkeit der Kluftzone [m]	0,1	-
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	2,9	3
Wärmekapazität [J/kgK]	-	1000

BÄCHLER (2003) geht davon aus, dass nach 2 Jahren fast stationäre Bedingungen erreicht sind und nach längerer Simulationszeit keine wesentlichen Änderungen der Modellergebnisse mehr auftreten. Nach 2-jähriger Förderung und Re-Injektion von  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s Wasser kühlt sich in dem Modell die Produktionstemperatur um 10 °C auf 155 °C ab. Die ablaufenden Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen führen in der Simulation zur Verringerung der Porosität und der Permeabilität an der Produktionsbohrung. Dafür wird hauptsächlich die Ausfällung von Kalzit verantwortlich gemacht. Nach 2 Jahren Förderung sinkt die Porosität an der Produktionsbohrung auf 0,07, während sie an der Injektionsbohrung auf 0,15 steigt. Die Permeabilität sinkt an der Produktionsbohrung auf  $3 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup> und steigt im Injektionsbereich auf  $2 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>. Die Menge des injizierten Wassers hängt von der Permeabilität ab und verringert sich daher im Laufe der Simulation von 0,02 l/s auf 0,012 l/s.

Im Vergleich mit den 3D-Modellen vom Oberrheingrabenrand ist zunächst die Wahl des Modellraumes als axialsymmetrischer 2D-Horizontalschnitt hervorzuheben. Die interessanten Punkte des Modells – Produktions- und Injektionspunkt – liegen damit am Modellrand. So können die realen Verhältnisse im Umfeld der Bohrungen nur sehr vereinfacht simuliert werden, da Umströmungen und Wärmetransportvorgänge im dreidimensionalen Raum nicht einbezogen werden. Ein zweiter wesentlicher Unterschied zu den vorliegenden Modellen ist die ausschließliche Simulation eines künstlich angeregten Zirkulationstests. Die unter natürlichen Verhältnissen vorhandene Zirkulation auch im kristallinen Grundgebirge wird vernachlässigt. Die Strömung beschränkt sich laut Konzeptmodell auf die Kluftzone. Der Zeitraum umfasst mit 2 Jahren nur die Dauer des Zirkulationstests, ohne dass stationäre Bedingungen erreicht werden. Die Ergebnisse dieses 2D-Modells Sultz-sous-Forêt tragen aus diesen Gründen vor allem zum Verständnis der Strömungsverhältnisse in der Kluft- oder Störungszone bei.

Ein deutlicher Schwerpunkt des Modells Soutz-sous-Forêt sind die geochemischen Prozesse und ihre Auswirkungen auf hydraulische Untergrundeigenschaften. Die Resultate gelten jedoch für künstlich erzeugte Druckverhältnisse während eines Zirkulationstests bzw. im Betrieb einer Kraftwerksdublette und sind deshalb nicht vergleichbar mit den Vorgängen in natürlichen Thermalwasserzirkulationssystemen, wie sie in der vorliegenden Arbeit behandelt werden.

Die simulierten Prozesse Strömung, Wärmetransport und chemische Reaktionen/Transport werden voll gekoppelt behandelt. Mit  $2,9 \text{ J/msK}$  liegt die Wärmeleitfähigkeit in 2D-Soutz-sous-Forêt geringfügig über den  $2,8 \text{ J/msK}$  der Modelle 3D-Baden-Baden und 3D-Badenweiler, wo Granit die Hauptgesteinseinheit darstellt. Die hydraulische Durchlässigkeit des Granits in 2D-Soutz-sous-Forêt ist um 1-2 Größenordnungen geringer als die der vorliegenden 3D-Modelle in 2500 bis 3500 m Tiefe. Im Gegensatz dazu ist die Durchlässigkeit der Kluftzone um 1-2 Größenordnungen höher. Ihre mit 10 cm geringere Breite als z.B. in 3D-Baden-Baden mit 25 m relativiert diesen Unterschied wieder, so dass die Durchlässigkeiten der Kluft- bzw. Störungzonen insgesamt mit ca.  $10^{-6} \text{ m/s}$  (bezogen auf 25 m Breite) in ähnlichen Größenordnungen liegen.

## 5.4 Zusammenfassung der Modellvergleiche

Die dargestellten Vergleiche der vorliegenden 3D-Modelle untereinander sowie mit Modellen anderer Autoren stützen die vorgelegten Ergebnisse. Sie sind eine Art der Verifizierung, indem mit z. T. verschiedener Software und unter den unterschiedlichsten Modellvoraussetzungen ähnliche Parameter ermittelt wurden. Die auftretenden Unterschiede in Parametrisierung und Resultaten können ausnahmslos durch die entsprechende Schwerpunktsetzung und verschiedene Vereinfachungen der einzelnen Modelle gerechtfertigt werden. Die übereinstimmenden Resultate beziehen sich vor allem auf die hydraulischen Durchlässigkeiten von Kristallin und Störungszonen sowie auf die Wärmetransportparameter. Die Vergleiche zeigen daneben jedoch auch, dass bei detaillierter Betrachtung jeder Standort individuelle Eigenschaften besitzt, die sich nicht durch ein übertragbares Universalmodell darstellen lassen. So sind vor allem Größe und Form des Einzugsgebietes und die Art der Störungszonen, die den Thermalwasseraufstieg ermöglichen, von größter Bedeutung für die Herausbildung oder das Ausbleiben thermaler Quellen und erbohrter Grundwässer.

## 5.5 Schlussfolgerungen

### 5.5.1 Lokale Faktoren der Thermalwasserzirkulation

Baden-Baden tritt als derjenige Standort mit den weitaus höchsten Quelltemperaturen hervor. Diese Tatsache liegt nicht allein in den hohen Aufstiegsgeschwindigkeiten begründet, die von den Grundwässern bei Ohlsbach noch überstiegen werden, sondern leitet sich vor allem aus der tiefreichenden Zirkulation her. Die Untergrundeigenschaften ermöglichen durch relativ homogene Klüftung die Perkolation von Niederschlagswasser in größere Tiefen (bis zu 3500 m u. Gel.) als an den anderen Standorten. Zudem ist im Modell Baden-Baden das Verhältnis aus flach zirkulierenden zu tiefen Grundwässern zugunsten der letzteren verschoben.

Der Thermalwasseraufstieg wird in Baden-Baden durch die Störungssysteme des Permokarbons gesteuert. Aus diesem Grund treten die Quellen nicht am Talgrund aus, sondern unterströmen das Oostal und erreichen die Erdoberfläche erst am Hang unterhalb des Neuen Schlosses. Die Austrittsstellen liegen verteilt auf einem etwa 5000 m<sup>2</sup> großen Areal und verändern ihre Lage im Laufe der Jahre höchstens geringfügig.

Bei Ohlsbach erreichen die aufsteigenden Tiefenwässer nicht die Erdoberfläche, sondern strömen innerhalb der quartären Talschotter ab. Hier liegt der Aufstiegsbereich direkt unterhalb des Kinzigtales, das sich vermutlich entlang einer großen Störungszone herausgebildet hat (siehe 4.1.1). Die Kreuzung dieser Störungszone mit einer Rheingraben-parallelen Störung bildet den wasserwegsamsten Aufstiegsbereich. Wie in Baden-Baden ist somit die eigentliche Oberrheingraben-Randverwerfung nicht an den Aufstiegsprozessen beteiligt.

Die Ohlsbacher Tiefenwässer weisen die höchsten Feststoffkonzentrationen auf. Sie scheinen die geringsten Gehalte an flach zuströmenden Grundwässern zu besitzen. Eventuell liefern die durchströmten Gneise im Vergleich zu den Graniten von Baden-Baden und Badenweiler mehr lösliche Wasserinhaltsstoffe.

Der Standort Badenweiler zeichnet sich durch hohe Schüttungsmengen bei relativ geringer Quelltemperatur aus. Die Zirkulationstiefen liegen hier mit maximal 1000 m u. NN in flacheren Bereichen als bei den beiden übrigen Standorten. Das Einzugsgebiet ist trotz der hohen Schüttungsmengen relativ klein und die Verweilzeiten liegen dementsprechend unterhalb derjenigen in Baden-Baden und Ohlsbach. Aufgrund dieser geringeren Verweilzeiten und vermutlich größeren Mengen beigemischter junger Grundwässer liegen die Feststoffgehalte ebenfalls unter denen der beiden übrigen Standorte. Die Grundwässer erreichen im Gegensatz zu den anderen Standorten in Badenweiler den Oberrheingrabenrand und durchströmen sogar teilweise die mesozoischen Sedimente der Vorbergzone. Das „Quarzriff“ bietet hier in Verbindung mit der Randverwerfung und Querstörungen die Aufstiegsmöglichkeiten für die Tiefenwässer. Wie in Baden-Baden liegen auch hier die Austrittsstellen oberhalb der Talsohle und bilden seit Jahrtausenden stabile natürliche Quellen. Eine weitere Besonderheit am Standort Badenweiler sind die beiden genutzten Thermalbohrungen, die in hydraulischem Zusammenhang mit der Römerquelle stehen.

### 5.5.2 Übertragbare Erkenntnisse

Die Thermalwasserzirkulation am Rand des Oberrheingrabens wird entscheidend durch die struktureologischen Bedingungen gesteuert. Die Rheingraben-Randverwerfung, ihre parallel dazu verlaufenden Störungen sowie die Kreuzungsbereiche mit Querstörungen schaffen die Voraussetzungen für einen schnellen und kontinuierlichen Thermalwasseraufstieg. Diese Situation ist mit ihrer Vielzahl an Thermalwasservorkommen am östlichen Oberrhein-

grabenrand einzigartig, jedoch ist der große Stellenwert der Störungszonen im kristallinen Grundgebirge für die Wasserbewegung durchaus allgemeingültig. Die Störungen wirken sowohl als Grundwasserstauer wie auch als Leiter, und in den in Stollen gefassten Austrittsbereichen der Quellen von Badenweiler und Baden-Baden wird die große Bedeutung der die Störungen begleitenden Klüfte für die Wasserleitung deutlich.

Auch die Wasserbewegung durch das kristalline Grundgebirge vom Infiltrationsgebiet zum Aufstiegsbereich hin wird weniger durch die Lithologie als durch die Klüftung des Gebirges bestimmt. Die Gesteinsart bestimmt jedoch die Art der Klüftung, so dass in den Modellen wie auch in Pumpversuchen Unterschiede zwischen den Durchlässigkeiten der Granit- und Gneisgebirge auftreten. Diese machen sich vor allem ab Tiefen von 1500 m u. NN bemerkbar, wo die Gneisdurchlässigkeiten mit der Tiefe schneller abnehmen als die der Granite. Diese Tatsache ist auf Gebiete außerhalb des Schwarzwaldes übertragbar, sofern Gesteinsarten ähnlicher Ausbildung und tektonischer Geschichte auftreten.

Ein wichtiges Ergebnis der Modellberechnungen ist der relativ geringe Einfluss der Wärmetransportparameter auf die Thermalwasserzirkulation. Gerade die radiogene Wärmeproduktion, welche im Granit Größenordnungen bis  $6 \mu\text{W}/\text{m}^3$  annehmen kann, trägt nur wenig zur erhöhten Temperatur der aufsteigenden Grundwässer bei. Die konvektiven Transportprozesse sind am Oberrheingrabenrand wesentlich bedeutender als der konduktive Transport von Wärme durch das Gestein. Auch in anderen Gebieten sind diese Verhältnisse zu erwarten, wenn Thermalquellen mit entsprechend hohen Schüttungsmengen auftreten.

In Gebieten wie dem Schwarzwald ohne rezente vulkanische Aktivität wird der Grundwasseraufstieg, der schließlich zur Ausbildung von Thermalquellen führt, von mehreren Hauptkräften angetrieben. Die Aufstiegsenergie ergibt sich zum einen aus der Höhendifferenz zwischen Infiltrations- und Exfiltrationsgebiet und dem daraus folgenden hydraulischen Gradienten. Zum anderen führt die erhöhte Wassertemperatur in der Tiefe zu einer Verringerung sowohl der Viskosität als auch der Dichte, zwei Faktoren, welche einerseits die Fließfähigkeit des Wassers verbessern und andererseits den Aufstieg durch freie Konvektion begünstigen.

Das aus natürlichen Quellen austretende oder durch Bohrungen geförderte Grundwasser muss in ausreichender Menge zuströmen und mit Nachschub versorgt werden. Nur so ist eine dauerhafte Nutzung bzw. Existenz der Grundwasseraustritte gewährleistet. Der Zustrom wird in erster Linie durch

das an der Erdoberfläche infiltrierende Wasser gespeist. Die vielfältigen Fließwege durch den Kluftgrundwasserleiter des Kristallins haben jedoch auf der langen Fließstrecke (in Baden-Baden bis zu 10,5 km) eine starke Dispersion zur Folge. Aufgrund dessen verlieren die Bedingungen im Infiltrationsgebiet mit zunehmender Entfernung an Bedeutung. Die Verteilung bevorzugter Wasserwegsamkeiten spielt dagegen eine wachsende Rolle und je größer der Vernetzungsgrad, die Kluftöffnungsweite und die Kluftdichte sind, um so günstiger sind die Bedingungen für den Weitertransport des Grundwassers, das schließlich zur Austrittsstelle gelangen kann. Interessante Schüttungsmengen und Austrittstemperaturen werden jedoch nur in den Fällen erreicht, in denen eine Konzentration der relativ diffus zuströmenden Grundwässer auf einen engen Aufstiegsbereich erfolgen kann. Ist dieser fokussierte Aufstieg nicht gewährleistet, so kommt es zur Abkühlung der geringen Wassermengen, die den Dichteauftrieb hemmt und den Austritt wenn überhaupt, so nur geringer und kühler Quellwässer ermöglicht. Die Ausbildung starker Thermalquellen oder auch -bohrungen setzt daher große Einzugsgebiete voraus, die Grundwasser sammeln und Nachschub bereitstellen, sowie die Möglichkeit zum Zusammenfließen der Wässer zum schnellen Aufstieg reichlicher Wassermengen.

Für den Austritt von Quellwässern ist eine relative Stauwirkung notwendig. Das Beispiel Ohlsbach zeigt, dass auch bei hohen Durchlässigkeiten, die bis zur Erdoberfläche reichen, ein Quellaustritt nur dann möglich ist, wenn der seitliche Abstrom gehemmt wird. Sind die gut durchlässigen Bereiche auch lateral vorhanden, so nimmt das aufsteigende Thermalwasser den Weg im flachen Untergrund entlang des hydraulischen Gradienten und kühlt während des Abstromes in Oberflächennähe schnell ab. Die Standorte Baden-Baden und Badenweiler bieten mit ihren geklüfteten Gesteinen Wegsamkeiten bis an die Erdoberfläche, hemmen jedoch den seitlichen Abfluss, ein lateral weiterführendes Kluftnetzwerk fehlt. Als eine allgemeine Voraussetzung für die Herausbildung von Thermalquellen kann damit die Existenz relativer Grundwasserstauer im Abstrombereich festgestellt werden.

### 5.5.3 Bewertung der Methodik

Grundlage der angewandten Methodik ist die gründliche Sichtung der vorhandenen Daten. Die Erstellung der hydrogeologischen Konzeptmodelle erfordert die Einbeziehung von Informationen verschiedener Disziplinen. So werden nicht nur geologische und hydrogeologische Daten aus Kartenwerken und Bohrungen herangezogen, sondern auch geophysikalische, hydrochemische

und geothermische Messungen ausgewertet. Diese umfassende Recherche erhöht den Wert der Modellberechnungen, denn sie ermöglicht ein direktes Anknüpfen an die vorhergegangenen Forschungsarbeiten und eine Integration aller vorliegenden Informationen.

Das hydrogeologische Konzeptmodell stellt die erste Erweiterung der vorliegenden Forschungsergebnisse dar. Die Interpretation der Daten hinsichtlich der wesentlichen ablaufenden Prozesse und der bedeutendsten steuernden Parameter führt zu einem hypothetischen Modell, welches durch die numerischen Berechnungen überprüft werden soll. Gleichzeitig schafft das Konzeptmodell erst die Voraussetzungen für das numerische Modell und legt Geometrie, Randbedingungen und Start-Parametrisierung fest. Enthält das Konzeptmodell diesbezüglich Fehler, und werden diese im Laufe der Modellberechnungen nicht erkannt, so können zwar in sich stimmige numerische Modelle erstellt werden, jedoch sind die Schlussfolgerungen entsprechend fehlerbehaftet. Aus diesem Grund kommt der Auswahl der wesentlichen Prozesse einerseits und der zu vernachlässigenden Abläufe andererseits eine große Bedeutung zu. In dem hydrogeologischen Konzeptmodell liegen damit sowohl die Chance zum vertieften Verständnis des komplexen Systems wie auch die Gefahr der Fehlinterpretation der Daten und einer daraus folgenden Schwäche des numerischen Modells.

Die angewandte Methodik macht erstmals eine dreidimensionale Betrachtung der Thermalwasserzirkulation möglich. Während in bisherigen Arbeiten schematische vertikale Schnitte dargestellt oder die Prozesse beschreibend ausgewertet wurden, kann mittels FEFLOW das gesamte mutmaßliche Einzugsgebiet dreidimensional umgesetzt werden. Vor allem die hydraulischen Prozesse werden damit wesentlich realistischer wiedergegeben. Allerdings sind auch der dreidimensionalen Berechnung gewisse Beschränkungen auferlegt. Die Einzugsgebiete sind in ihrer horizontalen und vertikalen Erstreckung nur unzureichend bekannt, so dass eine Darstellung der Modellgeometrie stets große Unsicherheiten birgt. Auch die innerhalb des Modellraumes ablaufenden Prozesse können aufgrund der geometrischen Vorgaben durch das Gitternetz nur vereinfacht wiedergegeben werden. Dieses Problem ist jedoch durch gezieltes Verfeinern des Netzes zu minimieren.

Die numerische Modellierung erlaubt in diesem Fall eine Überprüfung der Hypothesen zur Thermalwasserentstehung durch Bilanzrechnungen der Wassermengen und der Wärmeenergie. Sie ist zu diesem Zweck ein sehr ein nützliches Werkzeug und erfüllt Anforderungen, die keine andere Methode der Hydrogeologie vorher leisten konnte. Es ist möglich, Prozesse, die bisher nur

qualitativ verstanden wurden, zu quantifizieren, Parameter zu ermitteln und Bilanzen abzuschätzen. Mehrere Prozesse, die mit analytischen Methoden nur einzeln nebeneinander betrachtet werden können, berechnen numerische Modelle gleichzeitig und miteinander gekoppelt. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten im Verständnis der Systemabläufe und -zusammenhänge.

Die geringe Datendichte ist jedoch eine deutliche Schwäche der Methode in den hier bearbeiteten Fällen. Die Modellgebiete sind mit bis zu 70 km<sup>2</sup> Fläche und 4500 m Mächtigkeit sehr groß für eine Umsetzung in numerische Modelle. Tiefreichende Bohrungen, die Daten über geologische und hydrogeologische Eigenschaften des Untergrundes liefern könnten, gibt es in den Untersuchungsgebieten nur vereinzelt. Je größer die Unsicherheiten in den Ausgangsdaten sind, um so geringer ist die Verlässlichkeit der Ergebnisse der darauf basierenden Berechnungen. Die Unsicherheiten werden sogar durch die verschiedenen modelltechnischen Beschränkungen noch vervielfacht. In diesem Problem liegt die hauptsächliche Schwierigkeit in der Anwendung der Methodik der numerischen Modellierung auf so große und komplexe Modellgebiete. Eine Darstellung der Ergebnisse sollte daher stets auf die implizierten Unsicherheiten verweisen, um Fehlinterpretationen zu verhindern.

Die Umsetzung der realen Gegebenheiten in ein numerisches Modell verlangt ein großes Maß an Vereinfachungen. Nicht alle in der Natur ablaufenden Prozesse können im Detail dargestellt werden, und auch die Untergrundeigenschaften müssen stark generalisiert werden, um eine Darstellung in Gitternetzform zu ermöglichen. So tritt zu den Schwierigkeiten der Datendichte das der modelltechnischen Umsetzung hinzu. Der Ausarbeitung des Konzeptmodells kommt auch diesem Grund eine große Bedeutung zu. Die Ausgliederung der wesentlichen Prozesse und Untergrundeigenschaften und die Entscheidung, welche der Abläufe zu vernachlässigen sind, bestimmt im Nachhinein die Qualität der Modelle und ihrer Ergebnisse.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der geringen Datendichte. Numerische Modelle müssen aufgrund ihrer Modellunsicherheiten nach der Kalibrierung verifiziert werden, um ihre Richtigkeit zu überprüfen. Dazu wird das Modell üblicherweise mit einem zweiten Datensatz getestet. In den Fällen der hier bearbeiteten Standorte ist dies nicht möglich. Die Ergebnisse der Modellberechnungen können zunächst keiner weiteren Überprüfung unterzogen werden. Spätere Untersuchungen könnten jedoch entsprechende Daten, z.B. zu den Verweilzeiten der Thermalwässer liefern und damit eine nachträgliche Verifizierung ermöglichen.

Zusammenfassend kann die Erstellung der numerischen Modelle in diesem Fall dahingehend bewertet werden, dass die getroffenen Aussagen im Einzelnen zwar wenig verlässlich und die Schlussfolgerungen sehr allgemein erscheinen, aber der große Vorteil der Methode liegt in der detaillierten Auseinandersetzung mit den vorhandenen Daten. Durch die intensive und umfassende Bearbeitung der Standorte mit ihren Prozessabläufen und Standortfaktoren kommt es zu einem tieferen Verständnis der komplexen Thermalwasserzirkulationssysteme, und die numerischen Modelle gewinnen deutlich an Aussagekraft, indem hydrogeologischer Sachverstand die geringe Datendichte durch Erfahrungswerte und vernünftige Annahmen ergänzt.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Ostrand des südlichen Oberrheingrabens ist von bemerkenswert vielen Thermalwasseraustritten gekennzeichnet. Neben natürlichen Quellen, die zum Teil schon die alten Römer nutzten, fördern auch jüngere Bohrungen thermales und hochmineralisiertes Grundwasser. Die vergleichende Untersuchung dreier Standorte mit dem Schwerpunkt der numerischen Modellierung ist Thema der vorliegenden Dissertation. Die Thermalwassersysteme sind hydrogeologisch interessant, weil sie dem Kristallin des Schwarzwaldes entstammen und Ausdruck eines sehr langsamen, großräumigen Zirkulationsmechanismus von ursprünglich meteorischem Wasser durch die geklüfteten Granite und Gneise des tieferen Untergrundes sind. Die Thermalquellen und –bohrungen erlauben Einblicke in die Hydrogeologie der tiefen Festgesteine, und die Methode der numerischen Modellierung macht eine dreidimensionale quantitative Bearbeitung der komplexen Problematik möglich.

Nach umfangreichen Datenrecherchen werden hydrogeologische Konzeptmodelle entwickelt, Start- und Randbedingungen festgelegt sowie Parameterbereiche ausgewählt, die zur Kalibrierung verwendet werden. Mit Hilfe des Programmpaketes FEFLOW werden Modelle konfiguriert, die das jeweilige Einzugsgebiet der Thermalwasseraustritte erfassen. Die drei Standorte werden weitestgehend analog zueinander bearbeitet, so dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Zum Teil sind Vorstudien notwendig, um die komplexen Grundwasserverhältnisse verstehen und numerisch darstellen zu können. Die Modelle der Thermalwasserzirkulation beschreiben die stationäre Strömung und den daran gekoppelten Wärmetransport. Sofern entsprechende Daten vorliegen, werden auch Pumpversuche instationär simuliert, um die Kalibrierung der Modellparameter zu verfeinern.

In allen drei Fällen – für die Standorte Baden-Baden, Ohlsbach und Badenweiler – liegen plausible numerische Strömungs- und Wärmetransportmodelle vor. Aus den Modellberechnungen können bestimmte Aussagen abgeleitet werden. Zunächst wird die Hypothese zur Entstehung der Thermalwässer aus infiltrierenden Niederschlagswässern, die sich auf ihrem Weg durch das tiefe Grundgebirge erwärmen und hydrochemisch verändern und im Randbereich des Oberrheingrabens aufsteigen, durch die Modelle prinzipiell bestätigt. Die Vorstellungen über die Thermalwasserzirkulation werden dahingehend erweitert, dass nun diejenigen Prozesse und Parameter benannt werden können, welche das Zirkulationssystem steuern und wesentlich beeinflussen. Dazu

gehören z.B. die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im Untergrund, die Dichte- und Viskositätskopplung an die Temperatur und die Konfiguration der Wasserwegsamkeiten im Aufstiegsbereich. Die Durchlässigkeit und ihre Abnahme mit der Tiefe bestimmt das Eindringverhalten der Grundwässer und damit unter anderem ihre Temperatur beim Erreichen der Aufstiegszone. Die Veränderungen vor allem der Dichte mit der Temperatur tragen wesentlich zu den Auftriebskräften der erhitzten Grundwässer am Oberrheingrabenrand bei. Und schließlich wird der Grundwasseraufstieg von Störungen bzw. den sie begleitenden Klüftzonen gesteuert. Starke Thermalquellen oder -bohrungen entstehen nur im Falle einer Sammlung und Konzentration der anströmenden Wässer auf einen engen Aufstiegsbereich und bei entsprechend schneller Aufstiegs geschwindigkeit, die ein erneutes Abkühlen der Grundwässer auf Oberflächentemperatur verhindert. Zudem ist eine laterale Stauwirkung notwendig, um den unterirdischen Abstrom der Thermalwässer zu beschränken und die Entstehung natürlicher Austritte zu ermöglichen.

Weniger bedeutende Parameter sind die radiogene Wärmeproduktion, der vor allem in Graniten eine zusätzliche Heizwirkung auf die Grundwässer zugesprochen wurde. Dieser Effekt kann in den numerischen Modellen als sehr gering nachgewiesen werden. Ebensolches trifft für die Größe der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins und für die basale Wärmeflussdichte zu. Generell steigt die Bedeutung dieser Parameter mit zunehmendem Anteil des konduktiven Wärmetransportes gegenüber dem konvektiven Transport. Letzterer überwiegt jedoch in allen drei Untersuchungsgebieten, so dass die hydraulischen Parameter einen stärkeren Einfluss als die thermischen Parameter ausüben.

Viele Parameter können durch die Methode der numerischen Modellierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmals quantifiziert werden. So liegen die maximalen Darcy-Geschwindigkeiten zwischen 0,4 und 6,4 m. Die mittlere Verweilzeit der bei Ohlsbach aufsteigenden Thermalwässer, für die keine Isotopdatierung vorliegt, beträgt 5.000-7.500 Jahre. Die Grundwassermengen, welche die verschiedenen Modelltiefen durchströmen, werden ebenso ermittelt wie die Durchlässigkeitsverteilung des Untergrundes.

Die angewandte Methodik führt zu einem vertieften Verständnis der Thermalwasserzirkulation im Kristallin den Schwarzwaldes. Sie weist jedoch vor allem aufgrund der unzureichenden Datengrundlage Schwächen auf. Die Modellergebnisse sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Die getroffenen Aussagen sollten als Tendenzen und Richtwerte verstanden werden und nicht für Detailprognosen z.B. der hydraulischen Durchlässigkeit an einem bestimmten Punkt verwendet werden. Die Modelle bilden die sehr komplexen

Naturvorgänge stark vereinfacht ab und erbringen aus diesem Grund entsprechend generalisierte, vereinfachte Ergebnisse.

An diesem Punkt sollten weitere Forschungsarbeiten anknüpfen, um die Datenbasis zu verbessern. Die numerischen Modelle würden in erster Linie von genaueren und verlässlichen Isotopendatierungen der Thermalwässer profitieren. Die Modellalter könnten damit verifiziert und die Einzugsgebiete und Durchlässigkeitsverteilungen genauer bestimmt werden. Weitere Daten im Hinblick auf die thermische Dispersion sind notwendig, um diesen wichtigen Prozess in die Transportmodellierung integrieren zu können. Die vorliegenden Modelle enthalten keine Dispersionseffekte. Zudem sollten für eine realitätsnähere Darstellung der Prozesse auch die hydrochemischen Vorgänge mit Lösung, Ausfällung, Stofftransport und die daran gekoppelten Dichte- und Viskositätsveränderungen in die Modelle integriert werden.

Durch eine Weiterentwicklung der Software können die starken Vereinfachungen reduziert und realistischere Modelle konfiguriert werden. So sollte die hydraulische Durchlässigkeit mit der Tiefe stufenlos abnehmen, anstatt durch die Layer-Konfiguration treppenförmig zu verlaufen. Stochastisch erstellte Kluftnetze mit Neigungen in alle Raumrichtungen wären sinnvoll, um die spezielle Charakteristik der Kluftgrundwasserleiter besser umzusetzen. Vereinfachte Möglichkeiten zur Anpassung der Modellgeometrie wären vorteilhaft, um die Effekte unterschiedlich geformter Einzugsgebiete untersuchen zu können. Schließlich würden schnellere Rechenzeiten und automatische Auswerteverfahren die Kalibrierung beschleunigen und erheblich verbessern, indem auch statistische Auswertungen Anwendung finden könnten.

Eine fortführende Bearbeitung der Thematik ist sehr interessant und kann vor allem dann zu neuen Erkenntnissen führen, wenn die oben angesprochenen Punkte weiter verfolgt werden.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

AMBS, S. (2002): Geologische und Hydrogeologische Untersuchungen in Neusatz (Baden) und Umgebung. – Universität Karlsruhe, Angewandte Geologie, Diplomarbeit, unveröff., 110 S.; Karlsruhe.

AQUILINA, L., GENTER, A. et al. (2000): Evolution of fluid circulation in the Rhine Graben: Constraints from the chemistry of present fluids. – Hydrogeology of crystalline rocks, Water Science and Technology Library, Ed.: Stober, I., 177-203, Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, Boston, London.

ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, **17**; Freiburg.

BÄCHLER, D. (2003): Coupled Thermal-Hydraulic-Chemical Modelling at the Soultz-sous-Forêts HDR Reservoir (France). – Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Dissertation (unveröff.), 138 S.; Zürich.

BASTING, R. (1977): Geologie und Hydrogeologie der Thermalwässer von Badenweiler. – Universität Heidelberg, Dissertation (unveröff.), 95 S.; Heidelberg.

BEAR, J. (1993): Modeling flow and contaminant transport in fractured rock. – Academic Press; San Diego.

BENDER, K. (1995): Herkunft und Entstehung der Mineral- und Thermalwässer im nördlichen Schwarzwald. – Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, **85**, 145 S.; Heidelberg.

BERG, D., GENSER, H. (1961): Geologische Voraussetzungen und hydrogeologische Deutung der Thermen von Badenweiler (SW-Schwarzwald). – Jber. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., **43**, 7-24; Stuttgart.

BUCHER, K., STOBER, I. (2000): The composition of groundwater in the continental crystalline crust. – Hydrogeology of crystalline rocks, Water Science and Technology Library, Ed.: Stober, I., 141-175, Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, Boston, London.

BURKHARDT, H. HAACK, U. et al. (1989): Geothermal Investigations in the KTB Locations Oberpfalz and Schwarzwald. – The German Continental Deep Drilling Program (KTB), Exploration of the deep continental crust, 433-480, Springer Verlag; Berlin.

- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa - Geologie, Chemismus, Genese. – 643 S., Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH; Stuttgart.
- CERMAK, V. (1995): A geothermal model of the Central Segment of the European Geotraverse. – *Tectonophysics*, **244**, 51-55.
- CLAUSER, C., VILLINGER, H. (1990): Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben. – *Geophysical Journal International*, **100**, 393-414.
- CLAUSER, C. (Ed.) (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers - SHEMAT and Processing SHEMAT. – 332 S., Springer Verlag; Berlin.
- DIERSCH, H.-J. G. (2005): WASY Software FEFLOW Reference Manual. – 278 S., WASY GmbH; Berlin.
- DIETRICH, P., HELMIG, R. et al. (2005): Flow and Transport in Fractured Porous Media. – 258-266, Springer Verlag; Berlin.
- DOEBL, F. (1967): The Tertiary and Pleistocene sediments of the northern and central part of the Upper Rhine Graben. – *Abh. Geol. Landesans. Baden-Württemberg*, **6**, 48-54.
- DWD (1999): Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland. – Müller-Westermeier, G., Kreis, A., Dittmann, E., Deutscher Wetterdienst.
- FRIEDRICHSEN, H. (1981): Geothermal systems in the Upper Rhine Graben and northern Black Forest: A chemical and stable isotope study. – *Tectonophysics*, **73**, 125-140, Elsevier; Amsterdam.
- GEYER, O.F., GWINNER, M.P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. – 482 S., Schweizerbart; Stuttgart.
- GK 7215 (1926): Geologische Spezialkarte von Baden 1:25.000, Blatt 67. – Badische Geologische Landesanstalt.
- HAENEL, R., STAROSTE, E. (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland.
- HAENEL, R. (1968): Temperaturmessungen an Dauermessstellen in Badenweiler (Bericht II). – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 12 S.; Hannover.
- HE, K., STÖBER, I. et al. (1997): Bericht zur chemischen Beschaffenheit und Genese der Thermalwässer von Badenweiler. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, unveröff. Bericht, 14 S.; Freiburg.

- HE, K. (1998): Chemische Beschaffenheit und Genese der Thermalwasservorkommen im südlichen Oberrheingebiet. – Freiburger Geowissenschaftliche Beiträge, **11**, 161 S.; Freiburg.
- HOFFERS, B. (1981): Ein Modell zur Erklärung der geothermischen Anomalien des Rheingrabens durch tiefgehende Wasserbewegungen und dessen tektonische Voraussetzungen und Folgen. – Universität Karlsruhe, Fak. f. Bio- und Geowiss., Dissertation (unveröff.), 147 S.; Karlsruhe.
- JENKER, B., JENKER, I. et al. (1986): Geothermiebohrungen im Mittleren Schwarzwald für das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. – Abschlussbericht 1986, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg; Freiburg.
- KÄB, W. (1995): Thermen. – Der Stadtkreis Baden-Baden, 26-37, Jan-Thorbecke Verlag; Sigmaringen.
- KIDERLEN, H. (1953): Zur Entstehung der Schwarzwaldthermen. – Neues Jb. Geol. u. Paläont., **97**, 496-506; Stuttgart.
- KINZELBACH, W., RAUSCH, R. (1995): Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Übungen. – 283 S., Gebr. Bornträger; Berlin, Stuttgart.
- KIRCHHEIMER, F. (1957): Bericht über das Vorkommen von Uran in Baden-Württemberg. – Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, **2**, 1-127; Freiburg.
- KIRCHHEIMER, F. (1959): Deutsche Heilbäder in Einzeldarstellungen III - Bad Krozingen. – Balneologische Schriftenreihe, Remmlinger, H., 15-20; Stuttgart.
- KLINGER, J. (2003): Erstellung eines zweidimensional-stationären Grundwasserströmungs-modells für den urbanen Raum Rastatt. – Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe (unveröff.), 70 S.; Karlsruhe.
- KOLDITZ, O. (1997): Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein. – 263 S., Gebr. Bornträger Verlag; Berlin Stuttgart.
- KROHE, A. EISBACHER, A.H. (1988): Oblique crustal detachment in the Variscan Schwarzwald, southwestern Germany. – Geologische Rundschau, **77/1**, 25-43; Stuttgart.
- LAMPE, C. (2001): The effects of hydrothermal fluid flow on the temperature history of the northern Upper Rhinegraben: Numerical simulation studies. – Kölner Forum für Geologie und Paläontologie, Dissertation, **8**, 126 S.; Köln.

LFU (2003): frdl. mdl. Mitteilung durch Herrn Juraschek.

LGRB (1998): Geowissenschaftliche Übersichtskarten von Baden-Württemberg 1:350.000. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg, CD-ROM; Freiburg i.Br.

LGRB (1974): Wasserschutzgebietsverfahren für die Stadtwaldquellen Baden-Baden, Gutachten Nr. III/2.1.-1214/73. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg; Freiburg.

MAGRI, F. (2004): Derivation of the coefficients of thermal expansion and compressibility für use in FEFLOW. – In: DIERSCH (2004): WASY Software FEFLOW, White Papers, **III**, 13-23, WASY GmbH; Berlin.

MAUS, H., SAUER, K. (1972): Die Thermalwasserbohrungen im Gewinn Pflutterloch auf Gemarkung Baden-Baden, Balneo- und regionalgeologische Ergebnisse. – Mitt. Bad. Landesver. Naturkunde und Naturschutz, **10**, 469-480.

MEINKEN, W., STOBER, I. (1997): Permeability distribution in the Quaternary of the Upper Rhine glacio-fluvial aquifer. – Terra Nova, **9**, 113-116.

MEINKEN, W. (1999): Hydrochemische Untersuchungen und Modellierung der Grundwasserbeschaffenheit in einem quartären Porengrundwasserleiter (Rheingraben/ Ortenaukreis). – Freiburger Geowissenschaftliche Beiträge, **14**, 197 S.; Freiburg.

NLFB (1962): Bericht I, II & III über geothermische Messungen in Baden-Baden. – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung; Hannover.

PARACELUS, J.B. (1589): Opera (De naturalibus balneis). – 2. Ausgabe (1616), S. 1113.

PEARSON, F.J., HANSHAW, B.B. (1970): Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on Carbon-14 dating. – Isotope Hydrology, IAEA, **129/8**, 271-286; Wien.

PRIBNOW, D. (2003): Rhine Graben Cross Section. – In: Clauser (Ed.): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, SHEMAT and Processing SHEMAT, 277-286, Springer; Berlin.

PRICE, H.S., CAVENDISH, J.C. et al. (1968): Numerical methods of higher order accuracy for diffusion convection equations. – Society of Petroleum Engineers Journal, 293-303.

SAUER, K. (1966): Die Thermen von Baden-Baden und ihre erdgeschichtlichen Ursachen. – So heilt Baden-Baden, 9-17; Ülzen.

- SAUER, K. (1970): Neues Thermalwasser aus dem Gewinn Pflutterloch in Baden-Baden. – Die Baden-Badener Florentinerquelle, 6 S.; Baden-Baden.
- SAUER, K. (1974): Die Vergrößerung des Thermalwasserdargebotes in Badenweiler. Geologische Voraussetzung und Ergebnisse der Arbeiten 1962-1973. – Heilbad und Kurort, **26**, 15-23; Gütersloh.
- SAUER, K. (1977): Das Thermalwasserdargebot in Badenweiler. – Kur- und Badeblatt Badenweiler, **25**, 5-6; Badenweiler.
- SAWARIEH, A.K. (2005): Heat sources of the groundwater in the Zara-Zarqa Ma'in-Jiza area, Central Jordan. – Dissertation am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe (unveröff.), 143 S.; Karlsruhe.
- SAWATZKI, G. (2000): Geologische Karte von Müllheim und Umgebung 1:25.000. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg; Freiburg.
- SCHÄDEL, K. (2002): Geologische Beobachtungen aus dem Westen der Zone Badenweiler-Lenzkirch. – Abhandlungen des geologischen Landesamtes, Baden-Württemberg, **15**, 25-56; Freiburg.
- SCHRAGE, C. L. (2004): Dreidimensionale thermohydraulische Modellierung der Tiefen-wasserzirkulation am Westrand des Schwarzwaldes am Beispiel der Baden-Badener Thermalquellen. – Universität Karlsruhe, Geologisches Institut, Diplomarbeit (unveröff.), 99 S.; Karlsruhe.
- SCHUMACHER, M.E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. – *Tectonics*, **21(1)**, 6 (1-17).
- SITTIG, E. (2003): Die Lichtental-Formation von Baden-Baden und das Normalprofil des Schwarzwälder Rotliegenden. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Jahreshefte, **39**, 177-238; Freiburg i.Br..
- STOBER, I. (1994): Die physikalischen Eigenschaften von Wasser und Gestein, ihre Tiefenabhängigkeit und Folgerungen für die Praxis - unter besonderer Berücksichtigung des kristallinen Grundgebirges. – Beiträge zur Hydrogeologie, **45**, 105-132; Graz.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – 191 S., Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart.
- STOBER, I., RICHTER, A. et al. (1999): The Ohlsbach plume - Discharge of deep saline water from the crystalline basement of the Black Forest, Germany. – *Hydrogeology Journal*, **7**, 273-283, Springer Verlag; Berlin.

STOBER, I., BUCHER, K. (2000): Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges - unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes. – Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie der DGG, **3**, 125-140, Springer Verlag; Berlin.

WERNER, J. (1990): Hydrogeologisches Gutachten über Möglichkeiten der Neuerschließung von Thermalwasser bei Badenweiler. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (unveröff.), 13 S.; Freiburg.

WICKERT, F., EISBACHER, G.H. (1988): Two-sided Variscan thrust tectonics in the Vosges Mountains, north-eastern France. – Geodynamica Acta, **2(3)**, 101-120.

WITTHÜSER, K. (2002): Untersuchungen zum Stofftransport in geklüfteten Festgesteinen unter besonderer Berücksichtigung der Matrixdiffusion. – Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Dissertation, **64**, 145 S.; Karlsruhe.

ZIENKIEWICZ, O.C., MEYER, P. et al. (1966): Solution of anisotropic seepage problems by finite elements. – Proceedings American Society of Civil Engineers, EMI, **92**, 111-120.



# CURRICULUM VITAE

Cindy Giersch geb. Werchau

Geburtsdatum: 24.03.1978

Geburtsort: Leipzig

## Ausbildung

- 1984-1990 Grundschule Lilo-Hermann-Oberschule Großpösna  
1990-1996 Wilhelm-Ostwald-Gymnasium Leipzig  
1996-1998 Vordiplom Geologie an der Universität Leipzig  
1998-1999 Gaststudium Geology an der University of Edinburgh  
1999-2002 Diplomstudium Geologie an der Universität Karlsruhe  
Thema der Diplomarbeit: Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Termas de Chillán (Chile) unter besonderer Berücksichtigung der geothermalen Verhältnisse  
2003-2005 Dissertation am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe bei Prof. Dr. H. Hötzl, Korreferentin: Prof. Dr. I. Stober  
Thema: Thermohydraulik des kristallinen Grundgebirges am Beispiel des östlichen Oberrheingrabens

## Praktika

- 1995-1996 Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie  
1996 Zentraldeponie Cröbern  
1996 Beratende Geologen zu Höne, Klußmann, Altpeter Leipzig  
2000 HotRock GmbH Karlsruhe

## Beschäftigung

- 1996-1997 Beratende Geologen zu Höne, Klußmann, Altpeter Leipzig  
1997-1998 Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie  
1999-2000 Universität Karlsruhe, Geologisches Institut  
1999 HotRock GmbH Karlsruhe  
2002-2005 Universität Karlsruhe, Lehrstuhl für Angewandte Geologie  
ab 2006 GeoEnergy Consulting GmbH Karlsruhe