

Schlussbericht, Dezember 2004

# Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz

Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz

ausgearbeitet durch

Sarah Signorelli, Nathalie Andenmatten Berthoud, Thomas Kohl

Geowatt AG

Dohlenweg 28

CH-8050 Zürich

In Zusammenarbeit mit

Schweizerische Geophysikalische Kommission

c/o Institut für Geophysik

ETH Hönggerberg

Schafmattstrasse 30

CH-8093 Zürich

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Ressourcenanalyse, die mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energie und der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission durchgeführt wird, wird die geothermische Ergiebigkeit des Untergrundes im Schweizer Mittelland individuell bewertet. Dazu werden 3D geologische, geothermische und hydrogeologische Datenanalysen durchgeführt und daraus die mögliche geothermische Produktion bestimmt. Wegen der umfangreichen Untersuchungen erstreckt sich die Arbeit über einen mehrjährigen Zeitraum.

Im Rahmen dieses Berichts wurden anhand von Bohrlochdaten und seismischen Profilen regionale, geologische Modelle für die Nordostschweiz und die Region Basel erstellt und die thermischen Verhältnisse im Untergrund mit numerischen Methoden simuliert. Dabei wurden folgende, geothermisch interessante Aquifere betrachtet: Obere Meeresmolasse, Oberer Malm, Oberer Muschelkalk und verwitterte Kristallinzone. Weiter wurde eine erste hydrogeologische Datensammlung angelegt und analysiert. Basierend auf Temperaturverteilungen und hydrogeologischen Begebenheiten werden die verfügbaren geothermischen Ressourcen in verschiedene Ressourcenklassen eingeteilt.

Die Untersuchungen zeigen, dass in der Ressourcenklasse 2 (Tiefenbereich bis  $T=100\text{ °C}$ ) pro  $\text{km}^3$  im Mittel 100 PJ und in der Ressourcenklasse 3 (Tiefenbereich ab  $T=100\text{ °C}$  bis 5 km Tiefe) 300 PJ Wärmeenergie (Heat In Place) vorrätig sind. Die effektiv förderbare Energie hängt aber von den hydraulischen Gegebenheiten im Gestein ab. Unsere Prognosen für die Nordostschweiz zeigen hier eine hohe Variabilität. Zum Beispiel könnte unter der Annahme einer Dublettennutzung im Mittel aus dem Kristallin über 30 Jahre total etwa 12 PJ pro  $\text{km}^3$  gefördert werden. Die bisherigen Berechnungen basieren auf Literaturangaben, wobei die Bewertung der Variation von Parametern erst zukünftig erfolgt.

## Summary

The geothermal productivity of the subsurface below the Swiss Plateau is assessed, separately for the individual geothermal compartments. The study is jointly financed by the Swiss Federal Office of Energy and by the Swiss Geophysical Commission. For the study geological, geothermal, and hydrogeological data analyses are carried out in 3D, which provides the base for estimating possible geothermal production. The work extends over several years, due to the extensive investigations needed.

Within this report, regional geological models have been established for northeastern Switzerland and the Basel region, on the basis of borehole data and seismic profiles. The subsurface thermal conditions are simulated by numerical modelling. Herein, the following promising water-bearing formations are treated: Upper Marine Molasse (Tertiary), Upper Malm and Upper Muschelkalk (Mesozoic), and the weathered crystalline basement top. In addition, a first hydrogeologic data base has been established and analysed. The exploitable geothermal resources are defined and classified by temperature distributions and hydrogeologic conditions.

The results show that, per 1  $\text{km}^3$  volume, in resource class 2 (depth down to  $T=100\text{ °C}$ ) about 100 PJ heat in place is available, and for resource class 3 (depth range between  $T=100\text{ °C}$  and 5 km) there is about 300 PJ. The effectively recoverable energy depends upon the local hydrogeologic conditions. The estimated production figures show large variability. For production by the doublet scheme, the crystalline basement top could provide about 12 PJ per  $\text{km}^3$  over 30 years. The investigations are based on literature data; the appraisal of parameter variability will be performed in the next project phase.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Projektziele .....	1
1.2 Bisherige Arbeiten .....	1
<b>2. Vorgehen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Allgemein .....	3
2.2 Quantifizieren der vorhandenen geothermischen Ressource .....	3
2.3 Definition der Ressourcenklassen .....	4
2.4 Datengrundlage .....	5
<b>3. Hydrogeologie der Nordschweiz</b> .....	<b>6</b>
3.1 Einleitung .....	6
3.2 Aquifere .....	6
3.3 Kristallines Grundgebirge und Permokarbon-Trog.....	9
3.4 Buntsandstein .....	10
3.5 Oberer Muschelkalk.....	10
3.6 Oberer Malm.....	11
3.7 Obere Meeresmolasse (OMM).....	12
<b>4. Geologie der Nordschweiz</b> .....	<b>13</b>
4.1 Nordostschweiz .....	13
4.2 Region Basel .....	14
4.3 Charakteristische Strukturelemente in den Untersuchungsgebieten .....	14
<b>5. Untersuchung Region Nordostschweiz</b> .....	<b>16</b>
5.1 Geologische Datengrundlage .....	16
5.2 Simulation der Temperaturverteilung .....	19
5.3 Berechnung des geothermischen Potentials.....	25
5.3.1 Verfügbare Energie in den Ressourcenklassen 2 und 3.....	25
5.3.2 Nutzbare Energie "Top Kristallin" .....	26
5.3.3 Nutzbare Energie "Oberer Muschelkalk".....	31
5.3.4 Nutzbare Energie "Oberer Malm" .....	35
5.3.5 Nutzbare Energie "Obere Meeresmolasse" .....	39
5.4 Geothermisch interessante Regionen für EGS-Nutzung im Kristallin .....	43
<b>6. Untersuchung Region Basel</b> .....	<b>44</b>
6.1 Geologische Datengrundlage .....	44
6.2 Simulation der Temperaturverteilung .....	45
<b>7. Schlussfolgerung und Ausblick</b> .....	<b>47</b>
<b>8. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>48</b>
<b>9. Anhang</b> .....	<b>50</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Projektziele

Ziel dieses Projekts ist eine Erhebung des geothermischen Potentials in der Schweiz. Mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energie und der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) wird eine detaillierte geologische und geothermische Erfassung und Bewertung der Untergrundsstruktur im Schweizer Mittelland vorgenommen. Die Bewertung geothermischer Reservoirs kann nur unter Berücksichtigung des komplexen Zusammenspiels von geophysikalischer / hydrogeologischer Prozesse und von petrophysikalischer Eigenschaften erfolgen. Erfahrungen zeigen, dass solche Ressourcen oft an hydrothermale Systeme in unterschiedlichen Tiefenbereichen gekoppelt sind.

In diesem Projekt werden verfügbare thermisch relevante geologische, hydrogeologische und petrophysikalische Daten zusammengetragen, visualisiert und quantifiziert. Im Gegensatz zu den meisten bestehenden Ressourcenanalysen werden die Parameter möglichst in ihrer 3D Struktur in ein dreidimensionales geologisches und topographisches Modell integriert. Durch die Berücksichtigung von Art, Mächtigkeit, Verbreitung und Wasserführung der Gesteine im Schweizer Mittelland werden thermische Prozesse im Untergrund genauer quantifizierbar und so für Bereiche, in denen keine Kenntnisse vorliegen, abschätzbar. Für spezifische Aquifere und Kristallinbereiche lassen sich dann ausgewählte Nutzungsszenarien bestimmen und Bereiche kartieren, welche sich für eine langfristige geothermische Bewirtschaftung eignen (z.B. erhöhte Durchlässigkeiten bei bestimmten Temperaturen in bestehenden Industriezonen). Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen ist ein mehrjähriger Zeitraum für die Arbeit projektiert. Die hierin vorliegenden Ergebnisse müssen als vorläufig eingestuft werden, da sie während des gesamten Projektzeitraums aufgrund neuer Erkenntnisse oder Datenlage aktualisiert werden.

## 1.2 Bisherige Arbeiten

Das Projekt "Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz" startete im Jahr 2002 zunächst mit einer Machbarkeitsstudie im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Geophysik der ETH Zürich. Darin wurde insbesondere das Softwarepaket *GOCAD* hinsichtlich seiner Eignung für die Erstellung geologischer Modelle in einem regionalen Massstab getestet und ein Konzept für das notwendige Vorgehen erarbeitet (siehe Kapitel 2.1).

2003 wurden daraufhin erste Berechnungen an Lokalmolellen in der Nordostschweiz durchgeführt und in einer wissenschaftlichen Arbeit veröffentlicht (Kohl et al., 2003). Ausgehend von Bohrlochdaten und geologischen Profilen wurden mehrere lokale, geologische Modelle mit dem Programm *GOCAD* erstellt und die Temperaturverteilung mit der Finite Elemente (FE) Software *FRACTure* (Kohl und Hopkirk, 1995) berechnet. Dabei wurden für die Übertragung des 3D geologischen Modells in ein numerisches FE Modell die Grundbausteine eines Softwarepaketes *GeoProductivity* gelegt (welches mittlerweile zu einer umfangreichen GUI Anwendung erweitert wurde). Die Einzelauswertungen wurden in einem ersten provisorischen Regionalmodell der Nordostschweiz zusammengefasst (Andenmatten und Kohl, 2003).

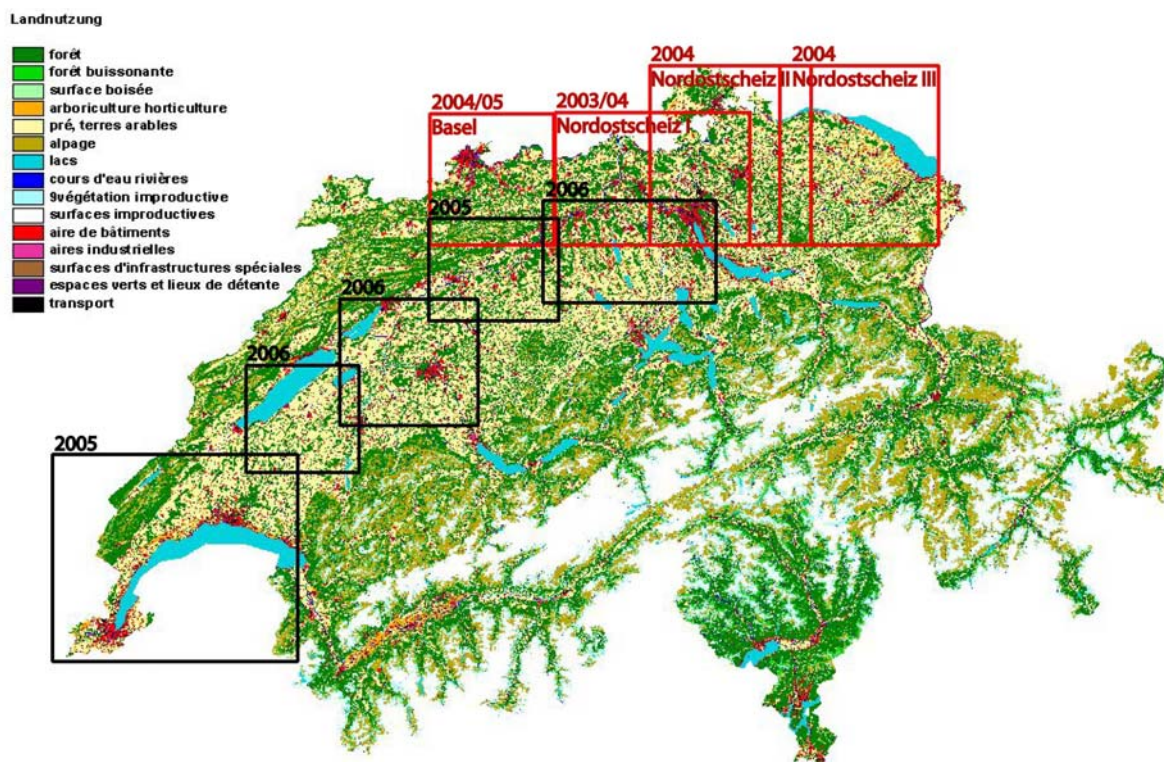
Der vorliegende Bericht fasst die Tätigkeiten im Jahr 2004 zusammen. Es sind hier die Zwischenresultate des bis 2006 laufenden Projektes illustriert, die laufend aktualisiert werden. Definitive Ergebnisse werden im Projekt-Schlussbericht 2006 zusammengestellt. Trotz eines Wechsels der Projektbearbeiterin konnte der Umfang der gesteckten Jahresziele erreicht werden. Allerdings wurde im Gegensatz zur Planung anstelle der Region "Genfer See", das Modell Nordostschweiz bis zum Bodensee ausgedehnt und ein geologisches Modell sowie eine erste Temperaturmodellierung für die Region Basel erstellt. Diese Änderung im Vorgehen erwiesen sich als notwendig, weil im Rahmen einer aktuellen Dissertation am Departement für Geologie und Paläontologie der Universität Genf (Frau Sabrina Paolacci) geologische und seismische Daten für dieses Gebiet zusammengetragen und bereits digitalisiert wurden. Die Daten werden uns für das vorliegende Projekt nach Abschluss der Dissertation ab Mitte 2005 zur Verfügung gestellt. Diese Änderung erscheint als gerechtfertigt, da gegenüber bestehenden geologischen Arbeiten mit einer bedeutend höheren Qualität gerechnet wird und somit die Aktualität dieser Ressourcenanalyse

ebenfalls steigt. Weiter wurden die zukünftigen Arbeiten bereits mit dem SGPK-Projekt "Plateau Suisse" koordiniert (Institut für Geophysik, Universität Lausanne).

Figur 1 zeigt die in dieser Arbeit untersuchten Regionen (rot), Nordostschweiz I bis III und Basel, sowie die bis Projektende geplanten Untersuchungsgebiete (schwarz). Bis jetzt wurden 4 Gebiete untersucht, für die jeweils basierend auf Bohrloch- und seismischen Daten regionale, geologische Modelle erstellt wurden, die 2005 mit Experten diskutiert und gegebenenfalls mit zusätzlichen Daten verbessert werden sollen. Basierend auf den Erkenntnissen lokaler Modelle aus den vorausgegangenen Arbeiten konnte anschliessend die regionale Temperaturverteilung in der gesamten Nordschweiz mit der Software *FRACTure* simuliert werden.

Weiter wurde eine erste hydrogeologische Datensammlung angelegt und analysiert, die kontinuierlich ergänzt werden soll. Es wurden unterschiedliche Institutionen angefragt (Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel, CHYN der Universität Neuchâtel, Matousek, Baumann & Niggli AG, Schweizerische Erdöl AG SEAG). Das im August 2004 gestellte Gesuch bei der SEAG für die Benutzung ihrer hydraulischen Parameterwerte ist allerdings noch hängig.

Abschliessend wurde das Softwaretool *GeoProductivity* erweitert, welches aus der Temperaturverteilung und den Angaben über hydrogeologische Eigenschaften die verfügbare, geothermische Leistung und Energie unter der Annahme einer Dubletten-Nutzung errechnet. Damit wurden in den Untersuchungsgebieten Nordostschweiz I bis III die geothermischen Ressourcen bestimmt. Durch den Vergleich mit Daten über die Oberflächennutzung (Potentielle Energieabnehmer,...) konnten für die geothermische Nutzung interessante Regionen definiert werden.



Figur 1: Bodennutzungskarte der Schweiz (Bundesamt für Statistik). Für die rot markierten Gebiete wurde eine geothermische Potentialstudie durchgeführt, die im vorliegenden Bericht als Nordostschweiz I-III und Basel bezeichnet werden. Die schwarz markierten Gebiete entsprechen der provisorischen Planung bis 2006.

## 2. Vorgehen

### 2.1 Allgemein

Die Bearbeitung jedes der in Figur 1 aufgeführten Untersuchungsgebiete erfolgt gemäss dem in Andenmatten und Kohl (2003) erarbeiteten Ablauf in folgenden Schritten:

1. Sichtung verfügbarer geologischer, hydrogeologischer und petrophysikalischer Daten
2. Erstellen eines geologischen Modells
3. Numerische Simulation des Temperaturfeldes
4. Anpassen des Modells an gemessene Temperaturdaten
5. Bestimmen des regionalen Wärmeflusses
6. Analyse der regionalen hydrogeologischen Bedingungen
7. Quantifizieren der vorhandenen geothermischen Ressource
8. Definition von geothermisch interessanten Regionen unter Einbezug von Daten zur Oberflächennutzung

### 2.2 Quantifizieren der vorhandenen geothermischen Ressource

Das Hauptziel bei der Evaluation des geothermischen Potentials in einem Gebiet ist nicht nur die Quantifizierung der verfügbaren Energie, sondern auch die Bewertung von hydrothermalen Zonen, die es erlauben die Energie auch zu fördern. Die total verfügbare Energie,  $E_{HIP}$  (Heat in Place), ist definiert als

$$E_{HIP} = \rho C_P \cdot \Delta T \cdot V \quad [J] \quad (1)$$

wobei  $\rho C_P$  die spezifische Wärmekapazität des Gesteins [ $J m^{-3} K^{-1}$ ],  $\Delta T$  die nutzbare Temperaturdifferenz [K] und  $V$  das Volumen des Reservoirs [ $m^3$ ] ist.

Die nutzbare Energie,  $E_{ut}$ , lässt sich aus der förderbaren thermischen Leistung,  $p_{th}$ , eines Systems bestimmen.  $E_{ut}$  ist die Energiemenge, die mit Hilfe eines Entzugsmediums (in der Regel Wasser) während einer Zeitspanne,  $dt$ , mit der Leistung  $p_{th}$  entzogen werden kann:

$$p_{th} = (\rho C_P)_f \cdot \Delta T \cdot Q \quad [W] \quad (2)$$

$$E_{ut} = \int p_{th} \cdot dt \quad [J] \quad (3)$$

wobei  $(\rho C_P)_f$  die spezifische Wärmekapazität des Fluids [ $J m^{-3} K^{-1}$ ] und  $Q$  die Förderrate [ $m^3 s^{-1}$ ] ist.

Für die Bestimmung der nutzbaren geothermischen Energie wird in dieser Arbeit nachfolgend eine Dublettennutzung mit einer Injektions- und Produktionsbohrung angenommen. Dies ist die einfachste Form der Nutzung, bei der eine nachhaltige hydraulische Bewirtschaftung des Untergrundes gewährleistet ist. In der Regel entspricht hier die Produktionsrate der Reinjektionsrate. Selbstverständlich ist dies nicht unbedingt die ökonomisch sinnvollste Nutzung, dies zeigt sich in der Praxis durch die häufige Anwendung von Singlet-Bohrungen.

Die Förderrate,  $Q$ , kann für ein Dubletten-System in porösem Medium mit einer iterativen Formel nach Gringarten (1978) prognostiziert werden:

$$Q_{i+1} = \frac{4\pi \cdot Tr \cdot \Delta P_b}{\ln(3 \cdot Q_i \cdot c \cdot \Delta t / \pi \cdot \Delta z \cdot r_w^2)} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (4)$$

wobei  $Tr$  die Transmissivität [ $m^2 s^{-1}$ ] ist,  $\Delta P_b$  die maximale Grundwasserabsenkung in der Förderbohrung [m],  $\Delta t$  die Zeitspanne, während der die Fördertemperatur nicht messbar sinkt [s] (Dies entspricht einer Betriebszeit von ca. 30 Jahren),  $c$  das Verhältnis zwischen Wärmekapazität des Fluids und des Aquifers [-],  $\Delta z$  die Reservoirhöhe [m],  $r_w$  der Bohrlochradius [m] und  $Q_i$  die Förderrate beim  $i$ -ten Iterationsschritt [ $m^3 s^{-1}$ ]. Nach Gringarten (1978) kann zudem auch die Distanz zwischen

Förder- und Injektionsbohrung bestimmt (s.u.) und somit den Platzbedarf einer Anlage abgeschätzt werden. Wie die Gleichungen 1 bis 4 zeigen, sind für die Bestimmung des geothermischen Potentials Modellierungen der Temperaturverhältnisse im Untergrund (zur Abschätzung von  $\Delta T$ ) sowie Abschätzungen der hydraulischen Beschaffenheiten (zur Abschätzung von  $Tr$ ) notwendig. Anhand diese zwei Kriterien wird in Kapitel 5.2 das geothermische Potential der Nordostschweiz bestimmt.

Das Verhältnis zwischen nutzbarer und totaler Energie wird als "Gewinnungsfaktor"  $R$  (recovery rate) bezeichnet.

$$R = \frac{E_{HIP}}{E_{ut}} \quad (5)$$

Entsprechend der Gringarten-Beschreibung wird  $R$  insbesondere von der Anlagengeometrie abhängen, da selbst für schlechte Transmissivitäten  $Tr$  eine Lösung mit einem minimalen, für die Praxis unrealistischen Bohrlochabstand berechnet wird. Daher ist in *GeoProductivity* ein minimaler Bohrlochabstand definiert worden, der sinnvollerweise die Länge von  $\sim 200$  m nicht unterschreitet. Unterhalb dieses Abstandes wird  $E_{ut}$  und damit auch  $R$  auf "0" gesetzt, oberhalb wird die Nutzenergie  $E_{ut}$  gemäss Gleichung (3) berechnet.

### 2.3 Definition der Ressourcenklassen

Die Einteilung der geothermischen Ressourcen muss unterschiedlichen Kriterien genügen, die ebenfalls zukünftige Entwicklungen der geothermischen Nutzung berücksichtigen. Es wird daher ein Schema vorgeschlagen, welches von heute und zukünftig nutzbaren Ressourcen ausgeht. Im einfachsten Fall würde die Summe aller Ressourcenklassen auch der total verfügbaren Energie entsprechen. Dabei sollte auch die Möglichkeit berücksichtigt werden, dass heute nicht nutzbare Ressourcen zukünftig genutzt, bzw. heute nur zur Wärmeengewinnung zur Verfügung stehende Ressourcen zukünftig auch zur Stromproduktion herangezogen werden könnten. Daher wird ein Schema vorgeschlagen, in dem die Summe der Energie aller Ressourcenklassen nicht der total verfügbaren Energie,  $E_{HIP}$ , entspricht. Kriterien für die Definition der Klassen sind:

- Temperaturverhältnisse
- Lage von Aquiferen
- Beschaffenheit der Aquifere
  - Hydraulische Leitfähigkeit  $K$
  - Hydraulische Leitfähigkeit nach Stimulationsmassnahmen  $K_{stim}$ ,
  - Transmissivität  $Tr$ , etc.
- Bohrtiefe, etc.

Folgende Ressourcenklassen sollen unterschieden werden:

1. **Oberflächennahe Ressourcen:** Die bestehende Geothermie-Nutzung in der Schweiz, wie sie in den 2-jährig erscheinenden Geothermie-Statistiken (Signorelli et al., 2004) publiziert wird, deckt nur einen kleinen Teil der zur Verfügung stehenden oberflächennahen Energie ab. Die Nutzung für Heizzwecke wird meist mit Sole-Wasser Wärmepumpen realisiert. Da diese Niedrig-Enthalpie Systeme in der Regel Erdwärmesondenanlagen sind, kann eine Einschränkung der Tiefe bis auf 200 m gemacht werden. Zusammen mit den Angaben zur regionalen Erdwärmesondenverteilung Ende 1999 (Medici und Rybach, 2000) kann die Anzahl Anlagen in einer Region bestimmt und die nutzbare, geothermische Energie anhand von durchschnittlichen Entzugleistungen und Laufzeiten abgeschätzt werden.
2. **Heute verfügbare Ressourcen:** Diese Klasse beinhaltet tiefe Aquifersysteme, welche zur Wärmeproduktion mit bestehender Technologie genutzt werden können. Ähnlich wie bei den "Oberflächennahen Ressourcen" kommen hier ebenfalls häufig Wärmepumpen-Systeme zur Anwendung. Die Aquifernutzung wird hier ab Tiefen von 200 m quantifiziert, wobei bis maximal  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  heisse Ressourcen gezählt werden. Für die verschiedenen Systemtypen wird die nutzbare, geothermische Energie anhand von durchschnittlichen Entzugleistungen und Laufzeiten abgeschätzt. Durch den Vergleich der Resultate mit Oberflächendaten, wie

Siedlungsdichte, Industriegebiete oder Fernwärmenetze, können geeignete Standorte für zukünftige, geothermische Nutzung evaluiert werden.

3. **Erschliessbare Ressourcen mit bestehender Technologie:** Diese Klasse beinhaltet die tiefste Kategorie zur möglichen Stromproduktion (Enhanced Geothermal Systems, EGS), wobei eine weiterführende Kaskadennutzung angenommen wird. Insbesondere sollten hier Stimulationsmassnahmen mit bestehenden Technologien wie Hydrofrac oder Säuerung zur Anwendung kommen. Da ORC-Systeme aktuell ab etwa 100 °C sinnvoll eingesetzt werden können, stellt dies eine obere Begrenzung dar. Die untere Begrenzung ist durch den aktuellen Fortschritt in der Bohr- und Stimulationstechnologie gegeben, wobei sinnvollerweise eine Tiefe von maximal 5 km angenommen wird. Im betrachteten regionalen Massstab werden zwangsläufig Vereinfachungen nötig, die für lokale Untersuchungen genauer spezifiziert werden müssen. So wird für diese Ressourcenklasse eine hohe hydrogeologische Eignung (isotrope Permeabilität  $> \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ ) und ein möglicher Stimulationsfaktor  $= \frac{K_{\text{stim}}}{K}$  von "10" für Kristallin und "2.5" für Sedimentgestein angenommen.
4. **Erschliessbare Ressourcen bei voraussehbarer Technologieentwicklung:** Diese Klasse beinhaltet die Hochenthalpie-Nutzung, insbesondere zur Stromproduktion, bei möglichem Technologiefortschritt (Bohrtechnologie, Hybridsierung, Kalina-Technologie, etc.). So können verbesserte Stimulationsmassnahmen die Gesteinsdurchlässigkeiten weiter verbessern. Gedacht sind hier Stimulationsfaktoren von "100" für Kristallin und "10" für Sedimentgestein. Daher können selbst Gesteine mit mittlerer hydrogeologischer Eignung (Permeabilität  $> \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ ) für eine Nutzung in Frage kommen. Auch sollten zukünftig geringere Temperaturen zur Stromproduktion herangezogen werden können ( $T_{\text{min}} = 90 \text{ °C}$ ). Mittelfristig ist zudem eine Verbesserung der Bohrtechnologie zu erwarten (Bohrtiefe bis max. 7 km).
5. **Langfristig erschliessbare Ressourcen:** Gebiete, die mit voraussehbarer Technologieentwicklung noch nicht erschlossen werden können, aber potentiell interessant sind, werden in diese Klasse eingeteilt. Dies beinhaltet Tiefen bis 10 km sowie geringe hydrogeologische Eignung.

## 2.4 Datengrundlage

Während der ersten Projektphase wurden alle verfügbare Daten von Kanton, Bund und privaten Geologiebüros sowie aus wissenschaftlichen Publikationen (Andenmatten and Kohl, 2003) gesichtet und ausgewertet. Die nachfolgende Liste stellt die Datenquellen für die Nordostschweiz und den Raum Basel dar. Die jeweiligen Referenzen werden in den nachfolgenden Detailbeschreibungen zitiert.

### Geologie:

- Geologische Übersicht Nordostschweiz: Birkhäuser et al., 2001, Blaser et al., 1994, Diebold et al., 1991, Matter et al., 1987; Müller et al., 1984, Müller et al., 2001, Naef et al., 1985, Naef et al., 1995, NTB 85-10 (1985), NTB 87-15 (1986), NTB 85-10 (1988), NTB 88-08 (1989), NTB 88-09 (1990), NTB 88-10 (1991b), NTB 88-12 (1991a), NTB 00-01 (2001), Peters et al. (1986), Peters et al. (1989a), Peters et al. (1989b), Schmassmann et al. (1984), Thury et al. (1994).
- Geologische Übersicht Region Basel: Bitterli-Brunner (1988), Gürler et al. (1987), Hauber (1993)
- Bundesamt für Wasser und Geologie
- Baudepartement des Kantons Aargau
- AWEL, Amt für Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürich

### Temperaturdaten

- SGPK-Datensammlung "Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz" (Schärli and Kohl, 2002)

### **Petrophysikalische Daten**

- SGPK-Datensammlung
- Molassedatenbank (Leu et al., 1999)

### **Hydrogeologische Daten**

- Diverse Berichte (Referenzen siehe Kapitel 4)

## **3. Hydrogeologie der Nordschweiz**

### **3.1 Einleitung**

In dieser Arbeit werden 2 Regionen der Nordschweiz untersucht. Wie in Figur 1 dargestellt, ist dies zum einen die Nordostschweiz, eingeteilt in drei Untersuchungsgebiete, und die Region Basel. Für die Prospektion nach Erdwärme spielen neben der Temperatur insbesondere die hydrogeologischen Verhältnisse eine Rolle. Dabei sind vor allem Zonen mit hoher Durchlässigkeit interessant: Aquifere und Störungszonen. In den nachfolgenden Kapiteln werden kurz die relevanten, regionalen Aquifersysteme beschrieben. Die Charakterisierung der wichtigsten Störungszonen erfolgt anschliessend zusammen mit der Beschreibung der regionalen Geologie (Kapitel 4). Die beschriebenen hydrogeologischen und geologischen Bedingungen in den Untersuchungsgebieten werden dann in Kapitel 5 und 6 in die FE-Modelle integriert werden, die ihrerseits die Basis für die Modellierung der Temperaturverteilung bilden.

Die für die Bestimmung des Energieinhaltes relevante, hydrogeologische Grösse ist dabei die Transmissivität (siehe Kapitel 2.2). Die Transmissivität wird aus der hydraulischen Leitfähigkeit,  $K$  [ $m\ s^{-1}$ ], und der Mächtigkeit,  $\Delta z$  [m], eines Horizonts bestimmt:

$$T_r = K \cdot \Delta z \quad [m^2\ s^{-1}] \quad (4)$$

Aufgrund der Unsicherheit in der hydraulischen Leitfähigkeit und der Schichtmächtigkeit können Transmissivitäten um über eine Grössenordnung variieren. Der K-Wert wird durch hydraulische Pumptests bestimmt, dessen Dauer abhängig von der Durchlässigkeit im Untergrund ist (Je durchlässiger eine Schicht, desto kürzer die nötige Messzeit). Je nach Wahl des Testintervalls kann die Leitfähigkeit zudem durch eine Kluft dominiert sein und der so bestimmte K-Wert einer Formation wird stark variieren. Oftmals ist mit geschichteten Strukturen und daraus resultierenden anisotropen Leitfähigkeiten zu rechnen. Häufig ist auch die geohydraulisch obere und untere Grenze des Aquifers nicht gesichert. Es ist deshalb wichtig vorhandene Daten auf ihre Qualität zu überprüfen.

Aus verschiedenen Publikationen wurden Formationstransmissivitäten und hydraulische Leitfähigkeiten für die einzelnen, interessanten Aquifere zusammengetragen. Die bis dato vorhandenen Messdaten werden in den folgenden Kapiteln zusammengefasst und mit Literaturangaben verglichen. Eine abschliessende Beurteilung der hydrogeologischen Bedingungen in der Nordschweiz kann erst nach Sichtung der ausstehenden SEAG Daten erfolgen. Bei genügender Datengrundlage soll mit Hilfe statistischer Methoden die Wahrscheinlichkeit für die Fündigkeit hochpermeabler Zonen abgeschätzt werden.

### **3.2 Aquifere**

In der Nordschweiz gibt es vier Horizonte (siehe Figur 2 und Rybach, 1992), die eine allgemeine Verbreitung haben und deren relativ grosse Wasserführung nachgewiesen ist.

Es sind von unten nach oben:

- Kristallin und Permokarbon-Trog (inkl. Buntsandstein)
- Oberer Muschelkalk
- Oberstes Mesozoikum (Oberer Malm)
- Oberer Meeresmolasse (OMM)

Neben diesen Horizonten gibt es weitere Aquifere, die entweder nicht so weit verbreitet oder deren Wasserführung sehr unregelmässig ist. So kann auch lokal ein anderer Horizont eine relevante Wasserführung aufweisen. Die Aquifere in der Schweiz sind noch wenig erschlossen. Zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass die Porosität und die Durchlässigkeit generell sowohl mit der Tiefe als auch gegen den Alpenrand abnehmen (Keller, 1992). Dies ist hauptsächlich das Resultat von nach Norden gerichteten Alpenkompression, Überlagerung und Sedimentation. Man geht allgemein von starken Inhomogenitäten aus. Dies birgt Risiken bei der Exploration in sich, vor allem in grösseren Tiefen.

Daten über die hydrogeologischen Verhältnisse in der Nordschweiz sind in den Technischen Berichten der Nagra dokumentiert. Hier sind zahlreiche Daten aus geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen zusammengetragen und, soweit notwendig, zusätzlich ausgewertet worden. Zudem wurden in den Nagra-Bohrungen Tests zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeiten und Transmissivitäten, schwerpunktmässig im Kristallin, durchgeführt. In den übrigen Aquiferen wurde meist nur ein Test durchgeführt. Die angegebenen Werte entsprechen jeweils der Formationsleitfähigkeit im Testintervall. Die Qualität der Nagra-Daten kann generell als gut betrachtet werden.

Ausserdem gibt es weitere Publikationen, in denen hydraulische Leitfähigkeitswerte oder Transmissivitäten angegeben sind (siehe Tabelle 1 bis Tabelle 3). Die Qualität dieser Werte ist oft schwierig abzuschätzen, da die Rohdaten und die Auswertemethode zum Teil nicht bekannt sind. Die bisher zur Verfügung stehenden, freizugänglichen Daten werden hier aufgeführt.

Geologische Identifikation		Lithologie		Aquitard	Generelle Wasserführung/ Durchlässigkeit
		W	E	Aquifer	
QUARTÄR		K T M			bedeutender Aquifer lokal sehr geringdurchlässige Schichten
TERTIÄR	OSM				einzelne wasserführende Schichten (Schicht- und Kluftquellen)
	OMM				regionaler Aquifer
	USM	Eozän			einzelne wasserführende ? Schichten
MALM	oberer				regionaler Karst- und/oder Kluftaquifer
	mittlerer				geringe Durchlässigkeit lokaler Aquifer im westlichen Jura ("Rauracian")
	unterer		Effinger Schichten		
DOGGER	oberer				Parkinsoni-Schichten: geringe Durchlässigkeit Hr: lokaler Aquifer im westlichen Jura
	mittlerer		Hr Parkinsoni- Schichten Ws		
	unterer		Opalinus- ton		geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit
LIAS					geringe Durchlässigkeit, einzelne lokale Aquifere (St, Sh)
KEUPER			Ar St Sh		
			Gipskeuper		sehr geringe Durchlässigkeit
MUSCHEL- KALK	Oberer				sehr bedeutender regionaler Aquifer
	Mittlerer				generell sehr geringe Durchlässigkeit
	Unterer				
BUNTSANDSTEIN					regionaler Aquifer in Verbindung mit oberstem Kristallin/
PERMOKARBON					Permokarbon und Kristallin: wasserführende Zonen
KRISTALLIN					

K Schotter      M Moräne      Ws Wedelsandstein      St Stubensandstein  
T Seetone      Hr Hauptrogenstein      Ar Arietenkalk      Sh Schilfsandstein

Figur 2: Stratigraphische Abfolge in der Nordschweiz sowie Angaben zur Wasserführung in den einzelnen geologischen Schichten (nach Müller et al., 2001). Die Bedeutung des Oberen Malm im Schweizer Mittelland als Aquifer kann nur lokal bestätigt werden (siehe Kapitel 3.6).

### 3.3 Kristallines Grundgebirge und Permokarbon-Trog

Das kristalline Grundgebirge ist im obersten Teil stark zerklüftet und verwittert. Hier kann von einer hohen Durchlässigkeit in Klüften ausgegangen werden. Der verwitterte und geklüftete Bereich des Kristallins wird in allen Bohrungen nördlich des Troges angetroffen (Arbeitsgruppe Geothermik, 1988). Diese Verwitterungszone reicht lokal bis ~500 m unter die Oberkante (Schneider und Schlanke, 1986). Südlich des Troges wurde in Schafisheim nur eine relativ dünne Verwitterungsschicht im Kristallin festgestellt. In Weiach ist das Kristallin unter dem Permokarbon-Trog relativ unverwittert. Man nimmt an, dass das Kristallin unter dem Trog nicht oder nur kurz der Verwitterung ausgesetzt war. Kohl et al. (2003) zeigten jedoch, dass der gemessene Wärmefluss mit einem grossräumigen Fliessfeld erklärbar ist, sodass trotz der lokalen niedrigen Hydrotests Werte auch hier von einer höheren Verwitterung ausgegangen werden kann. Allgemein gültige Aussagen über die regionale Mächtigkeit dieser Zone sind bei der bestehenden Datenlage schwierig zu treffen.

Unterhalb der Verwitterungsschicht können einzelne durchlässige Klüfte oder Störungszonen das praktisch undurchlässige Gestein durchtrennen. Die Reichweite der Trennflächen kann schätzungsweise bis 500 m – 2000 m betragen (basierend auf Beobachtung im Rheingraben). Die Häufigkeit und Öffnungsweite dieser Trennflächen nimmt mit der Tiefe ab.

Das Kristallin wurde von der Nagra detailliert untersucht. 253 Messungen liegen in den Nagra-Bohrungen Böttstein, Kaisten, Leuggern, Weiach, und Schafisheim sowie in der Thermalbohrung Zurzach vor.

- In **Böttstein** ist die Durchlässigkeit generell sehr gering ( $K = 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ ), mit einzelnen Zonen höherer Leitfähigkeit von  $K = 10^{-8} - 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  (Nagra, 1985). Die mittlere Leitfähigkeit beträgt  $K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ .
- In **Kaisten** sind die hydraulischen Leitfähigkeiten sehr heterogen verteilt. Die Werte liegen zwischen  $K = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1} - 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ , in permeablen Zonen kann die Leitfähigkeit bis  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  sein (Nagra, 1991a). Rund die Hälfte der hydraulischen Tests ergab K-Werte von  $\sim 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ . Permeable Zonen werden bis in grosse Tiefe angetroffen. Es ergibt sich ein mittlerer K-Wert von  $K = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ . In Kaisten wird zudem die Eggberg-Störung durchfahren.
- In **Leuggern** ist die hydraulische Leitfähigkeit über weite Strecken  $< 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ . In einigen permeablen Zonen ergaben sich Werte bis  $10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  (Nagra, 1991b). Im Mittel ist die Leitfähigkeit  $K = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ .
- In **Schafisheim** ist das Kristallin im obersten und untersten Teil der Bohrung relativ stark ( $K = 10^{-6} \text{ m s}^{-1} - 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ ) und im mittleren Abschnitt sehr gering durchlässig ( $K < 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ ). Die mittlere Leitfähigkeit beträgt  $K = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$  (Nagra, 1992).
- Das Kristallin in **Weiach** ist generell eher gering durchlässig. Die Durchlässigkeit des kompakten Gesteins beträgt  $< 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  bei einer über die Bohrlochstrecke gemittelten Leitfähigkeit von  $K = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  (Nagra, 1989). Diese Werte stehen im Widerspruch zu den Temperaturmessungen (siehe Figur 8 und Kohl et al., 2003: Abweichung des Temperaturgradienten vom linearen Trend ab ~1500 m Tiefe) die ein stark advektiv geprägtes Temperaturfeld zeigen. In der Bohrung wurde ein unregelmässiges Netzwerk von zum Teil offenen Klüften angetroffen und die effektive Gesamttransmissivität scheint wesentlich durch diese Zonen erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit geprägt zu sein. So kann man davon ausgehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit mindestens partiell ähnlich jener der anderen Bohrungen ist.
- Die Bohrung **Zurzach** zeigt eine homogen hohe, mittlere hydraulische Leitfähigkeit von  $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  (NEFF, 1980). Dass das Temperaturfeld advektiv geprägt ist, wird durch den Temperaturverlauf in Figur 8 unterstützt.

Eine allgemein gültige Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit ist schwierig, da sich die Wasserführung im Kristallin auf zahlreiche direkte Wasserseintrittsstellen entlang offener Klüfte oder Störungszonen konzentriert. Entlang dieser Klüfte und im verwitterten, oberen Kristallin sind die Werte normalerweise erhöht. Die statistische Auswertung aller Messwerte zeigt, dass die K-Werte zwischen  $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  und  $4 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  schwanken, bei einem Mittelwert von  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ . Dieser Mittelwert wird vorerst in Kapitel 5.3 für die Abschätzung des geothermischen Potentials im Kristallin verwendet.

Weiter wird angenommen, dass zudem die Kluftstruktur gezielt stimuliert wird (Stimulationsfaktoren 10 im Kristallin) und so die Durchlässigkeit erhöht werden kann.

Eingelagert ins kristalline Grundgebirge ist eine permokarbonische Muldenfüllung, der sogenannte Permokarbon-Trog. Messwerte für den Permokarbon-Trog gibt es in den Nagra-Bohrungen Kaisten, Riniken und Weiach (Schneider und Schlanke, 1986). In der Perm-Formation konnten in den Bohrungen Riniken und Weiach mehrere Zonen mit Kluftwasserführung im oberen Teil lokalisiert werden, unterhalb des verwitterten Kristallin ist der Horizont eher gering durchlässig. In Kaisten konnte lediglich eine permeable Kluft lokalisiert werden. Aufgrund des Chemismus ist hier anzunehmen, dass das Wasser entlang von Klüften direkt aus dem Kristallin aufsteigt. Zusammengefasst kann von zwei verschiedenen Grundwasserfließwege ausgegangen werden (Schneider und Schlanke, 1986): Gering durchlässige Sandsteineinlagerungen ( $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ) und stark wasserführende Klüfte ( $10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ). Das Karbon wurde nur in Weiach erbohrt. Es konnte keine nennenswerte Leitfähigkeit nachgewiesen werden (Schneider und Schlanke, 1986). Dies lässt allerdings keinen Schluss über das gesamte Karbon zu. Gesamthaft ist der Permokarbon-Trog wohl eher schlecht durchlässig. Ein Indiz dafür ist auch die Temperaturverteilung im Untergrund (siehe Kapitel 5.2), die auf eine Drainage der Grundwasserströmung entlang der Trogränder hindeutet. Kohl et al. (2003) haben hier natürliche, vertikale Fließgeschwindigkeiten  $> 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  abgeschätzt. Im Rheingraben scheint das Permsediment (Untere Rotliegende) hingegen zumindest teilweise stark wasserführend (Knoeringue) zu sein (Gürler et al., 1987).

### 3.4 Buntsandstein

Der Buntsandstein bildet den tiefsten mesozoischen Aquifer und kann als gut- bis mitteldurchlässig bezeichnet werden. Dort wo er direkt auf dem Kristallin liegt, bildet er eine hydrogeologische Einheit mit der Verwitterungsschicht des Kristallins. Wegen seiner geringen Mächtigkeit (5 – 25 m), kann er im Regionalmodell für die nachfolgende Bestimmung des geothermischen Potentials nicht einzeln aufgelöst werden und wird dem oberen, verwitterten Kristallin zugeschlagen, was auch wegen der Verbindung der beiden Aquifere (siehe Figur 2) sinnvoll erscheint. Es bestehen hier relativ wenige hydraulische Leitfähigkeitsdaten.

### 3.5 Oberer Muschelkalk

Beim Oberen Muschelkalk handelt es sich um einen Aquifer, dessen Transmissivität von Porosität, aber auch Klüftigkeit, bestimmt ist. Als Aquifer kommen hauptsächlich der Trigonodusdolomit, Plattenkalk, Lumachellenkalk und der Trochitenkalk in Frage. Diese Formationen können aufgrund des hohen Zertrennungsgrades durch Schichtflächen und Klüften, welche zum Teil durch Verkarstung erweitert wurden, als gut bis sehr gut durchlässig beurteilt werden. Der Muschelkalk ist gegen oben und unten gut abgedichtet. Die geochemischen Untersuchungen zeigen, dass es keine Zirkulation zwischen dem Kristallin und dem Muschelkalk gibt (Schmassmann et al., 1984). Die Mächtigkeit ist relativ homogen, nimmt tendenziell nach Süden leicht zu (Müller et al., 2001). Sie liegt zwischen 40 m (Bohrung Leuggern) und 113 m (Bohrung Ruckfelden 1) und im Mittel bei  $\sim 70$  m. Der Muschelkalk wird in einer relativ geringen und deshalb ökonomisch leicht nutzbaren Tiefe angetroffen (Arbeitsgruppe Geothermik, 1988).

Bekanntestes Beispiel für die geothermische Nutzung des Oberen Muschelkalks ist die Anlagen Riehen, wo seit 1989 Erdwärme in grösserem Stil für die Beheizung von 160 Liegenschaften genutzt wird. Zudem entstammen alle Thermalquellen entlang der Jurahauptüberschiebung diesem Aquifer. Mehrere Bohrungen (Schinznach S2, Hausen, Müllingen, Birmensdorf BT3 und BT4) wurden hier mit dem Ziel abgeteuft, den Oberen Muschelkalk als potentiellen Thermalwasser-Aquifer an- und zu durchbohren. Zudem wurden in den Bohrungen Benken und Schafisheim mehrere Tests durchgeführt. Die Pumptests liefern je nach Zerklüftungsgrad des Oberen Muschelkalk unterschiedliche Werte. So variiert im Gebiet Schinznach Bad – Baden die Durchlässigkeit im Zusammenhang mit strukturellen Faktoren lateral stark und nimmt mit der Tiefe generell ab. In Schafisheim existiert zudem eine Überschiebungszone, unterhalb der der Muschelkalk praktisch undurchlässig ist. Generell kann festgehalten werden, dass hinsichtlich hydraulischer Leitfähigkeit regionale Veränderungen auftreten. So vermindert sich die hydraulische Leitfähigkeit von  $K=7 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  in Schinznach auf  $K=5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$  in Schafisheim (bzw. auf  $K=3 \cdot 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  unterhalb der Überschiebungszone). Dass das Temperaturfeld im Muschelkalk advektiv geprägt ist, zeigen auch die Temperaturprofile der Bohrungen Beznau, Birmensdorf, Ruckfelden und Zurzach. Hier weicht

der Temperaturgradient deutlich vom erwarteten linearen Trend ab (siehe Figur 8 und Kohl et al., 2003).

Tabelle 1 fasst die Transmissivität und hydraulische Leitfähigkeit zusammen. Der Mittelwert der hydraulischen Leitfähigkeiten liegt bei  $K = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  und ist wesentlich durch die hohen Leitfähigkeiten in Riehen und Schinznach bestimmt. Deshalb wird in Kapitel 5.3 für die Bestimmung des geothermischen Potentials im Oberen Muschelkalk der Median-Wert von  $K = 7 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  verwendet.

*Tabelle 1: Transmissivität und hydraulische Leitfähigkeit im Oberen Muschelkalk der Nordschweiz.*

Bohrung (Bohrtiefe)	Testintervall [m]	Transmissivität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	Hydr. Leitfähigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Referenz
Benken (820 m)	13.1	$6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	Müller et al. (2001)
Benken (845 m)	64.2	$6 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-8}$	
Birmenstorf BT3	40	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	NEFF (1980)
Birmenstorf BT4	108	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	AG Geothermik (1988)
Böttstein	85	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	Nagra (1985)
Hausen	130	$7 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$	AG Geothermik (1988)
Leuggern	12.52	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$	Nagra (1991b)
Müllingen	53	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	NEFF (1980)
Reinach	43.2	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$	Hauber (1993)
Riehen1	2	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	Hauber (1993)
Riehen2	9	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	Hauber (1993)
Riniken	78.7	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$	Nagra (1990)
Schafisheim (1249 m)	11	$6 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	Nagra (1992)
Schafisheim (1260 m)	65.2	$7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	
	Überschiebung			
Schafisheim (1337 m)	38.35	$1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-12}$	
Schinznach	67.5	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	NEFF (1980)
Weiach	74.1	$7 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	Nagra (1989)
ZurzachZ3	68	$4 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	NEFF (1980)

### 3.6 Oberer Malm

Der Obere Malm bildet die Basis des Molassebeckens. Es handelt sich dabei um eine Serie stark zerklüfteter und sehr karstanfälliger Kalkgesteine. Im bayrischen Malm ist eine starke Verkarstung vorhanden. Dort können grosse Fliessraten (bis  $100 \text{ l s}^{-1}$ ) teilweise artesisch gefördert werden. In der Schweiz zeigen die vorhandenen Messdaten eine bedeutend geringere Eignung des Oberen Malm. Allgemein wird angenommen, dass die verkarstungsbedingte Wegsamkeit der Grundwassersysteme örtlich stark durch Sedimentauffüllungen eingeschränkt sein kann (Keller, 1992). Ob der Obere Malm in der Schweiz wirklich als regional bedeutender Aquifer eingestuft werden kann, wie im süddeutschen Raum, ist deshalb fraglich. Zumindest lokal kann eine Wasserführung nachgewiesen werden, wie nachstehend für die Bohrungen Benken und Weiach beschrieben wird. Aufgrund dieses heterogenen Aufbaus ist mit einem erhöhten Risiko bei der möglichen Exploration zurechnen.

Die Mächtigkeit nimmt deutlich nach Osten zu, von 160 m in Bergöschingen bis 360 m in Kreuzlingen.

Zirkulation im Oberen Malm kann in den Temperaturprofilen von Benken (200-400 m Tiefe) und Weiach (200-500 m Tiefe) nachgewiesen werden (siehe Figur 8 und Kohl et al., 2003). Momentan stehen lediglich Messwerte aus diesen zwei Nagra-Bohrungen zur Verfügung. Häufig wird der Malm aufgrund seiner geringen hydrogeologischen Bedeutung nicht separat beprobt. Generell lässt sich wie im Oberen Muschelkalk eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit gegen Süden vermuten. Die gemessenen Transmissivitäten und hydraulischen Leitfähigkeiten sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die K-Werte unterscheiden sich um mehr als eine Grössenordnung. Aufgrund der dünnen Datenbasis wird im folgenden von einem Maximalwert ausgegangen, der dem von der Nagra geschätzten  $K=10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  entspricht. Die in Kapitel 5.3.4 gezeigten Abschätzungen stellen somit das maximale geothermische Potential dar.

Tabelle 2: Transmissivität und hydraulische Leitfähigkeit im Oberen Malm der Nordschweiz.

Bohrung	Testintervall [m]	Transmissivität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	Hydr. Leitfähigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Referenz
Benken	189.52	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$	Müller et al. (2001)
Weiach	24.1	$7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$	Nagra (1989)

### 3.7 Obere Meeresmolasse (OMM)

Die Obere Meeresmolasse (OMM) ist in erster Linie ein Porenquifer. Wasserführend sind vor allem die Sandsteine des Burdigalien sowie der basale Nagelfluh des Helvétien (Keller, 1992). Es gibt allgemein eine gute primäre Durchlässigkeit in horizontaler Richtung, in vertikaler Richtung ist die Heterogenität grösser und somit die hydraulische Durchlässigkeit variabler.

Die OMM-Mächtigkeit ist am Alpennordrand maximal ca. 1000 m und keilt gegen Norden aus. Eine maximale Mächtigkeit von 520 m wird in Küsnacht und minimale von 197 m in Kreuzlingen angetroffen. Im Faltenjura ist die OMM fast nicht vorhanden.

In der Nordostschweiz konnte in mehreren Bohrungen eine Wasserführung in der OMM nachgewiesen werden, die teilweise auch geothermisch genutzt werden. Im Gegensatz zu der im folgenden angenommenen Dublettennutzung sind dies aber in der Regel kostengünstigere Singlet-Systeme. fasst die bis dato bekannten Transmissivität und hydraulischen Leitfähigkeiten zusammen. Die höchste Transmissivität weist die Bohrung Kreuzlingen mit  $Tr=1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  auf und liegt damit im Wertebereich der Transmissivität in Süddeutschland (Nagra, 1988). Im Vergleich mit Kreuzlingen ist die Transmissivität in Fehraltdorf zwei Grössenordnungen ( $<1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). In den restlichen Bohrungen (Augwil, Basserdorf, Kloten, Tiefenbrunnen) sind die Werte relativ identisch, zwischen  $2 \cdot 10^{-5}$  und  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Die K-Werte liegen zwischen  $2 \cdot 10^{-7}$  und  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  bei einem Mittelwert von  $K=2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  (siehe Tabelle 3). Der Mittelwert ist von der Bohrung Kreuzlingen dominiert, deshalb wird für die Abschätzung des geothermischen Potentials in Kapitel 5.3 der Median-Wert von  $K=2 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  verwendet. Dies stimmt gut mit  $K=1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  überein, was von der Nagra (1988) für das nördliche Molassebecken angenommen wird.

*Tabelle 3: Transmissivität und hydraulische Leitfähigkeit in der Oberen Meeresmolasse der Nordostschweiz.*

Bohrung	Testintervall [m]	Transmissivität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	Hydr. Leitfähigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Referenz
Augwil	115	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	Büchi (1983)
Bassersdorf	283	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	Blaser et al. (1994)
Fehraltendorf		$<1 \cdot 10^{-6}$		Büchi (1983)
Kloten	257	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	Sieber Cassina & Partner (1992)
Kreuzlingen	10.8	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	Geoform (1995)
Tiefenbrunnen	250	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	Elektrowatt (1998)

## 4. Geologie der Nordschweiz

### 4.1 Nordostschweiz

Die tektonische Übersichtskarte, später in Figur 3, zeigt die Situation für die Untersuchungsgebiete der Nordostschweiz zwischen Alpennordrand im Südosten und Schwarzwaldmassiv im Nordwesten. Im Westen liegt das Modellgebiet im Tafel- und Faltenjura. Der Tafeljura keilt nach Nordosten in den süddeutschen Raum aus, wobei die Distanz zwischen Alpennordrand und Tafeljura kontinuierlich zunimmt und somit auch das Molassebecken breiter wird. Die Geologie dieses Gebietes ist in Müller et al. (2001) detailliert zusammengestellt und wird hier zusammengefasst. Das Gebiet kann lithologisch in drei unterschiedliche Regionen eingeteilt werden:

- **Paläozoischer Sockel und jungpaläozoische Sedimenttröge:** Der Sockel entspricht dem kristallinen Grundgebirge, wie zum Beispiel in Benken erbohrt, mit eingelagerten jungpaläozoischen Sedimenttrögen (Nordostschweizer Permokarbondrog, siehe Bohrung Weiach). Alle kristallinen Gesteine der Nordostschweizer Bohrungen (hauptsächlich Gneis, Granit) weisen teilweise intensive postmetamorphe Deformationen und mehrphasige hydrothermale Umwandlungen auf.

Der Nordostschweizer Permokarbondrog (Weiach-Trog) wurde erst während der umfangreichen Untersuchungen der Nagra entdeckt. Er wurde aufgrund seismischer Aufnahmen in der zentralen und östlichen Nordostschweiz vermutet und in den Bohrungen (Riniken, Weiach, Dingelsdorf) erbohrt. Dabei ist der zentrale Teil wahrscheinlich bis 6 km tief. Teilweise reichen die Trogschultern mit nur geringmächtigen Ablagerungen weit über diesen zentralen Bereich hinaus (Kaisten). Der Weiach-Trog hat die Form eines asymmetrischen Halbgrabens und wird im zentralen Bereich durch mehrere Störungszonen in WNW–ESE (Fig. 17 und 29 sowie Beilage 36-38 in Dieblod et al., 1991) durchfahren. Neben dem Weiach-Trog gibt es vermutete, aber nicht verifizierte Tröge (im Norden "Klettgau-Trog" sowie ein Trog südlich des Weiach-Troges).

- **Mesozoisches Deckgebirge:** Über dem Sockel folgen 700 – 800 m mächtige, über weite Gebiete relativ einheitlich aufgebaute mesozoische Sedimente, vorwiegend marine Karbonat- und Tongesteine mit evaporitischen Serien und Einschaltungen von terrigenen Schüttungen. Die Schichten sind im ganzen Gebiet schräg gestellt und fallen wenige Grad nach  $\pm$ SE unter die keilförmig mächtiger werdende Molasse ein.
- **Tertiäre Molasseablagerungen:** Bei den Molasseschichten handelt es sich um fein- bis grobklastische, mehrheitlich kontinentale Sedimente (Mergel, Sandstein, Konglomerate), die Erosionsprodukte der entstehenden Alpen darstellen. Die Schichten liegen leicht diskordant

über dem Mesozoikum und fallen ebenfalls gegen Südosten ein. Die Mächtigkeit nimmt von wenigen Dekameter am Nordrand bis auf über 3 km am Südrand des Molassebeckens zu (Müller et al., 2001). Die Neigung der Schichten nimmt nach oben hin zusehends ab, so dass die jüngeren Schichten, abgesehen von lokalen tektonischen Störungen, praktisch horizontal lagern.

Figur 2 zeigt die detaillierte stratigraphische Abfolge in diesen drei geologischen Einheiten.

## 4.2 Region Basel

Eine detaillierte Beschreibung der geologischen Situation im Raum Basel ist in Gürler et al. (1987) zu finden. Wie später in Figur 24 gezeigt wird, lässt sich die Region tektonisch in folgende Einheiten unterteilen:

- Rheingraben im Nordwesten
- Schwarzwaldmassiv im nördlichen Nordwesten
- Tafeljura im Nordwesten
- Faltenjura im Süden

Lithologisch ist der Schichtaufbau analog dem in der Nordostschweiz (siehe Figur 2). Jedoch fehlt zum Beispiel im Rheingraben die Obere Meeresmolasse. Wie in der Nordschweiz bildet das kristalline Grundgebirge die Unterlage der mesozoischen und tertiären Sedimente des Juras und des Rheingrabens. Der Rheingraben selber wird durch eine Reihe von Horst- und Graben-Strukturen gebildet und erstreckt sich von Mainz bis nach Basel. Im Tafeljura werden, wie in der Nordostschweiz, SW-NE streichende Permokarbon-Trögen vermutet. Dabei nimmt man an, dass die in der Bohrung Wintersingen angefahrenen Perm-Sedimente bereits den Weiach-Trog anzeigen.

## 4.3 Charakteristische Strukturelemente in den Untersuchungsgebieten

Wie bereits erwähnt kann das geothermische Potential auch durch Störungszonen nachhaltig beeinflusst werden. Hier ist mit grosser Klüftigkeit zu rechnen, deren Wasserwegsamkeit durch Stimulationsmassnahmen noch erhöht werden kann. An dieser Stelle soll kurz auf die relevanten Störungen in den Untersuchungsgebieten, die in der nachfolgenden Abschätzung des geothermischen Potentials (Kapitel 5.3) berücksichtigt werden, eingegangen werden.

Die Charakterisierung von Störungszonen bis in den kristallinen Untergrunde kann wegen der sedimentären Überdeckung nur unvollständig erfolgen. Zudem ist allgemein die Qualität der vorhandenen seismischen Daten im Untersuchungsgebiet für den kristallinen Untergrund eher schlecht (Mazurek, 1998). Ein schematisches Modell der wichtigen Störungen, basierend auf Geländeaufnahmen im Schwarzwald und auf Interpretationen von Bohrloch- und seismischen Daten, ist in Thury et al. (1994) gegeben. Die Strukturelemente werden dort in drei übergeordnete Gruppen eingeteilt werden:

- Herzynisch:  $\sim 110^\circ$  (WNW-ESE)
- Eggisch:  $\sim 150^\circ$  (NNW-SSE)
- Rhenisch:  $180^\circ$  (N-S), dominant im Rheingraben

Die Strukturen sind die Folgen der vom Schwarzwald ausgehenden Sockeltektonik und der ins Vorland ausgreifenden Dynamik der Alpen sowie der Entstehung des Rheingrabens. Aufgrund differentieller vertikaler Bewegungen teilen diese Störungen den Sockel in unterschiedliche Blöcke. Die Blöcke (rechtwinklige 5-15 km Blöcke) sind von einem Netz von internen Brüchen 2. Ordnung durchzogen. Diese Strukturen (Dykes und Veines) können in einem Modell regionalen Massstabes nicht berücksichtigt werden und müssen als Gesteinseigenschaft betrachtet werden. Die Hauptstrukturelemente sind:

- **Störungen 1. Ordnung:** NW-SE bis WNW-ESE streichende Verwerfungen (Herzynisches Streichen)

Diese Verwerfungen sind als östliche Ausläufer eines Verwerfungssystems zu betrachten, das den gesamten südöstlichen Schwarzwald und den Tafeljura dominiert.

- Zeininger-Bruchzone: Diese Grundgebirgsstörung entwickelte sich aus der N-S verlaufenden Wehratal-Verwerfung und ist das dominierende Strukturelement im Tafeljura (Gürlert et al., 1987). Die Aufsplitterung in ein eigentliches Bruchschollenfeld im südlichen Teil der Störung steht wahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit dem in der Nordostschweiz erbohrten Permokarbon-Trog.
- Eggberg-Störung (NW-SE): Es handelt sich um eine ehemals pre-variskische dextrale Scherzone, die im Tertiär und Quartär als Abschiebung (Versatz ~200 m) reaktiviert wurde (Thury et al., 1994). Die Störungen wird aus einem Set subparalleler Brüche gebildet, die an der Oberfläche kartiert sind und wahrscheinlich im Permokarbon-Trog enden. Ein Ast dieser Störungszone wird in der Bohrung Kaisten (1240 – 1265 m) beobachtet. Weitere sind im Profil 82-NF-10 sichtbar. Die gesamte Breite wird auf ca. 3 km geschätzt.
- Vorwald-Störung (NW-SE): Diese Störung verläuft parallel zur Eggberg-Störung. Sie wurde ebenfalls im Tertiär als Abschiebung (Versatz ~160 m) reaktiviert, reicht aber nicht bis ins Quartär (Thury et al., 1994). Die Störungszone hat eine Breite von ca. 100 m. Sie verläuft gegen Südosten an der Bohrung Böttstein vorbei und endet im Permokarbon-Trog. Sie ist sichtbar im Profil 82-NF-10.
- Zurzach-Störung (NW-SE): Auf der Isohypsenkarte "Basis Mesozoikum" im Diebold et al. (1991) wird im Bereich Zurzach eine parallel zur Vorwald- und Eggberg laufende Störung vermutet. Diese Störung ist an der Oberfläche nicht direkt kartiert. Man bringt aber das Thermalbad Zurzach, welches nachweislich Wasser aus dem Kristallin nutzt, mit dieser Störung in Verbindung. So haben bereits Thury et al. (1994) eine solche "Zurzacher Störungszone" in ihre hydrogeologischen Modellierungen integriert.
- Neuhauser-Störung (NW-SE bis WNW-ESE): Es handelt sich bei dieser Störung ebenfalls um eine Abschiebung. Der maximaler Versatz an der Basis Mesozoikum beträgt ~100 m und nur noch einige Dekameter an der Basis Quartär. Die Störung wird aus verschiedenen Störungen unterschiedlicher Richtung gebildet (Vergleiche seismische Linien 91-NO-75, 91-NO-77, 91-NO-79, 91-NO-72, 91-NO-73). Sie lässt sich westlich von Randen nach Süden bis nach Neuhausen verfolgen. Ab dort verläuft die Störung im Untergrund und endet möglicherweise ebenfalls im Permokarbon-Trog.
- Randen-Störung: Diese Verwerfungszone wird sowohl an der Oberfläche kartierte wie auch in verschiedenen seismischen Profilen (Müller et al., 2001) erkannt. Es handelt sich nicht um eine einzelne zusammenhängende Störung, sondern zumindest im Bereich des nördlichen Randens um eine Vielzahl stark unterschiedlich streichender Elemente. Gegen NW scheint sie eine zusammenhängende Einzelstörung zu sein. Es wird angenommen, dass sich die Randenstörung zusammen mit weiteren aus dem Sockel aufsteigenden Verwerfungen gegen oben zunehmend verästeln und zusammen bis zu einigen hundert Meter breite Störungszonen bilden. Südlich von Thayngen ist die Randenstörung unter Quartärsedimenten bedeckt und ihr Verlauf deshalb nicht bekannt. Ein nördlicher Ast setzt sich nach SE und ein südlicher Ast verläuft zwischen Diessenhofen und Stein am Rhein und dürfte dort auskeilen (Müller et al., 2001: Beilage, 4.1-4.4 und 2.3).
- **Randstörungen des Permokarbon-Troges (Weiach-Trog):** WSW – ENE bis W-E streichende Störungen  
Nord- und der Südrand des Permokarbon-Troges wurden von mehreren Bewegungen erfasst und stark zerklüftet. Im Westen geben drei Profile guter Qualität (82-NF-10, 83-NF-15, 83-NF-31/82-NF-30) einen Überblick über den Verlauf des Permokarbon-Troges. Im Osten gibt es nur eine gute seismische Linie (82-NX-60). Das Randbruchzonensystem des Permokarbon-Troges begünstigt das Aufsteigen von Tiefengrundwässern (Thury et al., 1994). Es existieren wahrscheinlich weitere solche Randstörungen in Zusammenhang mit dem vermuteten Klettgau-Trog und im nicht erforschten kristallinen Sockel südlich des Weiach-Troges.

1. Nördliche tektonische Zone des Weiach-Troges: Entlang dieser Zone ist das Kristallin über mehrere Kilometer versetzt, Die Rafz-Marthalen-Flexur in der Sedimentdecke steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit den nördlichen Randstörungen.
2. Südliche tektonische Zone des Weiach -Troges: Für die Südliche Randzone fehlen gegen Osten Daten. Das Baden-Irchel-Herdern-Lineament bildet wahrscheinlich die Fortsetzung dieser Randstörungen in der sedimentären Deckschicht.

- **Randstörungen des Rheingrabens:**

Der Rheingraben ist gegen Süden und Osten von Grabenrandstörungen begleitet. Diese sind nachweislich mit geothermischer Nutzung verbunden (z.B. Fernwärmenetz Riehen).

## **5. Untersuchung Region Nordostschweiz**

### **5.1 Geologische Datengrundlage**

Grundlage für eine Temperaturmodellierung bildet das geologische Modell eines Gebietes. Allgemein werden ausgehend von Bohrlochdaten und geologischen Profilen geologische Modelle mit dem Programm *GOCAD* erstellt und dann in Finite Elemente (FE) Modelle umgewandelt. Eine detaillierte Beschreibung für das Vorgehen bei der geologischen Modellierung ist in Andenmatten und Kohl (2003) zu finden.

Der Aufbau des geologischen Modells für die Nordostschweiz beruht einerseits auf geologischen Bohrprofilen aus 56 Bohrungen (siehe Tabelle 9 bis Tabelle 12 im Anhang) und andererseits auf 37 interpretierten, seismischen Profilen aus der Messkampagne der Nagra (siehe Tabelle 13 im Anhang). Die Lokation der Bohrungen und Profile ist in Figur 3 dargestellt. Es wurden Flächen für die geothermisch interessanten Horizonte "Top Kristallin" (siehe Figur 11), "Top Oberer Muschelkalk" (siehe Figur 14), "Top Oberer Malm" (siehe Figur 17) und "Top Oberer Meeresmolasse" (Figur 20) erstellt. Tabelle 9 bis Tabelle 12 im Anhang listen auf, welche Bohrungen welche Horizonte durchfahren. Zusätzlich wurde der Verlauf der in Kapitel 4.3 erwähnten Störungszonen integriert. Das entstandene geologische Modell ist als provisorisch zu betrachten. Es wird 2005 mit Experten (Henry Naef, Büro für angewandte Geologie & Kartografie; Walter Müller, Nagra) besprochen und aktualisiert.

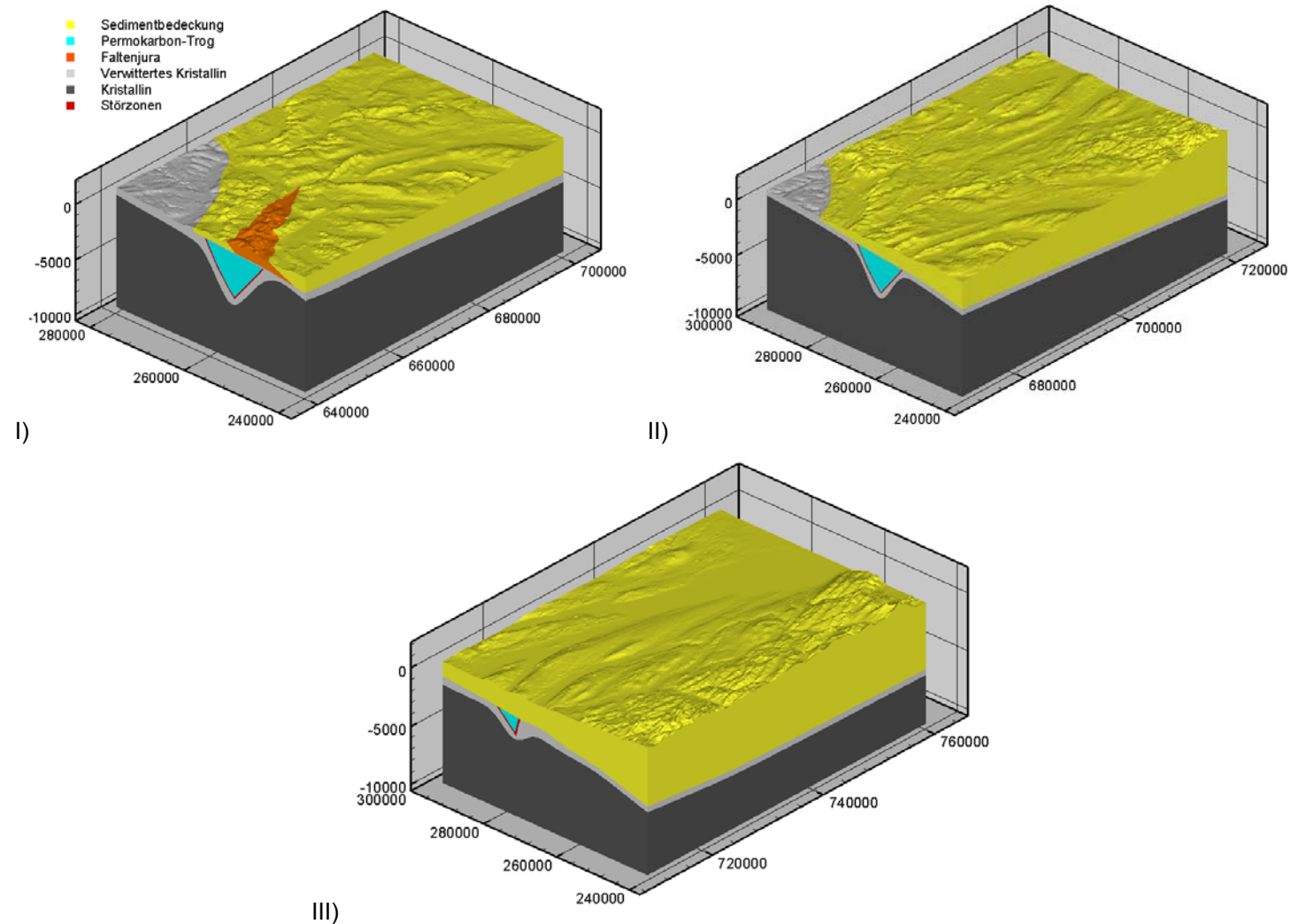
Aufgrund der Ausdehnung muss das Untersuchungsgebiet für die Umwandlung in das FE-Modell für die Temperaturmodellierung in 3 Teile "Nordostschweiz I bis III" unterteilt werden (siehe Figur 3). Zudem musste auch die Geologie - verglichen mit den 2003 erarbeiteten, detaillierten Lokalmodellen – gröber eingeteilt und diskretisiert werden. Folgende Einteilung wurde dabei vorgenommen:

- Sedimentäre Deckschichten mit Oberer Meeresmolasse, Oberem Malm und Oberem Muschelkalk
- Sedimente des Permokarbon-Troges
- Trog-Randstörungen
- Verwittertes Kristallin
- Kristallines Basement

Ebenso vernachlässigt werden die Störungszonen. Die anschliessende Bestimmung des geothermischen Potentials berücksichtigt aber wieder alle geologischen Schichten und Störungszonen. Dabei wird die Temperaturverteilung aus dem Grobmodell auf die jeweiligen Strukturen interpoliert.

In Figur 4 sind die drei geologische Modelle "Nordostschweiz I bis III" als FE-Modelle dargestellt. Sie umfassen Gebiete von 40 x 60 km (Nordostschweiz I) und zweimal 50 x 56 km (Nordostschweiz II und III). Die Modelltiefe liegt jeweils bei -10000 m ü.M.. Bei den nachfolgenden Modellierungen der Temperaturverteilung und der Abschätzung des geothermischen Potentials werden die Resultate der einzelnen Untersuchungsgebiete wieder zusammengestellt.



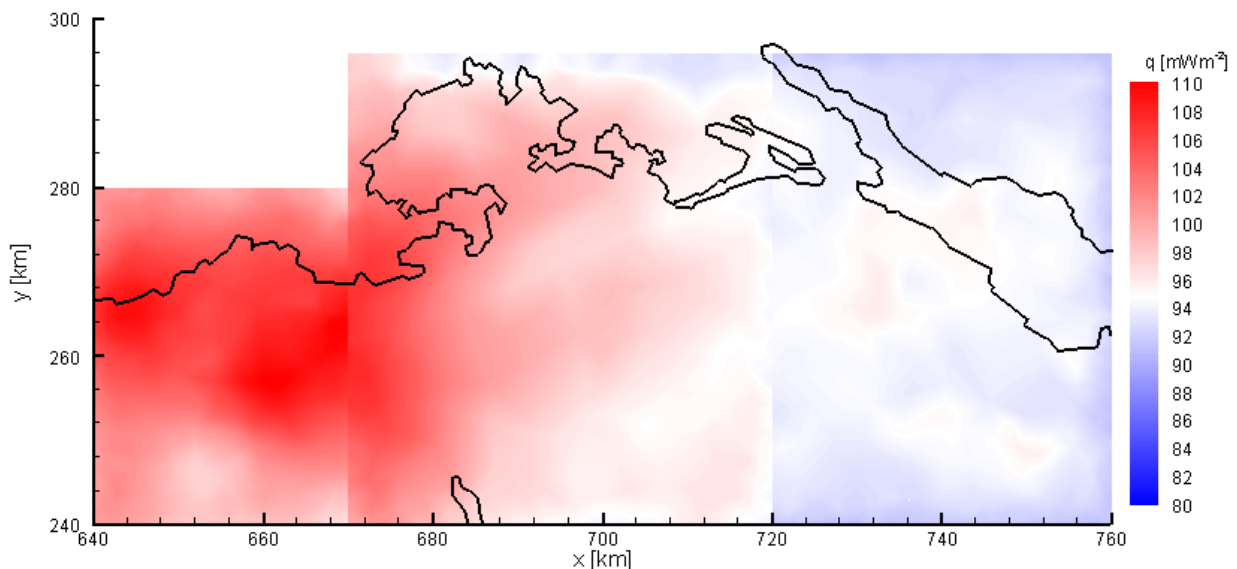


Figur 4: Geologische Modelle für die Untersuchungsgebiete Nordostschweiz I - III. Die Figur zeigt die Topographie, die Sedimentschichten, das kristalline Grundgebirge (verwittert und unverwittert) und der Permokarbon-Trog mit den nördlichen und südlichen Störzonen. Zudem ist im Modell Nordostschweiz I der auskeilende Faltenjura dargestellt (vergleiche auch Figur 3).

## 5.2 Simulation der Temperaturverteilung

Die Temperaturverteilung im Untergrund der Nordostschweiz wird mit den in Figur 4 dargestellten FE-Modellen simuliert. Für die Temperaturberechnung wurden die Oberflächentemperatur als obere und der basale Wärmefluss (Figur 5) als untere Randbedingung ins FE-Modell gesetzt. Die aus der Anpassung der gemessenen Temperaturdaten resultierende Wärmeflussverteilung zeigt variierende Werte zwischen 110 – 80  $\text{mW m}^{-2}$ .

Grundlage der Modelle sind dieselben petrophysikalischen Daten, die in auch in den 2003 durchgeführten Untersuchungen an Lokalmodellen (Andenmatten und Kohl, 2003) verwendet wurden. Allerdings musste für die jetzigen Regionalmodelle eine Homogenisierung der Parameter vorgenommen werden, um eine regionale Anpassung an die gemessenen Temperaturdaten zu erreichen. Wie für die früher berechneten Lokalmodelle werden in einem ersten Schritt auch für die Regionalmodelle vereinfachte, einheitliche, thermische Materialparameter für jede Schichtstruktur angenommen. Diese basieren hauptsächlich auf den Messungen in den Nagra-Bohrungen Benken, Böttstein, Kaisten, Leuggern, Lindau, Riniken und Weiach. Für Störungszonen sind keine Angaben vorhanden, hier wird eine Abschätzung vorgenommen. Für die Wärmekapazität wird ein einheitlicher Wert ( $2.2 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ ) angenommen. Tabelle 4 fasst die mittleren thermischen Modellparameter zusammen. Diese Modellparameter, die die Basis für die numerischen Modellierungen des Temperaturfeldes mit *FRACTure* bilden, weichen bis  $\sim 10\%$  von den gemessenen Mittelwerten ab. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die einzelnen petrophysikalischen Messungen insbesondere im Kristallin bis zu 20% vom Mittel der Messwerte abweichen können. Auf regionalem Massstab wird eine Anpassung nicht mit derselben Qualität wie bei den Lokalmodellen möglich sein. Wegen der geringen Datendichte wurde zudem nicht mit einer Temperatur- und Druckabhängigkeit der Parameter gerechnet. Die gleichen Modellparameter werden auch für die thermische Modellierung "Region Basel" in Kapitel 6.2 verwendet. Im Rahmen einer Revision des thermischen Modells wird 2005 eine komplexere, petrophysikalische Parameterverteilung berücksichtigt, was zu leicht modifizierten Anpassungen führen wird.



Figur 5: Basaler Wärmefluss in 10 km Tiefe, basierend auf den Lokalmodellen aus der 2003 durchgeführten Arbeit (Andenmatten und Kohl, 2003). Die Modelle Nordschweiz I, II und III sind zusammen dargestellt.

*Tabelle 4: Thermische Modellparameter (Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion)*

	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeproduktion
Sedimentbedeckung	$2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$0.5 \mu\text{Wm}^{-3}$
Permokarbon-Trog	$2.9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.5 \mu\text{Wm}^{-3}$
Verwittertes Kristallin	$3.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.8 \mu\text{Wm}^{-3}$
Kristallines Grundgebirge	$3.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$3.2 \mu\text{Wm}^{-3}$
Störungszonen	$2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$0.5 \mu\text{Wm}^{-3}$

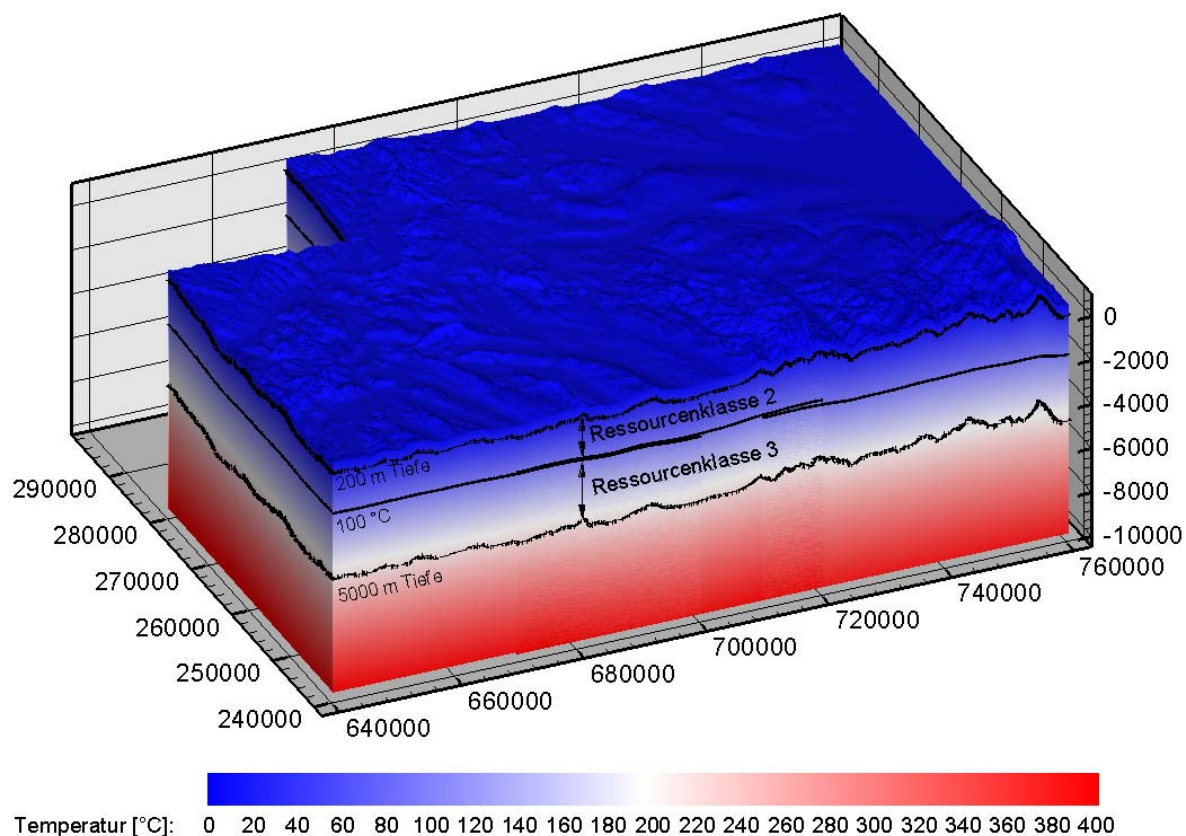
Die simulierte Temperaturverteilung ist in Figur 6 für alle drei Modelle "Nordostschweiz I bis III" dargestellt. Die Temperatur steigt von minimal  $\sim 5^\circ\text{C}$  an der Erdoberfläche bis auf gegen  $400^\circ\text{C}$  in 10 km Tiefe an. Schematisch eingetragen sind zudem die Volumina der Ressourcenklassen 2 und 3, mit Angabe zu Tiefen- und Temperaturbereichen, wie in Kapitel 2.3 definiert.

Das Untersuchungsgebiet ist charakterisiert durch ein regelmässiges Temperaturfeld mit einer signifikanten Wärmeflussanomalie entlang des Permokarbontrogs. Diese Anomalie zeigt sich in einer Darstellung des Tiefenwärmeflusses für das Modell Nordostschweiz I in Figur 7. Dieser geht von oberflächennahen topographiebedingten Variationen in eine NE-SW verlaufende Struktur über, die auf den Permokarbontrug zurückzuführen ist. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Datendichte im Süden der Modelle sehr gering ist. Vermutlich ist diese Anomalie auf die Existenz von Tiefenwässern zurückzuführen, die insbesondere entlang des nördlichen Trograndes aufsteigen (siehe Kapitel 3.3). Indizien dafür sind

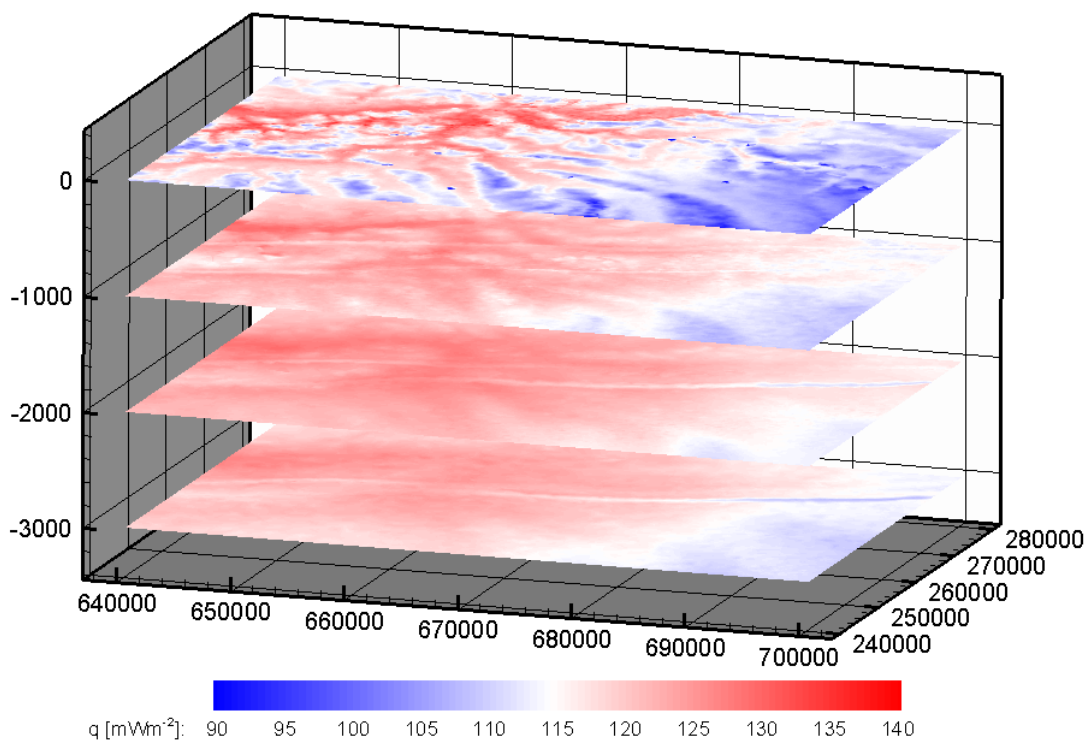
- Charakteristische Abnahme des geothermischen Gradienten mit der Tiefe (z.B. Weiach unterhalb 2 km)
- Thermalwasseraustritte (z.B. Zurzach)

In der publizierten Literatur wird auf die Bedeutung von Fluidströmung hingewiesen. Rybach et al (1987) schlagen folgendes Modell für die Entstehung der Anomalie vor. Aus grossen Tiefen steigt Wasser entlang von tiefreichenden, tektonischen Störungen im Kristallin auf. Das aufsteigende Wasser wird dann entlang der Trogränder drainiert. Von da tritt das Wasser seitlich in die verwitterten, obersten Schichten des Kristallins ein, von wo es im Norden gegen den Rhein entwässert wird und im Süden entlang der Jura-Hauptüberschiebung (Baden - Schinznach - Lostorf) austritt. In verschiedenen Arbeiten wird auf differentielle tektonische Bewegungen in diesem Gebiet hingewiesen (Schneider und Schlanke, 1986, Clauss, 1987), was ein Indiz für solche tiefreichende Störungen sein könnte.

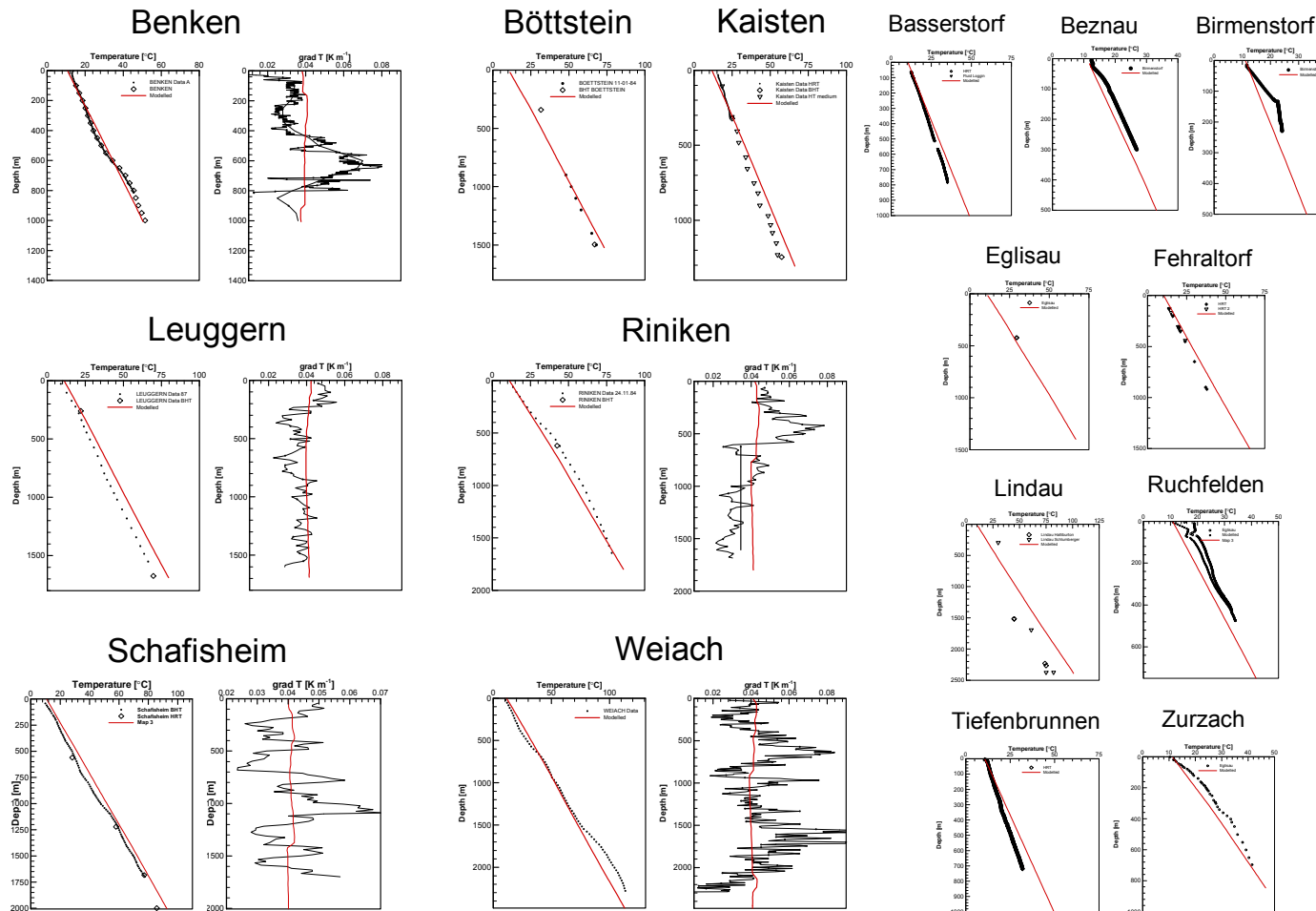
Die Figur 8 bis 12 zeigen die Anpassung der Regionalmodelle Nordostschweiz I bis III an die vorhandenen Temperaturdaten (Lokation der Bohrungen siehe Figur 3). Herkunft und Qualität der Daten wurde detailliert in Andenmatten und Kohl (2003) beschrieben. Allgemein werden die Messungen gut von der simulierten, regionalen Temperaturverteilung wiedergegeben, was der Vergleich mit dem Wärmefluss entlang der Bohrungen unterstreicht. Die bestehenden Unterschiede im Temperaturverlauf sind auf die heterogene Verteilung der thermischen Parameter in den einzelnen Schichten zurückzuführen. Um das Temperaturfeld feiner anzupassen, wurde deshalb bereits die bestehende Software *GeoProductivity* so verbessert, dass die thermischen Eigenschaften aufgrund der vorhandenen Messwerte in Bohrungen räumlich interpoliert werden können. Eine leicht modifizierte Anpassung wird 2005 erfolgen.



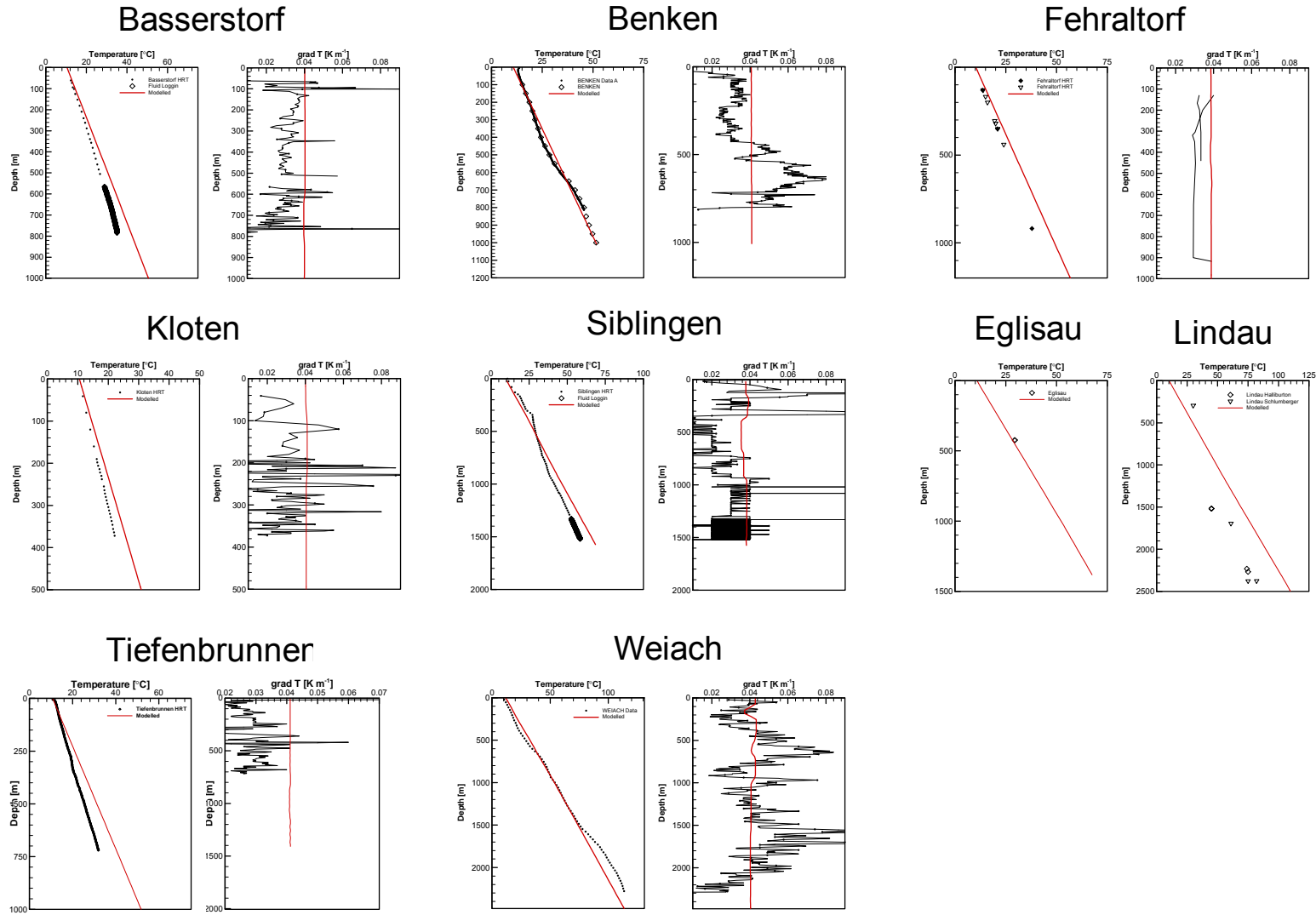
Figur 6: Provisorische Temperaturverteilung im Untergrund der Nordostschweiz. Die Modelle "Nordostschweiz I bis III" sind zusammen dargestellt. Zudem sind die Volumina der Ressourcenklassen 2 und 3 schematisch eingetragen (Definition siehe Kapitel 2.3).



Figur 7: Wärmeflussanomalie in der Nordostschweiz, dargestellt für das Teilmodell "Nordostschweiz I".

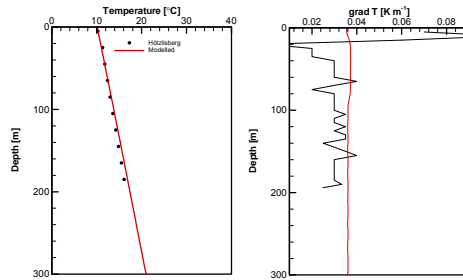


Figur 8: Provisorische Anpassung der Temperaturdaten durch das Regionalmodell "Nordostschweiz I". Die durchgezogenen, roten Linien zeigen die Modellergebnisse, die Messdaten sind durch schwarze Punkte/Linien dargestellt. Für die tiefreichenden Nagra-Bohrungen sind zudem die Temperaturgradienten angegeben. Die thermischen Parameter in einer geologischen Schicht sind als homogen angenommen, dadurch ist keine Anpassung der Daten mit derselben Qualität wie bei den Lokalmodellen aus der Arbeit von 2003 möglich (Andenmatten und Kohl, 2003). In Zukunft wird durch lokal angepasste thermische Parameter eine modifizierte Anpassung vorgenommen.

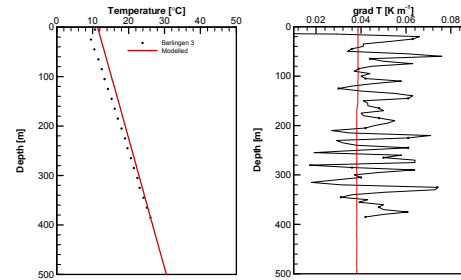


Figur 9: Provisorische Anpassung der Temperaturdaten durch das Regionalmodell "Nordostschweiz II". Die Darstellung entspricht derjenigen in Figur 8.

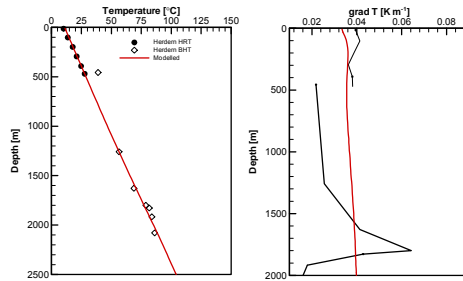
### Berlingen 2



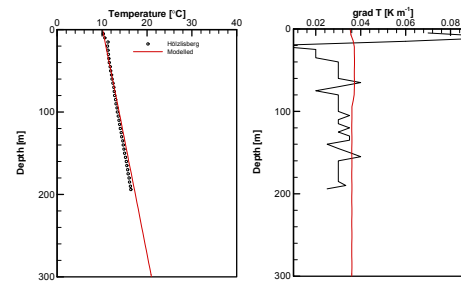
### Berlingen 3



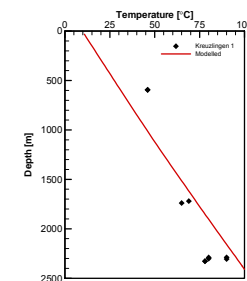
### Herdern



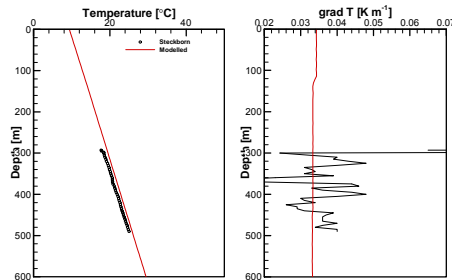
### Höslisberg



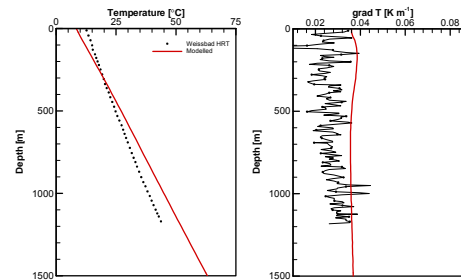
### Kreuzlingen



### Steckborn



### Weissbad



Figur 10: Provisorische Anpassung der Temperaturdaten durch das Regionalmodell "Nordostschweiz III". Die Darstellung entspricht derjenigen von Figur 8. In der Interpretation sind zudem hier nicht veröffentlichte Datensätze enthalten.

## 5.3 Berechnung des geothermischen Potentials

In diesem Kapitel wird das geothermische Potential im Untergrund der Nordostschweiz abgeschätzt. Als erstes wird für die Ressourcenklassen 2 und 3 die verfügbare Energie,  $E_{HIP}$ , berechnet (Gleichung 1 in Kapitel 2.2). Dies entspricht der Energie, die in der Gesteinsmasse gespeichert ist. Effektiv nutzbar ist jedoch nur die Energie ( $E_{ut}$ ), die über ein Entzugsmedium auch entzogen werden kann. Dazu werden je nach Tiefenbereich verschiedene Technologien (siehe Definition der Ressourcenklassen in Kapitel 2.3) eingesetzt. Das können sowohl geschlossene (Erdwärmesonden) wie offene Systeme (Grundwasser-Wärmepumpen, EGS-Technologie) sein. Bei offenen Systemen wird in der Regel die vorkommende Klüftigkeit durch geeignete Massnahmen stimuliert und so der natürliche Wärmetauscher künstlich erweitert. Die effektiv nutzbare Energie ist so wesentlich von der hydraulischen Transmissivität (Gleichung 4) und der Stimulierbarkeit des Untergrundes abhängig. Dies wird für die typischen Nutzhorizonte der Nordostschweiz nachfolgend illustriert. Dafür werden für spezifische Horizonte die berechnete Temperatur aus dem simulierten Temperaturfeld in Figur 6 extrahiert, die jeweiligen hydrogeologischen Befunde übertragen und vereinfacht dargestellt (isotrope hydraulische Leitfähigkeitswerte, s. Kapitel 3, konstante Schichtmächtigkeiten). 2005 wird hier eine modifizierte Berechnung mit der aus dem 3D geologischen Modell entnommenen Schichtmächtigkeit vorgenommen. Aus den obengenannten Angaben lassen sich flächenhaft für gegebene Anlagengrößen die thermische Leistung (Gleichung 2) und die nutzbare Energie (Gleichung 3) für ein Dubletten-System mit einer Injektions- und einer Förderbohrung bestimmen. In allen unseren Berechnungen wird von einer Reinjektionstemperatur von 15 °C und einer konstanten Produktionstemperatur während der Betriebszeit von 30 Jahren ausgegangen. Das heisst, es wird eine optimale geothermische Ausnutzung (Kaskadennutzung) vorausgesetzt. Ebenfalls wurde eine minimale Distanz der Bohrungen von 200 m angenommen, was teilweise zu einer Unterschätzung der Fließrate und dadurch auch der Nutzenergie führt.

Das Verhältnis zwischen verfügbarer ( $E_{HIP}$ ) und nutzbarer Energie ( $E_{ut}$ ) wird als Gewinnungsfaktor,  $R$ , bezeichnet (Gleichung 5). Nachfolgende Berechnungen gehen von einem gut stimulierten Untergrund aus, in dem das Entzugsmedium ideal zirkulieren kann. Unsere Annahmen über die Anlagengeometrie führen zu einem maximal möglichen Gewinnungsfaktor  $R$  von ~5 %. In hydrogeologisch ungünstigen Verhältnissen sinkt dieser Wert bis auf "0".

### 5.3.1 Verfügbare Energie in den Ressourcenklassen 2 und 3

Die Klasse 2 beinhaltet die geothermische Nutzung ab einer Bohrtiefe von 200 m bis maximal 100 °C Gesteinstemperatur, die Klasse 3 jene Nutzung ab 100 °C bis in eine maximale Bohrtiefe von 5 km. Die Untergrundvolumina sind in Figur 6 dargestellt.

Im Volumen der **Ressourcenklasse 2** von rund 12'500 km<sup>3</sup> herrscht eine mittlere Temperatur von 64 °C. Die total verfügbare Energie beträgt gemäss Gleichung (1) rund 1'300 EJ, was ~100 PJ pro km<sup>3</sup> Gestein entspricht.

Das Gesteinsvolumen der **Ressourcenklasse 3** (~42'500 km<sup>3</sup>) ist im Mittel 155 °C heiss. Daraus ergibt sich eine total verfügbare Energie von rund 13'00 EJ, bzw. ~300 PJ pro km<sup>3</sup> Gestein.

Die verfügbare Energie entspricht jedoch nicht der effektiv nutzbaren Energie,  $E_{ut}$ , auf die nachfolgend eingegangen.

### 5.3.2 Nutzbare Energie "Top Kristallin"

Aus den hydrogeologischen Betrachtungen scheint das Kristallin zumindest in den obersten ~500 m stark verwittert zu sein und wird daher hier erhöhte Transmissivitäten besitzen. Das tieferliegende Kristallin ist bislang zu wenig erforscht, um konkrete hydrogeologische Abschätzungen zu machen. Für diese obere Verwitterungsschicht werden anhand der struktureologischen (Kapitel 4.1) und hydrogeologischen (Kapitel 3.3) Situation Zonen unterschiedlicher Durchlässigkeit bestimmt. Prinzipiell können drei unterschiedliche Kristallinbereiche angenommen werden:

- a) unterhalb der mesozoischen Schichten (belegt durch Bohrungen Böttstein, Leuggern, Kaisten, Schafisheim und Zurzach),
- b) unterhalb des Permokarbondrogs (belegt durch Bohrung Weiach) und
- c) Störungszonen mit erhöhter Durchlässigkeit (belegt durch Bohrungen Böttstein, Kaisten und Zurzach) und Trograndstörungen des Permokarbondrogs.

Erstere zeigen in der Regel eine starke Zerklüftung und können aufgrund der vorhandenen, experimentellen Werte sicherlich als potentiell geeignet für geothermische Nutzung betrachtet werden. Die Bohrung Weiach zeigt für das Kristallin unter dem Permokarbondrog widersprüchliche Charakteristiken: Einerseits wird sie als relativ unverwittert angesehen (Schneider und Schlanke, 1986, und Kapitel 3.3), andererseits zeigt sie gerade im Kristallinabschnitt einen stark advektiv dominierten Wärmefluss (Kohl et al., 2003), welcher auf eine grossräumig erhöhte Durchlässigkeit deutet. Da diese Beobachtung durch das Antreffen von wasserführenden Störungssystemen gestützt wird, kann man davon ausgehen, dass zumindest partiell auch dieser Bereich ähnliche hydraulische Charakteristiken besitzt wie die anderen Kristallinschichten. Deshalb wird für die Abschätzung des geothermischen Potentials im Kristallin unter dem Permokarbon-Trog der selbe K-Wert wie für das restliche Kristallin angetroffen. Störungszonen sind in den Bohrungen Böttstein, Kaisten und Zurzach angefahren worden. In der Regel bestehen Störungszonen nicht aus einer einzelnen Bruchfläche, sondern aus einer Schar von Einzelklüften, die sich über einen bestimmten Bereich verteilen, deren genauer Verlauf oft nur unzureichend bekannt ist. In unseren Betrachtungen wird für jede Störungzone von einer Mächtigkeit von 500 m ausgegangen, wie auch von Thury et al. (1994) für ihre hydrogeologischen Modellierung angenommen. Die Randstörungen des Permokarbondrogs werden gleich wie die Störungszonen behandelt.

Aus den einzelnen Messwerten und aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen werden Werte für die mittlere hydraulische Leitfähigkeit  $K$  abgeschätzt (siehe Kapitel 3.3):  $K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  für das verwitterte Kristallin unterhalb der mesozoischen Schichten und des Permokarbon-Trogs und  $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  für die Störungszonen und Trograndstörungen (Mittelwert der Bohrungen Böttstein, Kaisten und Zurzach).

Figur 12 zeigt die mittlere Temperatur des verwitterten Kristallins in den obersten 500 m. Die Temperatur nimmt generell mit der Tiefenlage von  $10^\circ\text{C}$  im Nordwesten auf gegen  $240^\circ\text{C}$  im Südosten und in den tiefliegenden Gebieten unter dem Permokarbon-Trog zu. Aus dieser Temperaturverteilung und den Angaben über hydrogeologische Bedingungen kann nun die nutzbare Energie und geothermische Leistung bestimmt werden (siehe Kapitel 2.2). Dabei werden eine Anlagengeometrie und ein Reservoirvolumen gemäss Tabelle 5 definiert über 30 Jahren betrieben. Zudem wird angenommen, dass die hydraulische Leitfähigkeit im Untergrund durch Stimulationsmassnahmen um einen Faktor 10 erhöht werden kann. Dies entspricht dem Erfahrungswert aus Soultz-sous-Forêts (Frankreich).

Figur 13 zeigt die geschätzte mittlere, geothermische Leistung im Top Kristallin. Es lassen sich zwei unterschiedliche Phänomene erkennen: 1) die Leistung nimmt generell mit der Tiefe (höhere Temperatur) zu, 2) die Leistung nimmt mit der Durchlässigkeit (Störungszonen) zu. Unter den gegebenen Modellannahmen würde die geschätzte Leistung von wenigen  $\text{MW}_{\text{th}}$  im Nordwesten auf über  $200 \text{ MW}_{\text{th}}$  unterhalb des Permokarbon-Trogs ( $< -4000 \text{ m.ü.M.}$ ) und im tiefsten Bereich des Kristallins im Südosten ansteigen. Relativ hohe Leistungen von  $\sim 100 \text{ MW}_{\text{th}}$  wären aber auch in geringerer Tiefe entlang der Störungszonen im Nordwesten und entlang der Trograndstörungen wahrscheinlich. Basierend auf der Temperaturverteilung lässt sich die total verfügbare Energie  $E_{\text{HIP}}$  in allen 3 Modellen der Nordostschweiz auf  $\sim 750'000 \text{ PJ}$  schätzen. Die effektiv nutzbare Energie  $E_{\text{ut}}$  ist aber generell deutlich kleiner. Wird das Untersuchungsgebiet mit Anlagen gemäss Tabelle 5 abgedeckt, könnte über 30 Jahre im Mittel eine Nutzenergie  $E_{\text{ut}}$  von  $\sim 40'000 \text{ PJ}$  gefördert werden,

wobei in der Regel ein Gewinnungsfaktor R von 5.2% erreicht wird. Bezogen auf 1 km<sup>3</sup> Gestein wären dies im Mittel ~12 PJ.

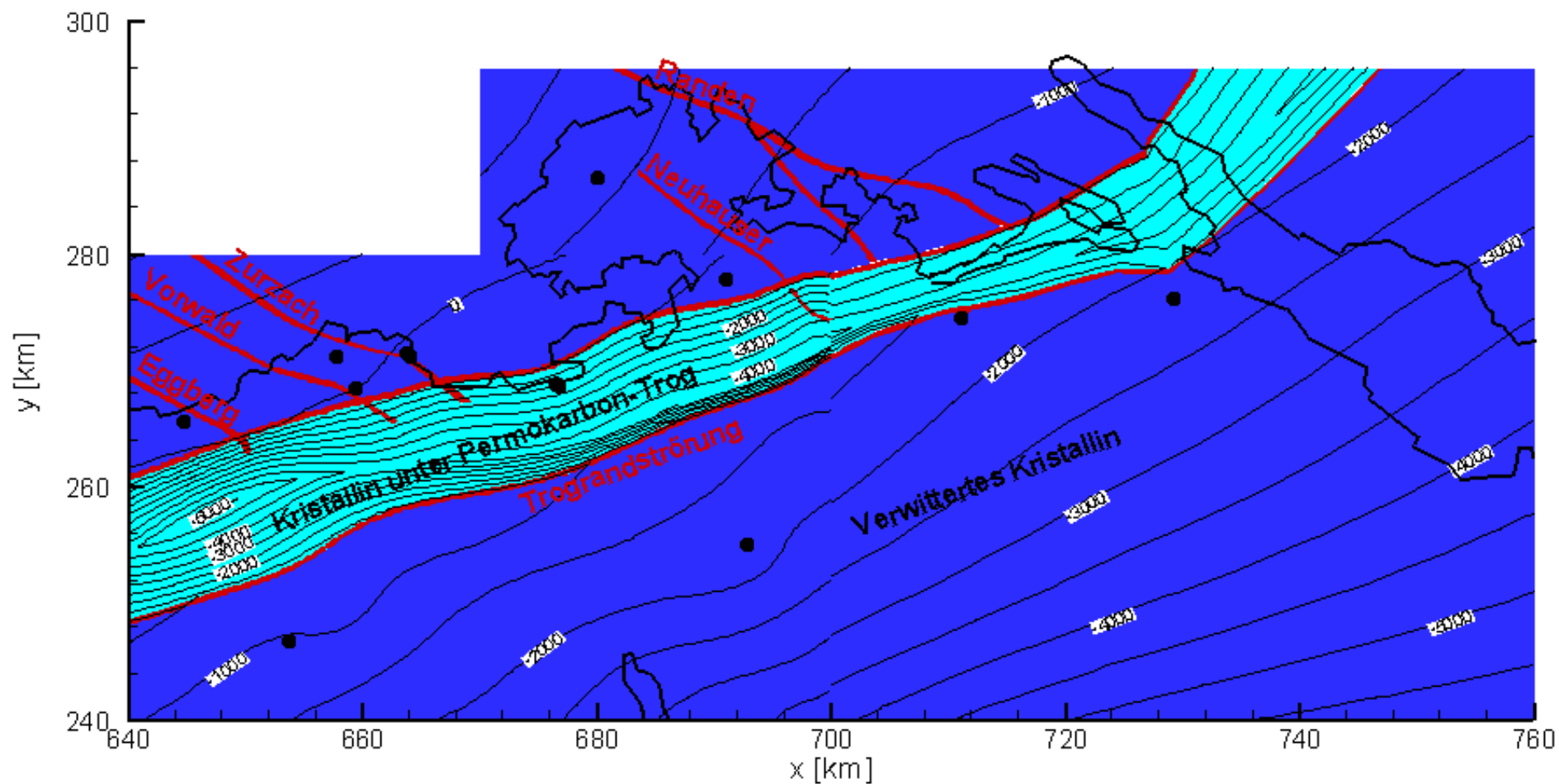
Diese Zahlen sind stark von den geschätzten Durchlässigkeiten abhängig. Aufgrund der geringen Datendichte können diese Angaben nach Einarbeiten ausstehender SEAG Daten noch variieren. Um die bestehende Unsicherheit in der Aussagekraft bezüglich einer spezifischen Lokation zu charakterisieren, wurde die Figur graphisch bearbeitet (Sichtbare Unschärfe in der geographischen Lokation). Analog wird für die anderen untersuchten Horizonte vorgegangen. Im Jahr 2005 werden für die Bestimmung der Unsicherheit weitere Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 7).

*Tabelle 5: Modellannahmen für die Potentialbestimmung im verwitterten Kristallin.*

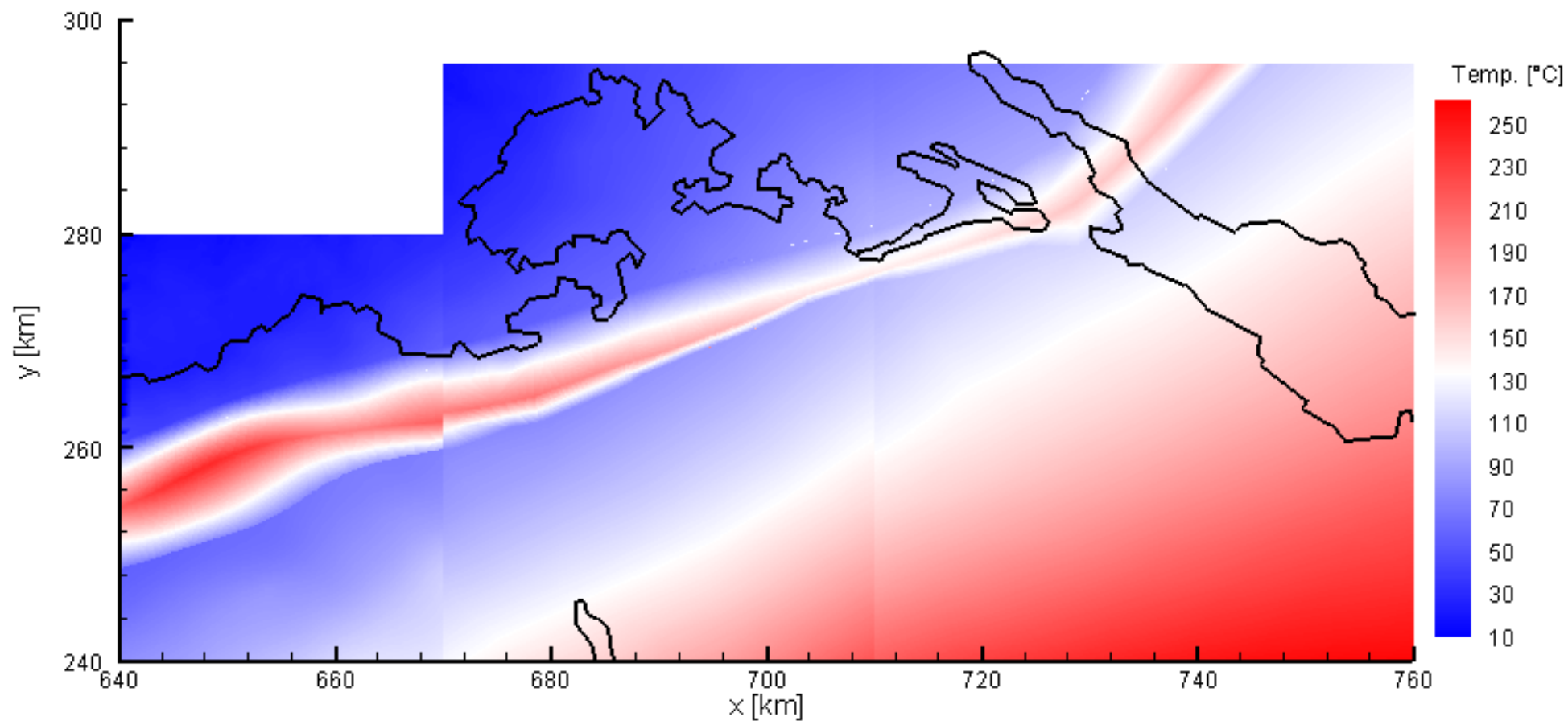
---

Reservoir-Mächtigkeit	500 m (~Mächtigkeit verwittertes Kristallin)
Stimulationsfaktor	$\frac{K_{stim}}{K} = 10$

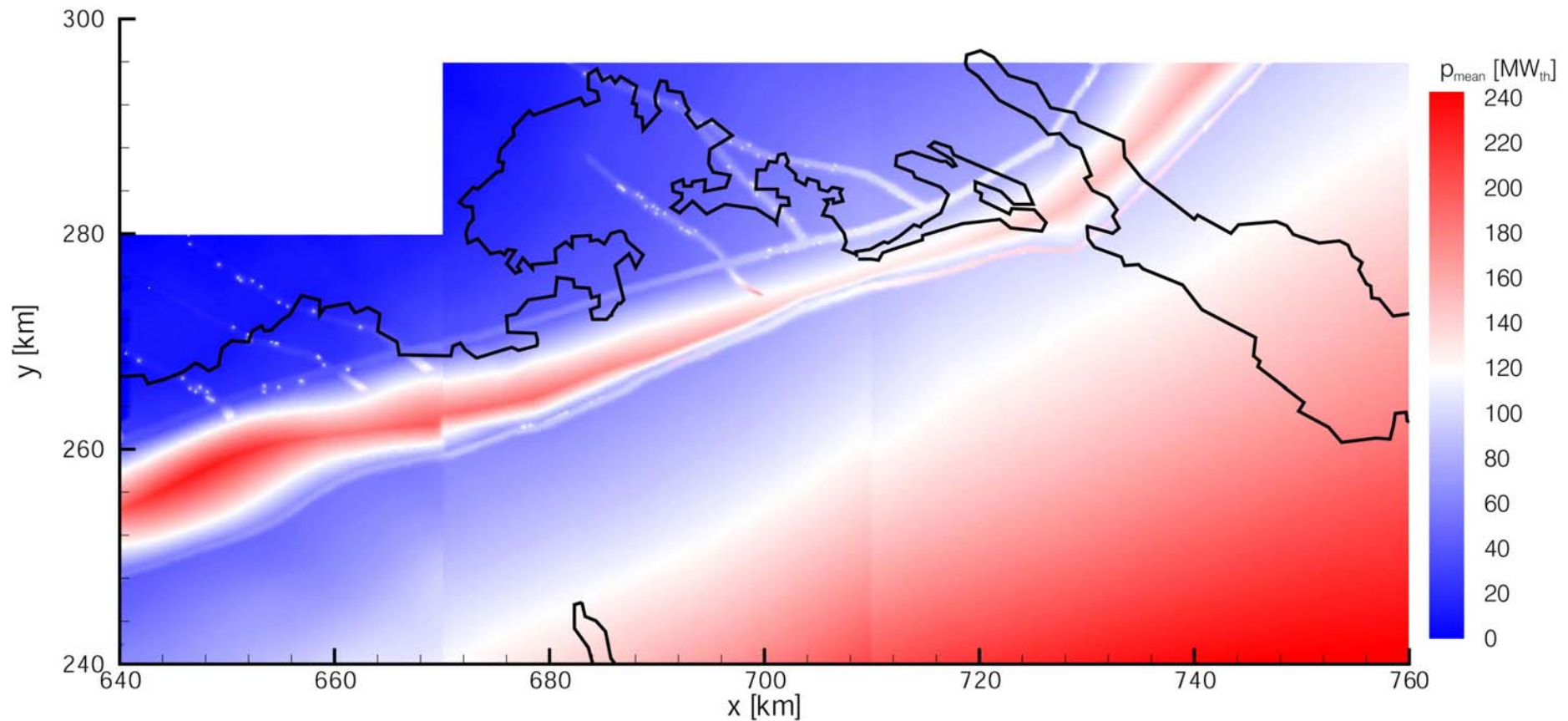
---



Figur 11: Provisorische Isohypsenkarte des Top Kristallins mit der Einteilung in unterschiedliche hydrogeologische Regime. Die schwarzen Punkte markieren Bohrungen, in denen das Kristallin erbohrt wurde (vergleiche Tabelle 9 im Anhang).



Figur 12: Provisorische, mittlere Temperatur in der 500 m mächtigen Verwitterungsschicht des Kristallins.



Figur 13: Provisorisch geschätzte, mittlere geothermische Leistung in der 500 m mächtigen Verwitterungsschicht des Kristallins. Unter den Modellannahmen in Tabelle 5 könnte über 30 Jahre im Mittel eine Nutzenergie  $E_{ut}$  von  $\sim 40'000$  PJ gefördert werden. Die total verfügbare Energie  $E_{HIP}$  in dieser Schicht wäre  $\sim 750'000$  PJ. Um die bestehende Unsicherheit in der genauen Lokation zu charakterisieren, wurde die Figur graphisch bearbeitet (Sichtbare Unschärfe in der geographischen Lokation).

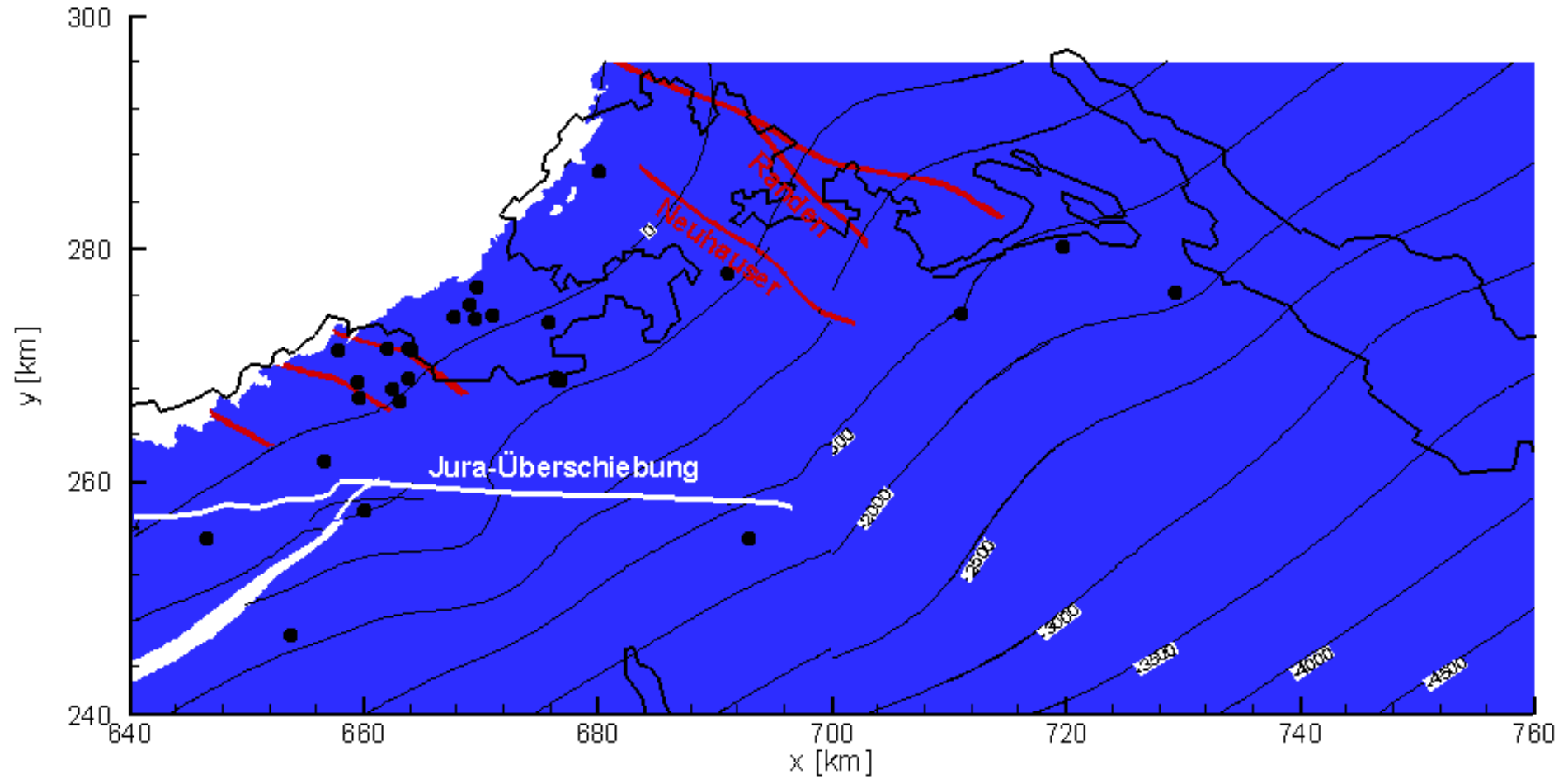
### 5.3.3 Nutzbare Energie "Oberer Muschelkalk"

Für den Oberen Muschelkalk wird analog zum Top Kristallin verfahren. Figur 14 zeigt die Isohypsenkarte mit den Störungzonen, die sich aus dem Kristallin in den Oberen Muschelkalk durchpausen. Zudem ist der Muschelkalk entlang der Jurahauptüberschiebung deutlich versetzt. Aufgrund der Datengrundlage wird jedoch nicht zwischen nördlicher und südlicher Überschiebungszone unterschieden. Für die Charakterisierung der Störungzonen werden die Bohrungen verwendet, die entlang von Störungzonen liegen (Böttstein, Kaisten, Zurzach). Die K-Werte liegen im Muschelkalk ungefähr eine Grössenordnung höher als im Kristallin (vergleiche Kapitel 3.5): a)  $K = 7 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  im ungestörten, Oberen Muschelkalk und b)  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  in den Störungzonen. Allerdings ist die Mächtigkeit des Oberen Muschelkalk deutlich geringer und liegt im Untersuchungsgebiet im Mittel bei  $\sim 70 \text{ m}$ .

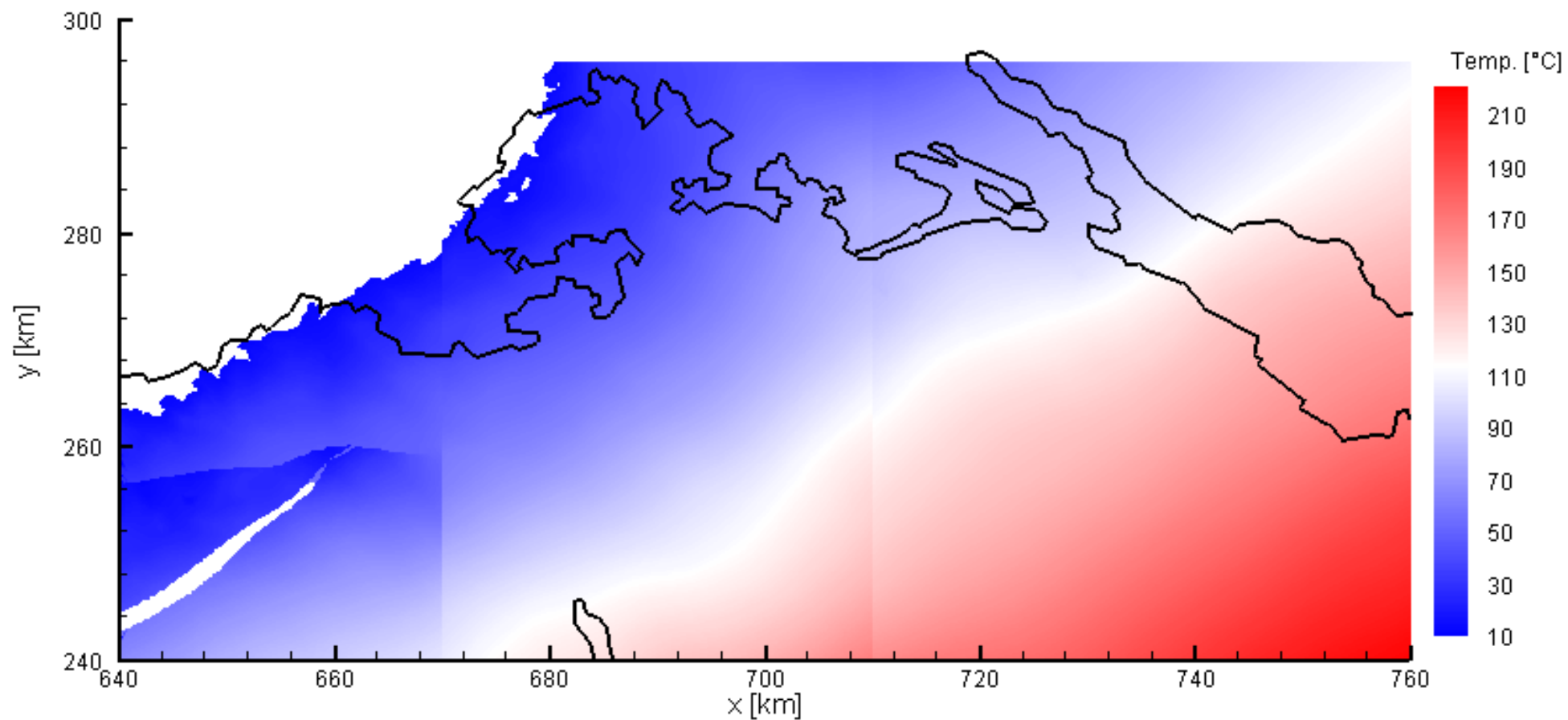
Tabelle 6 fasst die Modellparameter für die Bestimmung der nutzbaren Energie und geothermischen Leistung zusammen. In Sedimentschichten, wie dem Muschelkalk, ist gegenüber dem Kristallin mit einem deutlich geringeren Stimulationsfaktor von ca. 2.5 zu rechnen. Wie Figur 15 zeigt, liegen die mittleren Temperaturen im Oberen Muschelkalk tiefer als im oberen Kristallin, erreichen aber trotzdem in den tiefsten Lagen noch über  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die hieraus geschätzte, mittlere geothermische Leistung ist in Figur 16 dargestellt. Trotz der höheren, hydraulischen Werte wird sie wegen der geringen Mächtigkeit weit tiefer als im Kristallin geschätzt und erreicht in Störungzonen maximal  $\sim 40 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Die total verfügbare Energie  $E_{\text{HIP}}$  wird auf  $\sim 72'000 \text{ PJ}$  geschätzt, davon wären  $E_{\text{ut}} = \sim 4'000 \text{ PJ}$  effektiv förderbar. Bezogen auf  $1 \text{ km}^3$  Gestein wären dies im Mittel  $\sim 9 \text{ PJ}$ .

*Tabelle 6: Modellannahmen für die Potentialbestimmung im Oberen Muschelkalk.*

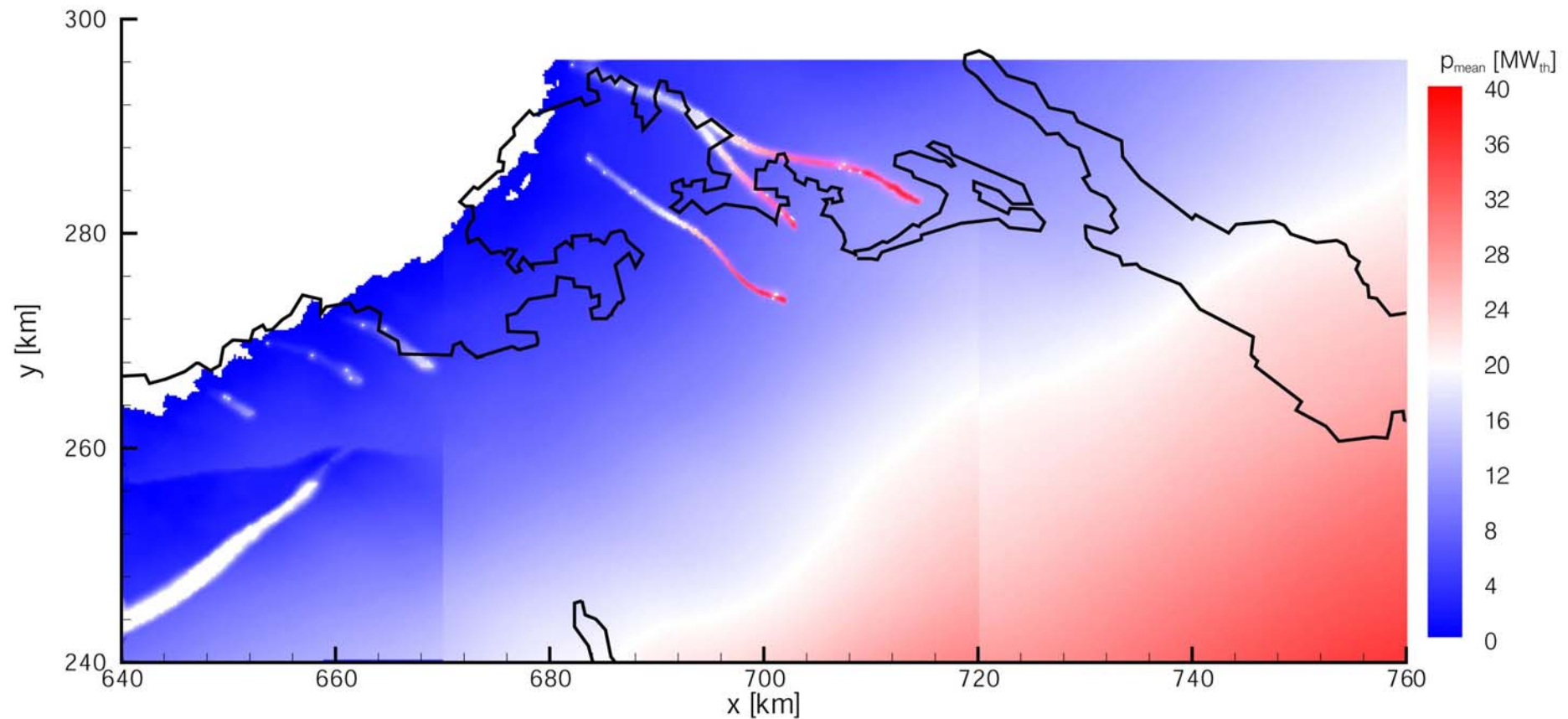
Reservoir-Mächtigkeit	70 m (Mittlere Mächtigkeit Oberer Muschelkalk)
Stimulationsfaktor	$\frac{K_{\text{stim}}}{K} = 2.5$



Figur 14: Provisorische Isohypsenkarte Top Oberer Muschelkalk mit Störungszonen (rot) und Jurahauptüberschiebung (weiss). Die schwarzen Punkte markieren Bohrungen, in denen der Obere Muschelkalk erbohrt wurde (vergleiche Tabelle 10 im Anhang).



Figur 15: Provisorische, mittlere Temperatur im oberen Muschelkalk.



Figur 16: Provisorisch geschätzte, mittlere geothermische Leistung im Oberen Muschelkalk. Unter den Modellannahmen in Tabelle 6, könnte über 30 Jahre im Mittel eine Nutzenergie  $E_{ut}$  von  $\sim 4'000$  PJ gefördert werden. Die total verfügbare Energie  $E_{HIP}$  in dieser Schicht wäre  $\sim 72'000$  PJ. Um die bestehende Unsicherheit in der genauen Lokation zu charakterisieren, wurde die Figur graphisch bearbeitet (Sichtbare Unschärfe in der geographischen Lokation).

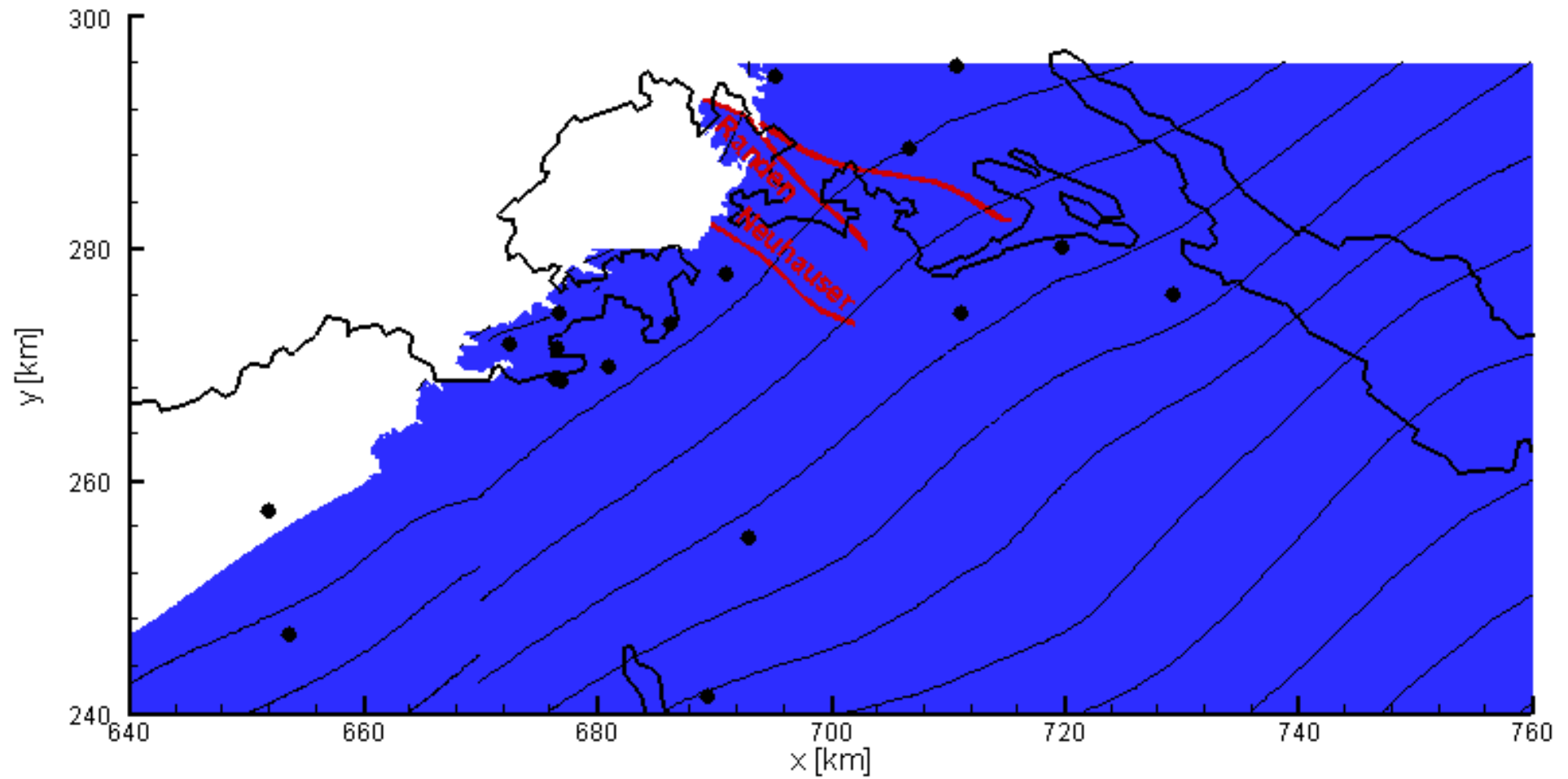
### 5.3.4 Nutzbare Energie "Oberer Malm"

Figur 17 zeigt die Isohypsenkarte "Top Oberer Malm" mit den Störungszonen. Der Obere Malm wird allgemein als hydrogeologisch sehr heterogen angenommen. Wie in Kapitel 3.6 beschrieben wird vermutet, dass die Wasserwegsamkeit dieser Karstaquifers stark durch Sedimentauffüllungen eingeschränkt sein kann. Weiter ist auch fraglich, wie tief die Verkarstungsstrukturen im Oberen Malm reichen. Für die hier durchgeführte Abschätzung des geothermischen Potentials wird der von der Nagra verwendete K-Werte für den ungestörten Malm verwendet (Siehe Kapitel 3.6) und es wird vereinfacht angenommen, dass diese hydrogeologischen Eigenschaften für die ganze Malmmächtigkeit gelten. Die im Oberen Malm angetroffenen Störungszonen werden gleich wie im Oberen Muschelkalk behandelt. Angenommen wird: a)  $K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  für den ungestörten Malm und b)  $K = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  für die Störungszonen. Aufgrund der häufig angetroffenen geringeren hydraulischen Leitfähigkeit, stellt das so ermittelte geothermische Potential im Oberen Malm den möglichen Maximalwert dar.

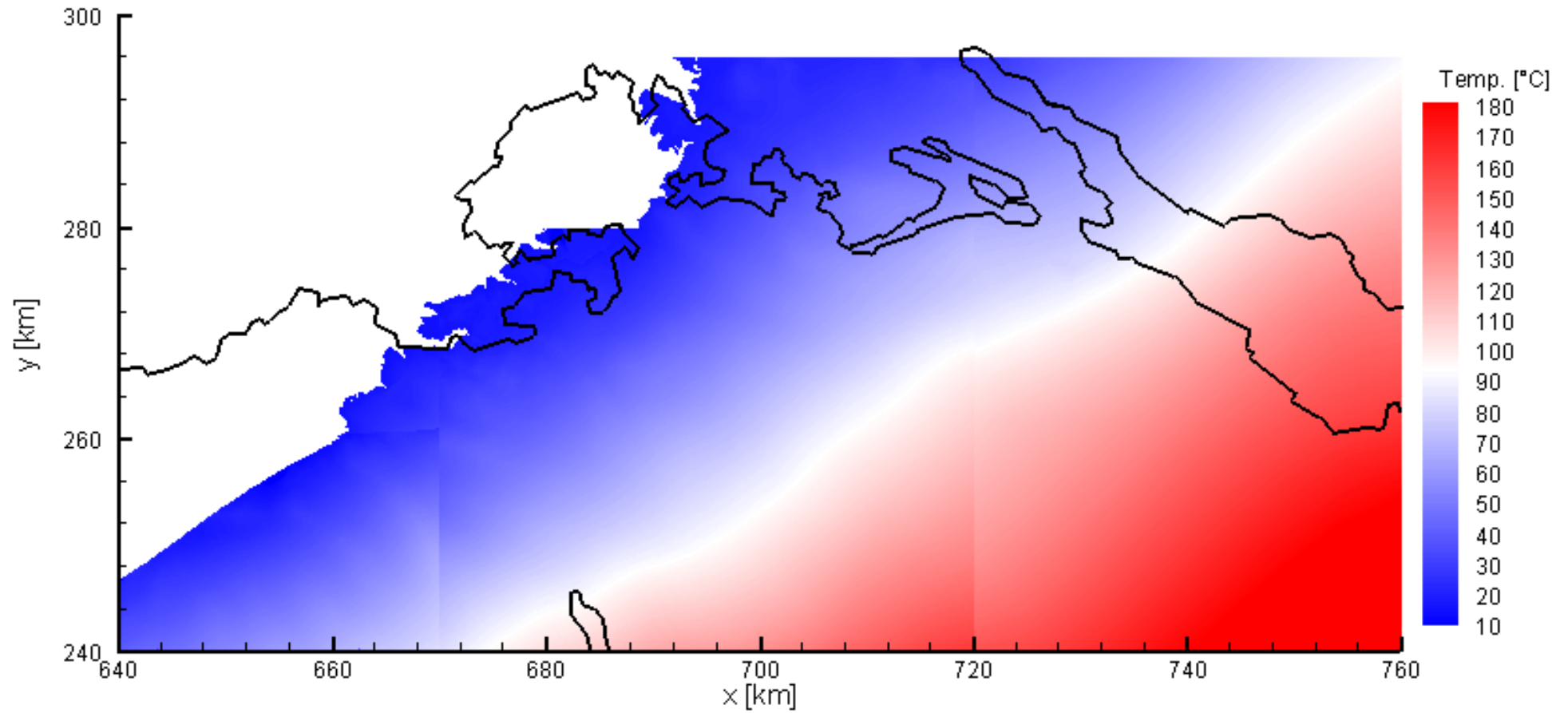
Tabelle 6 fasst die Modellparameter für die Bestimmung der nutzbaren Energie und geothermischen Leistung zusammen. Da die Mächtigkeit nach Osten deutlich zunimmt, wird im östlichen Modellgebiet (Nordostschweiz III) die Schichtmächtigkeit von 200 m auf 300 m erhöht. Die mittlere Temperaturverteilung im Oberen Malm liegt zwischen 10 bis maximal 200 °C (siehe Figur 18). Die mögliche, thermische Leistung nimmt generell nach Osten leicht zu, da hier die eine grössere Aquifermächtigkeit angenommen wird. Die mittlere, geothermische Leistung (siehe Figur 19) wird im ungestörten Bereich maximal auf  $\sim 30 \text{ MW}_{\text{th}}$  geschätzt. In den Störungszonen können Leistungen bis gegen  $120 \text{ MW}_{\text{th}}$  möglich sein. Die total verfügbare Energie beträgt unter den gegebenen Modellannahmen  $\sim 200'000 \text{ PJ}$ , effektiv gefördert werden könnte eine Energie von  $E_{\text{ut}} = \sim 10'000 \text{ PJ}$ . Bezogen auf  $1 \text{ km}^3$  wären aber mit  $\sim 8 \text{ PJ}$  leicht weniger, nutzbare Energie vorhanden.

*Tabelle 7: Modellannahmen für die Potentialbestimmung im Oberen Malm.*

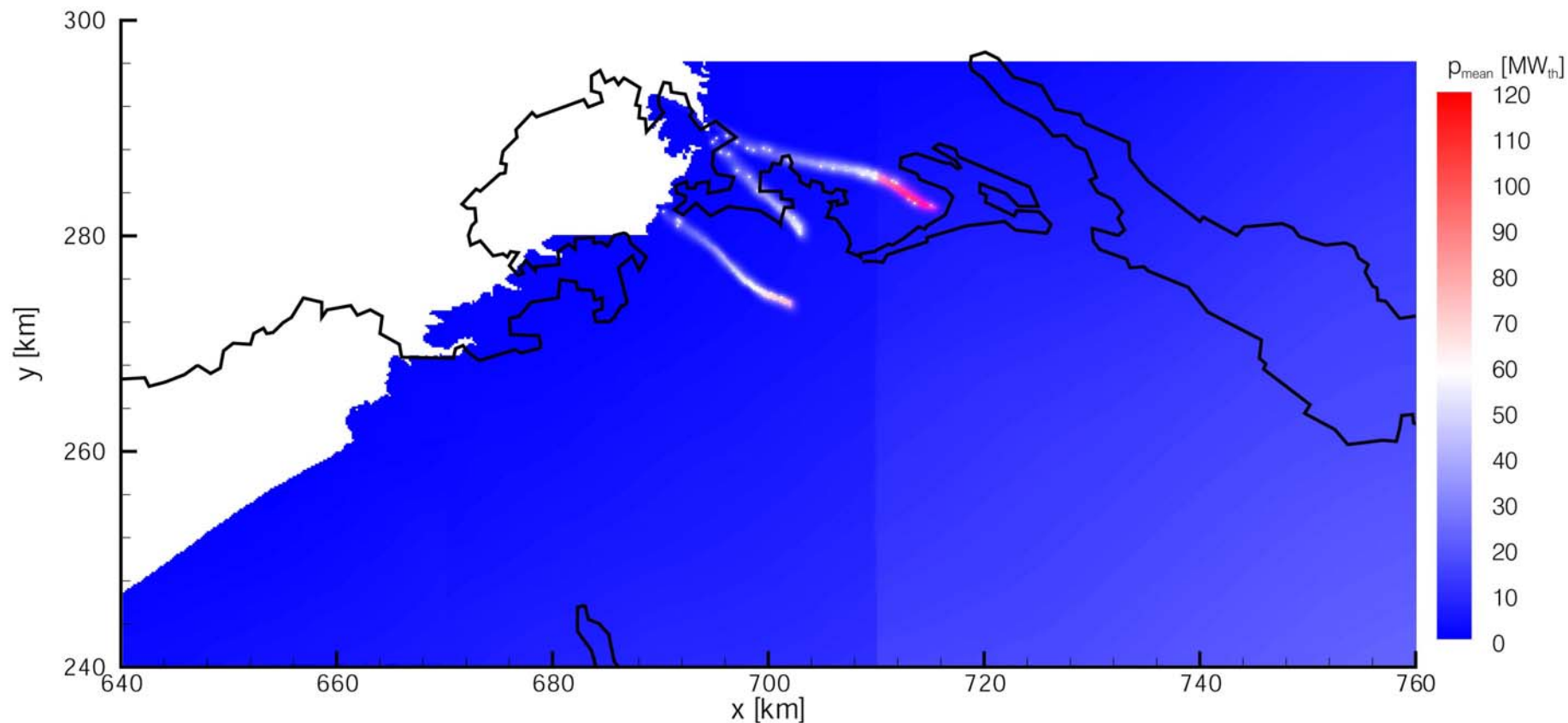
Reservoir-Mächtigkeit	Westlicher Teil: 200 m Östlicher Teil: 300 m (Mittlere Mächtigkeit Oberer Malm)
Stimulationsfaktor	$\frac{K_{\text{stim}}}{K} = 2.5$



Figur 17: Provisorische Isohypsenkarte Top Oberer Malm mit Störungszonen (rot). Die schwarzen Punkte markieren Bohrungen, in denen der Obere Malm erbohrt wurde (vergleiche Tabelle 11 im Anhang).



Figur 18: Provisorische, mittlere Temperatur im Oberen Malm.



Figur 19: Provisorisch geschätzte, mittlere geothermische Leistung im Oberen Malm. Unter den Modellannahmen in Tabelle 7, könnte über 30 Jahre im Mittel eine Nutzenergie  $E_{ut}$  von  $\sim 10'000$  PJ gefördert werden. Die total verfügbare Energie  $E_{HIP}$  in dieser Schicht wäre  $\sim 200'000$  PJ. Um die bestehende Unsicherheit in der genauen Lokation zu charakterisieren, wurde die Figur graphisch bearbeitet (Sichtbare Unschärfe in der geographischen Lokation).

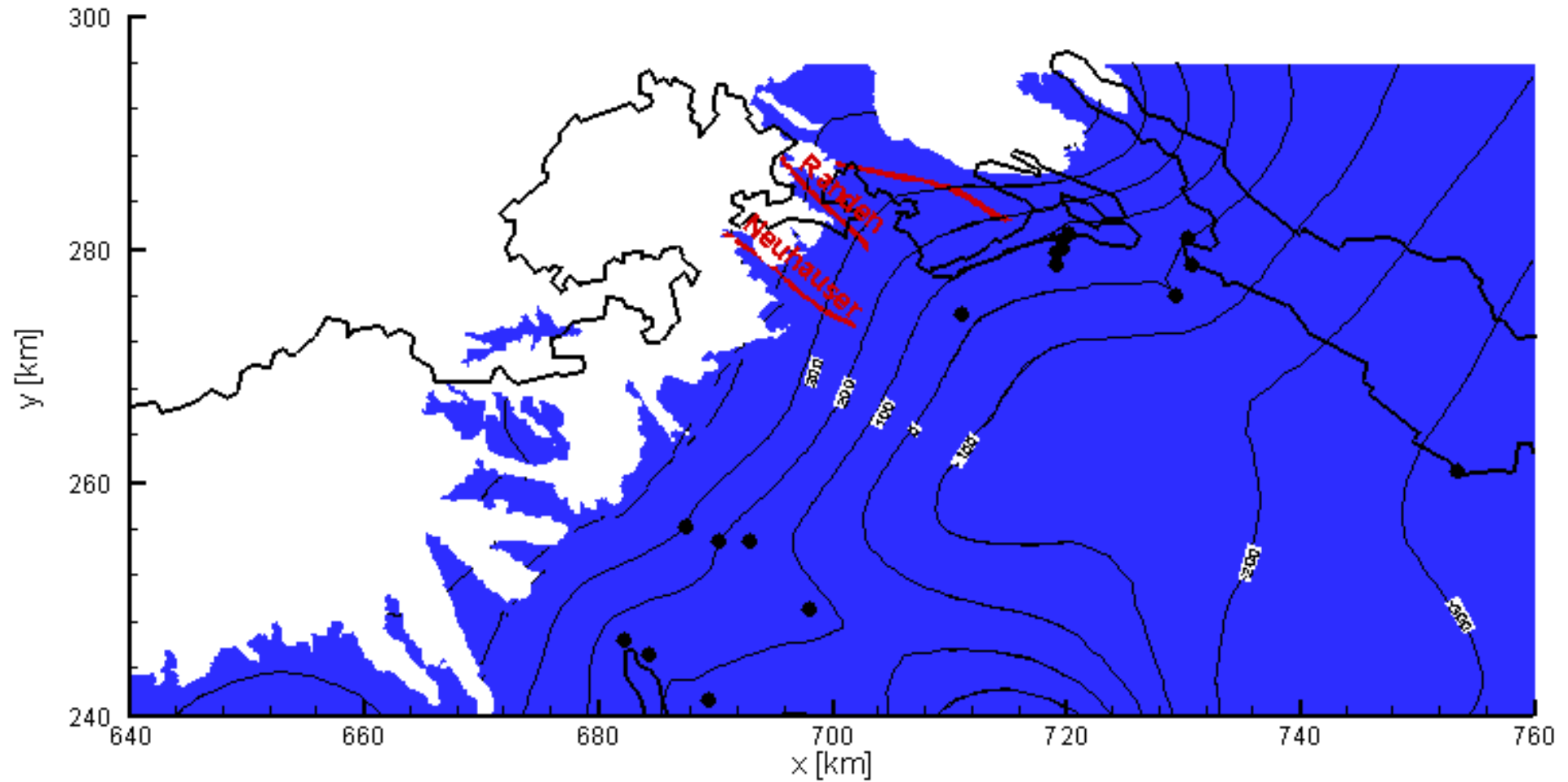
### 5.3.5 Nutzbare Energie "Obere Meeresmolasse"

Die Obere Meeresmolasse ist der untiefste aller Aquifere. Figur 20 zeigt die Isohypsenkarte "Top OMM" mit den Störungszonen, wie sie bereits für den Oberen Muschelkalk und den Oberen Malm berücksichtigt wurden. Für die Modellierung wird der Mittelwert der K-Messwerte aus allen Bohrungen verwendet (vergleiche Tabelle 3) und für die Störungszonen werden wiederum die Werte des Oberen Muschelkalk übernommen: a)  $K=2 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  für die ungestörte Meeresmolasse und b)  $K=3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  für die Störungszonen.

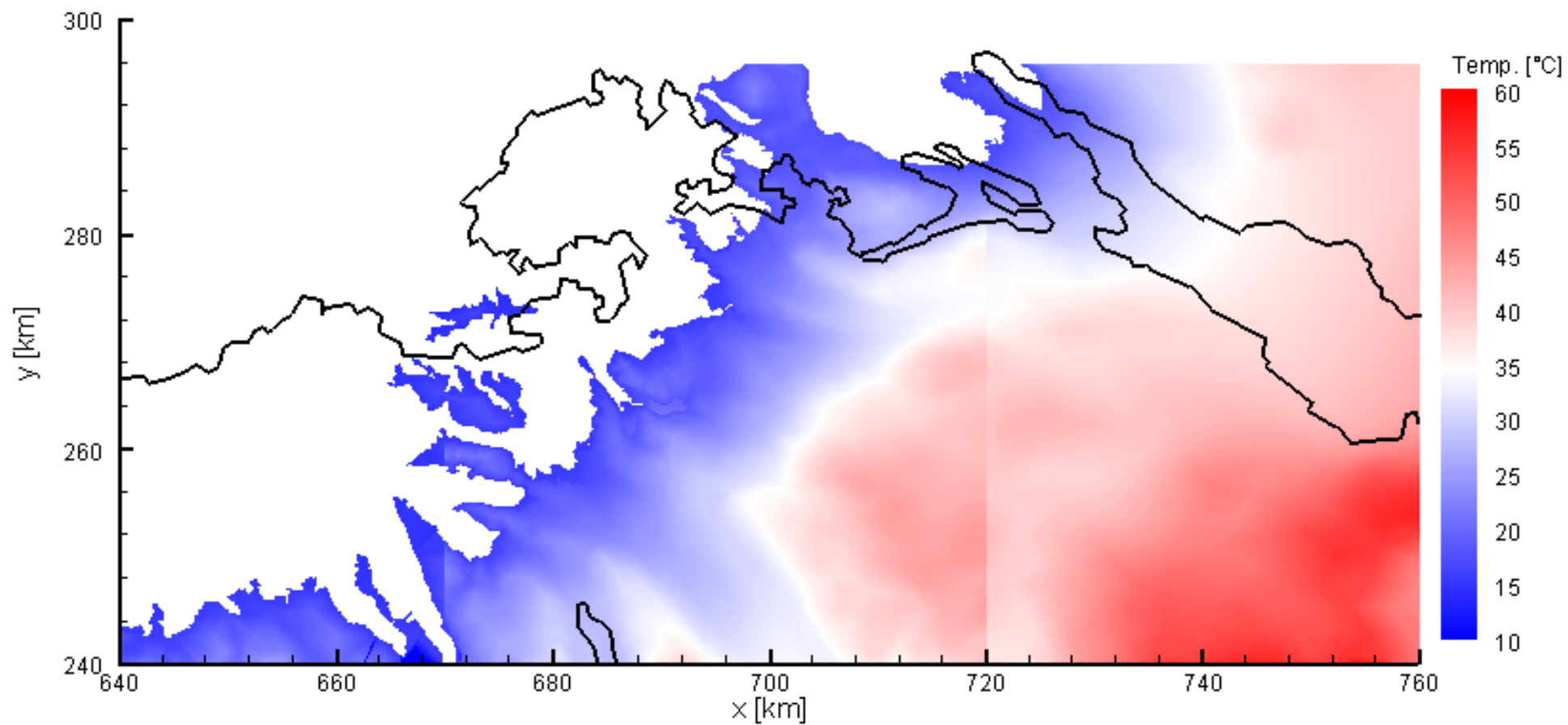
Tabelle 8 fasst die Modellparameter für die Bestimmung der nutzbaren Energie und geothermischen Leistung zusammen. Wie Figur 21 zeigt, liegt das mittlere Temperaturniveau nur noch bei maximal 50 °C. Bei diesen Temperaturen könnte in der ungestörten Meeresmolasse mit geothermischen Leistungen von maximal ~10 MW (siehe Figur 23) gerechnet werden, nur lokal in Verbindung mit Störungszonen können Leistungen von ~40 MW auftreten. Die total verfügbare Energie beträgt ~40'000 PJ, davon wäre  $E_{ut} \approx 2'000 \text{ PJ}$  förderbar. Bezogen auf 1 km<sup>3</sup> Gestein ergäbe sich eine Nutzenergie von 9 PJ. An dieser Stelle soll auf die niedrige Reservoirtemperatur hingewiesen werden.

*Tabelle 8: Modellannahmen für die Potentialbestimmung in der Oberen Meeresmolasse.*

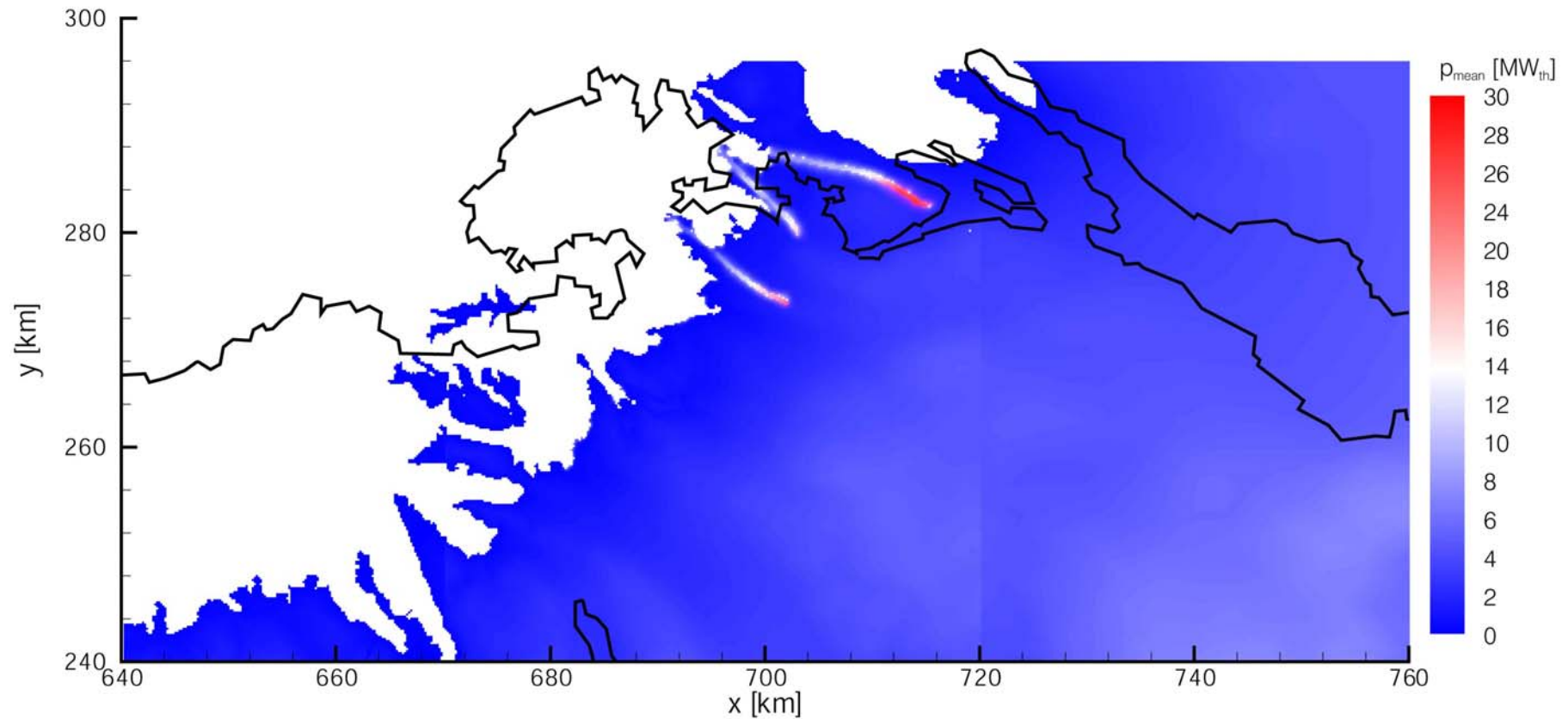
Reservoir-Mächtigkeit	250 m (Mittlere Mächtigkeit OMM)
Stimulationsfaktor	$\frac{K_{stim}}{K} = 2.5$



Figur 20: Provisorische Isohypsenkarte Top Oberen Meeresmolasse mit Störungszonen in rot. Die schwarzen Punkte markieren Bohrungen, in denen das Kristallin erbohrt wurde (vergleiche Tabelle 12 im Anhang).



Figur 21: Provisorische, mittlere Temperatur in der Oberen Meeresmolasse.



Figur 22: Provisorisch geschätzte, mittlere geothermische Leistung in der Oberen Meeresmolasse. Unter den Modellannahmen in Tabelle 8, könnte über 30 Jahre im Mittel eine Nutzenergie  $E_{\text{ut}}$  von  $\sim 2'000$  PJ gefördert werden. Die total verfügbare Energie  $E_{\text{HIP}}$  in dieser Schicht wäre  $\sim 40'000$  PJ. Um die bestehende Unsicherheit in der genauen Lokation zu charakterisieren, wurde die Figur graphisch bearbeitet (Sichtbare Unschärfe in der geographischen Lokation).

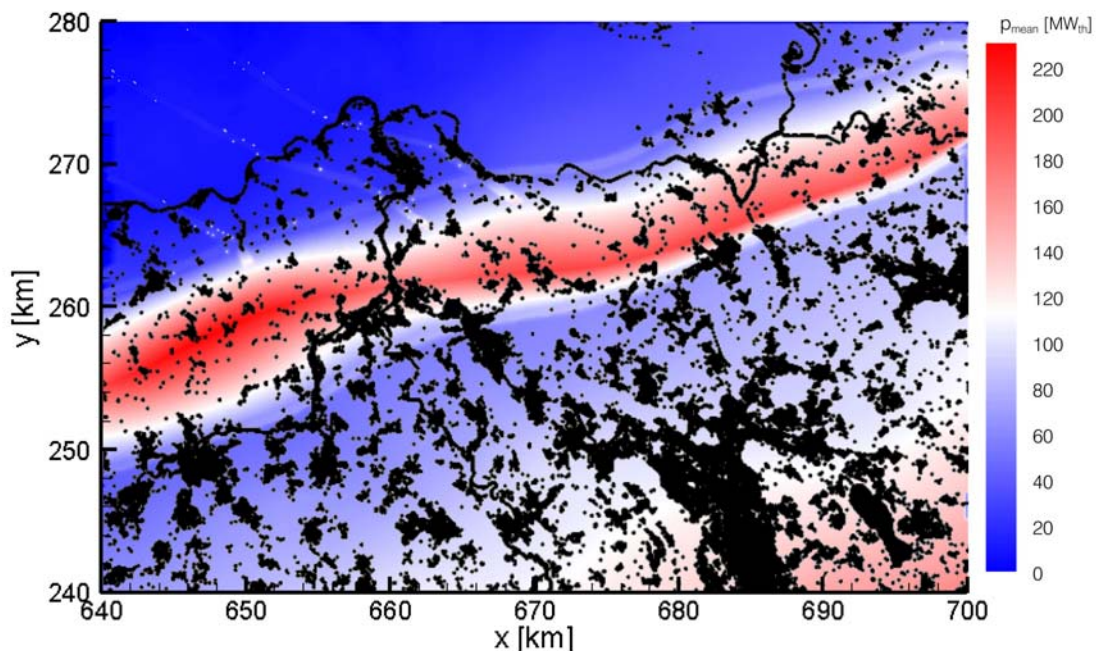
## 5.4 Geothermisch interessante Regionen für EGS-Nutzung im Kristallin

Soll eine geothermische Ressource langfristig ideal mit der EGS-Technologie genutzt werden, sind neben einem möglichst hohen Potential weitere Kriterien wichtig:

- **Temperaturniveau:** Für Stromproduktionsanlagen nach dem EGS-Prinzip (Enhanced Geothermal System) sind Temperaturen über 100 °C nötig.
- **Oberflächengewässer:** Für Kühlzwecke bei der Stromproduktion wird Wasser benötigt, das idealerweise einem nahen Oberflächengewässer entnommen wird.
- **Gebäude:** Um eine Anlage rentabel betreiben zu können, muss beim heutigen Stand der Technik die anfallende Abwärme bei der Stromerzeugung für Heizzwecke verkauft werden. Dazu ist die Nähe zu Wärmeabnehmer (Wohn-, Industriegebäude, Fernwärmenetze, ...) wichtig.
- **Bohrtiefe:** Um die Bohrkosten möglichst tief zu halten, sind Gebiete interessant, die relativ oberflächennah liegen.

Anhand der Oberflächennutzung der Schweiz (siehe Figur 1) werden nun im Untersuchungsgebiet Nordostschweiz I (siehe Figur 3) Gebiete bestimmt, die sich maximal 200 m von einem bebauten Bereich und 500 m von einem Oberflächengewässer befinden. In Figur 23 sind diese über die geothermische Potentialkarte des verwitterten Kristallins projiziert (vergleiche Figur 12). Deutlich erkennbar bilden sich die Flussläufe (z.B.: Rhein, Aare) und Seen (z.B.: Zürich See) sowie die Bewölkungsdichte ab. Gute Bedingungen können zum Beispiel für den Raum Baden-Brugg identifiziert werden. Hier im Bereich der südlichen Randstörung des Permokabron-Troges können für die angenommene Anlagegeometrie in einem Tiefenbereich von ungefähr –2000 bis –3500 m.ü.M. geothermische Leistungen zwischen 100 bis 180 MW erwartet werden. Auch das Temperaturniveau von deutlich über 120 °C deutet auf ideale geothermische Nutzungsbedingungen hin.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass diese Datenevaluation nur auf regionalen Erhebungen basiert. Für eine weiterführende, lokale Bewertung müssten zusätzlich bereits verfügbare oder neu zu erfassende Daten detailliert berücksichtigt werden. Dadurch können die Geologie und Störungszonen lokal genauer nachgebildet und so die geothermischen Ressourcen besser charakterisiert werden. Beispiele für solche lokalen Detailuntersuchungen wurden in Andenmatten und Kohl (2003) gezeigt.



Figur 23: Geothermische Leistungskarte überlagert von der Oberflächennutzung. Die schwarzen Punkte stellen Regionen dar, die maximal 200 m von einem bebauten Gebiet und 500 m von einem Oberflächengewässer entfernt sind.

## 6. Untersuchung Region Basel

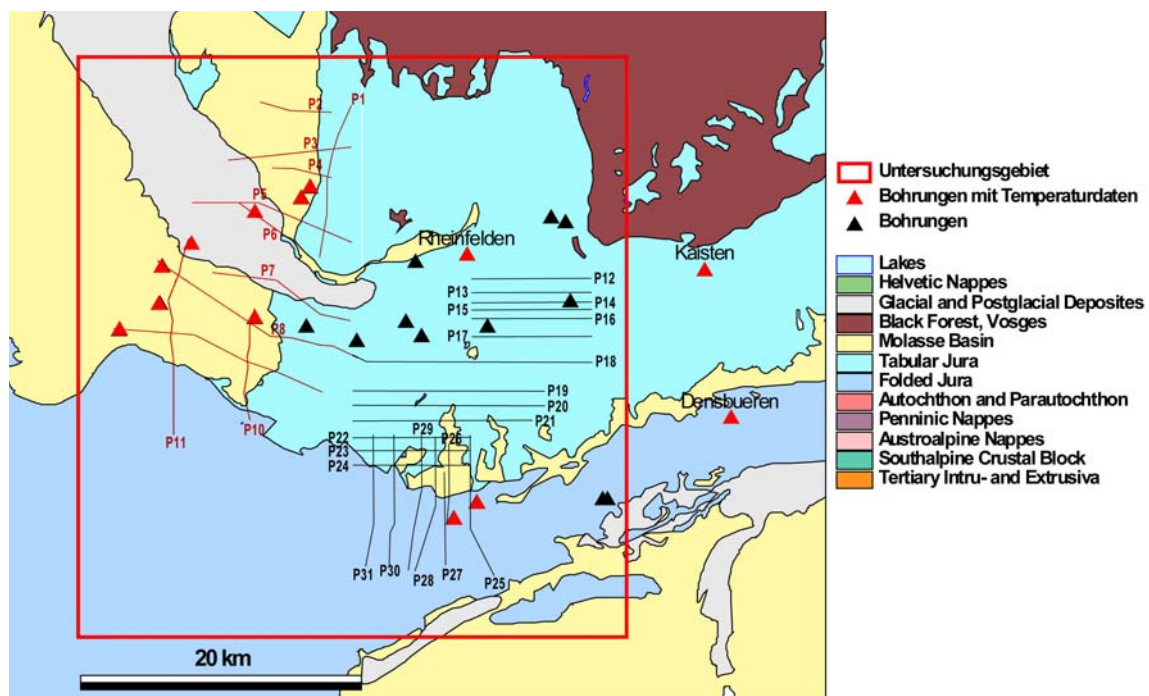
### 6.1 Geologische Datengrundlage

Für den Aufbau des geologischen Modells der Region Basel wurden in GOCAD bis anhin 11 seismischen Profilinien (aus Gürlér et al., 1987; siehe Figur 24) und der 20 Bohrungen (Tabelle 14 bis Tabelle 16 im Anhang) integriert. 2005 sollen weitere 14 seismische Profile integriert und das verbesserte Modell mit Experten besprochen werden (Eric Zechner, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel).

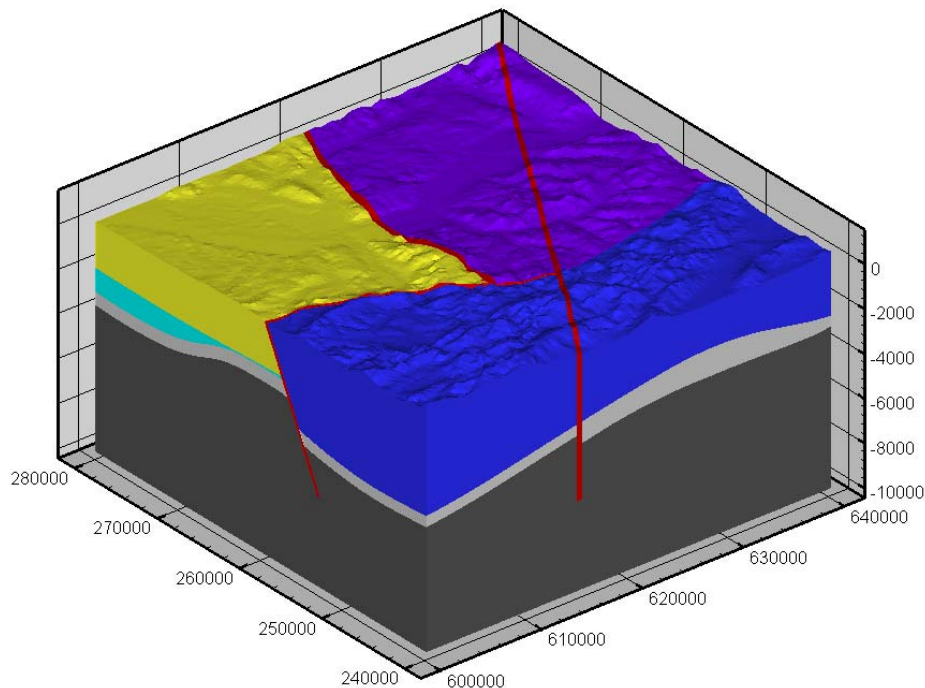
Das Modell umfasst ein Gebiet von 40 x 40 km (siehe Figur 24). Analog zu den Modellen in der Nordostschweiz wurden geologische Flächen für "Top Kristallin", "Top Oberer Muschelkalk", "Top Oberer Malm" und "Top Oberer Meeresmolasse" erstellt. Wiederum musste aber wegen der Modellausdehnung das geologische Modell für die Temperaturmodellierung gröber diskretisiert werden. Folgende Einteilung wurde dabei vorgenommen:

- Grabensedimente mit Oberem Malm und Oberem Muschelkalk
- Sedimente im Faltenjura mit Oberer Meeresmolasse, Oberem Malm und Oberem Muschelkalk
- Sedimente im Tafeljura mit Oberer Meeresmolasse, Oberem Malm und Oberem Muschelkalk
- Sedimente des Permokarbon-Troges
- Störungszonen
- Verwittertes Kristallin
- Kristallines Basement

In Figur 27 ist das geologische Modell als FE-Modell dargestellt mit Topographie, Sedimentschichten und kristallinem Grundgebirge (verwittert und unverwittert). Zudem ist der Weiach-Permokarbon-Trog als westliche Fortsetzung aus den Modellen der Nordostschweiz mit den nördlichen und südlichen Störungszonen und die Zeiningen Bruchzone integriert.



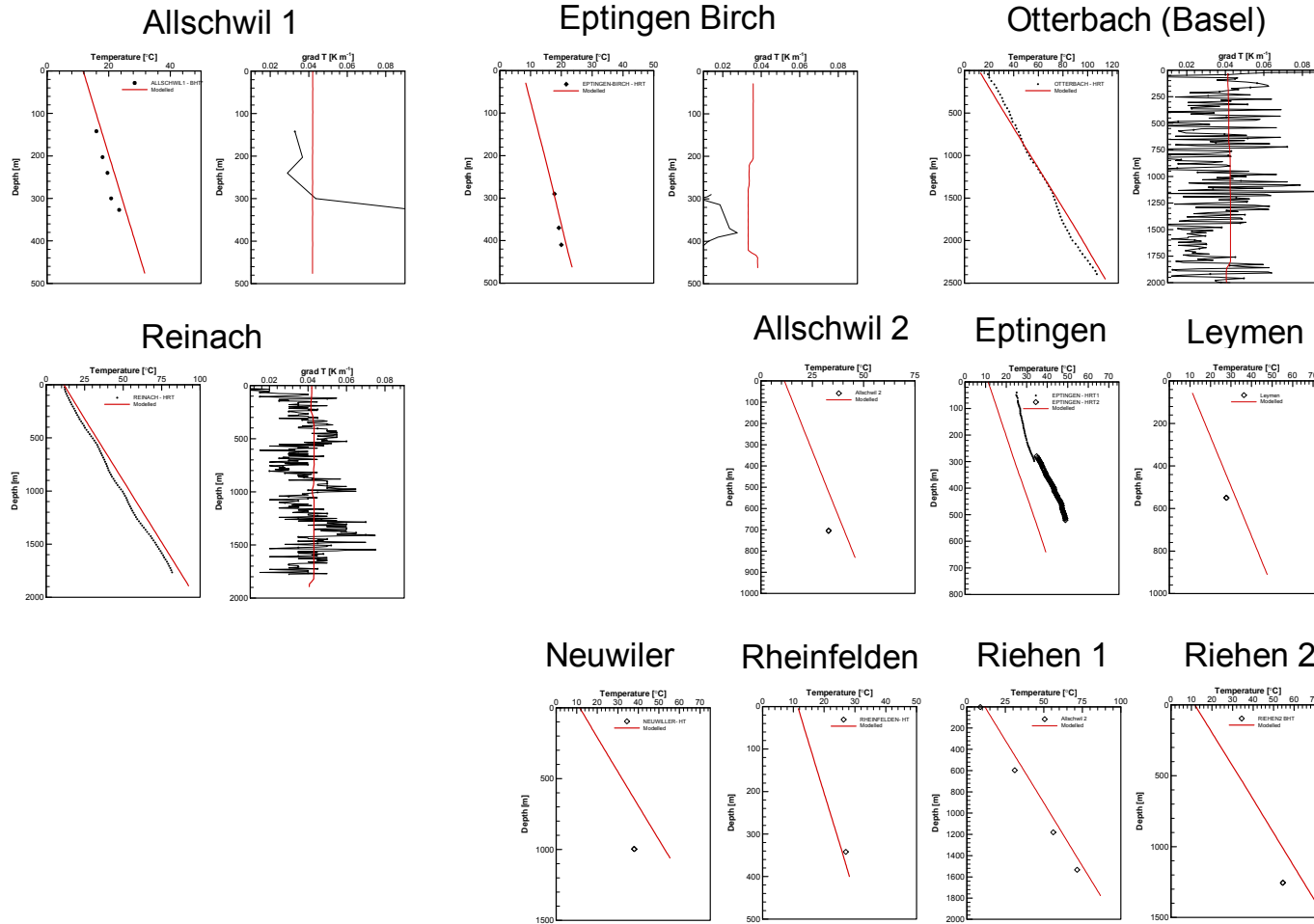
Figur 24: Seismische Profile (Linien) und Bohrungen (Dreiecke) in der Region Basel. Zur Übersichtlichkeit sind nur Bohrungen mit Temperaturdaten (rot) und die seismischen Linien beschriftet. Die roten seismischen Linien sind bereits im Modell berücksichtigt, die schwarzen werden 2005 integriert. Die verwendeten Bohrungen sind in den Tabelle 14 bis Tabelle 16 im Anhang aufgelistet.



Figur 25: Provisorisches, geologisches Modell für das Untersuchungsgebiet Nordostschweiz. Die Figur zeigt die Topographie, die Sedimentschichten im Rheingraben, Falten- und Tafeljura und das kristalline Grundgebirge (verwittert und unverwittert). Zudem ist der Permokarbon-Trog mit den nördlichen und südlichen Störungszonen als Fortsetzung des Weichtroges integriert (im westlichen Teil unter den Sedimentschichten, hier nicht sichtbar).

## 6.2 Simulation der Temperaturverteilung

Die Modellierung für die Region Basel entspricht dem Vorgehen für die Nordostschweiz (siehe Kapitel 5.2), auch die thermischen Schichtparameter werden übernommen. Der Basiswärmefluss wird in einer Tiefe von  $-10000$  m einheitlich mit  $100 \text{ mW m}^{-2}$  angenommen. Figur 26 zeigt die Anpassung an die Temperaturmessdaten. Wieder ist eine sehr gut Anpassung möglich, die lediglich durch Wärmeleitfähigkeitsänderung in den Modellschichten verbessert werden kann.



Figur 26: Provisorische Anpassung der Temperaturdaten durch das Regionalmodell Basel. Die durchgezogenen roten Linien zeigen die Modellergebnisse, die Messdaten sind durch schwarze Punkte/Linien dargestellt. Ausser für tiefe oberflächennahen Bohrungen mit wenig Messdaten sind zudem die Temperaturgradienten angegeben.

## 7. Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Ressourcenanalyse wurde die geothermische Ergiebigkeit der regionalen Grundwasserleiter in der Nordostschweiz individuell bewertet. Dazu wurden 3D geologische, geothermische und hydrogeologische Datenanalysen durchgeführt und daraus die mögliche, geothermische Produktion für einen Dublettenbetrieb berechnet. Normiert auf ein Reservoirvolumen von 1 km<sup>3</sup> variiert die maximal vorrätige Wärmeenergie (heat in place) zwischen ~230 PJ im verwitterten Kristallin und 160 PJ in der Oberen Meeresmolasse. Die effektiv förderbare Energie ist aber deutlich kleiner. Die Prognosen für die Nordostschweiz zeigen, dass aus dem Kristallin bei obengenantem Reservoirvolumen über 30 Jahre im Mittel total ~12 PJ gefördert werden könnten, in der Oberen Meeresmolasse wären es um die 9 PJ. Dieser Wert hängt aber stark von den hydraulischen Eigenschaften im Gestein ab, so können lokal deutliche Unterschiede zu diesen Durchschnittswerten auftreten. Durch Kombination mit Oberflächendaten (Besiedlung, Oberflächengewässer, etc.) zeigt sich, dass im Raum Baden-Brugg mit guten Voraussetzungen für zukünftige Nutzung geothermischer Energie (Wärme und Stromproduktion mittels EGS) zurechnen wäre. Weiter wurde eine erste Temperaturprognose für den Grossraum Basel erstellt, welche die Grundlage für die im Jahr 2005 geplante Potentialanalyse bildet.

Folgende Arbeiten sind für 2005 geplant:

- Aktualisieren der hydrogeologischen Datensammlung: Die Aussage über die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten in der Nordostschweiz soll durch Einbezug weiterer Daten verbessert werden (Schweizerische Erdöl AG, Literaturwerte, etc.). Bei genügender Datengrundlage soll mit Hilfe statistischer Methoden die Wahrscheinlichkeit für die Fündigkeit hochpermeabler Zonen im Kristallin abgeschätzt werden.
- Aktualisierung der geologischen Interpretation für die Region Nordostschweiz und Basel durch Einbezug weiterer Daten: z.B. NRP 20 (Pfiffner et al., 1997, etc.)
- Abschluss der Potentialanalyse Nordostschweiz aufgrund des verbesserten, geologischen Modells und die aktualisierten, hydrogeologischen Datensammlung
- Durchführen einer detaillierten Potentialanalyse "Region Basel" und Modellerweiterung nach Süden.
- Erstellung eines ersten geologischen Modells für den Raum Genfer See
- Quantifizierung Prognoseunsicherheit
- Optimierung der bisherigen Datenbankstruktur
- Publikation: Die bisher erarbeiteten Resultate sollen in einer internationalen Zeitschrift publiziert werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- Andenmatten, N. Kohl, T., 2003. Evaluation du potentiel géothermique en Suisse - rapport annuel, Commission Suisse de Géophysique.
- Arbeitsgruppe Geothermik, 1988. Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad – Baden. Editoren: Gorhan, H.L., Griesser, J.C., Beiträge zur Geologie der Schweiz, Herausgeber: Schweizerische Geotechnische Kommission. Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern.
- Blaser, P.; Gubler, T.; Küpfer, T.; Marschall, P.; Matter, A.; Matyas, J.; Meier, B.P.; Müller, W.H.; Schlanke, S.; Schlunegger, F.; Sieber, N.; Wyss, E., 1994. Geothermiebohrung Bassersdorf: Charakterisierung der Oberen Meersmolasse und Unteren Süsswassermolasse. Nagra Technischer Bericht, NTB 94-01, Wettingen.
- Bitterli-Brunner, P., 1988. Geologische Übersicht über die Basler Region. Veröffentlichung aus dem Naturhistorischen Museum Basel, Nr. 19. Birkhäuser, Basel – Boston, 2. Auflage.
- Büchi, 1983. Bericht 2000. Blatt 26. Geologiebüro Dr. Büchi.
- Diebold, P., Naef, H., Ammann, M., 1991. Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz: Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen – Beilageband. Nagra Technischer Bericht, NTB 90-04.
- Clauss, B., 1987. Numerische Modellierungen der tektonischen Spannungen in der Nordschweiz. Diplomarbeit am Geophysikalischen Institut der Universität Karlsruhe.
- Elektrowatt, 1998. Thermalbohrung Tiefenbrunnen.
- Geoform, 1995. Thermalwassernutzung Kreuzlingen-2, Hydrogeologischer Kurzbericht.
- Gringarten, A.C., 1978. Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for mountainous terrain: a model study. Journal of Geophysical Research, 94 (B7), 9439 – 9451.
- Gürler B., Hauber L. und Schwander M., 1987. Die Geologie der Umgebung von Basel. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz.
- Hauber, L., 1993. Der Südliche Rheingraben und seine geothermische Situation. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. U. Ing., Vol. 60, Nr. 137, Dezember 1993, 53-69.
- Keller, B., 1992. Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissenstand und weiterführende Betrachtungen. Eclogae geol. Helv., 85/3, 611-651.
- Kohl, T., Hopkirk, R.J., 1995. "FRACTure" a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock. Geothermics, 24(3): 345-359.
- Kohl, T., Andenmatten, N., Rybach, L., 2003. Geothermal resource mapping - example from northern Switzerland. Geothermics 32, 721 – 732.
- Mazurek, M., 1998. Geology of the crystalline basement of Northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models. Nagra Technischer Bericht, NTB 93-12, Wettingen.
- Medici F., Rybach L., 2002. Switzerland. In. Atlas of geothermal resources in Europe. S. Hurter and R. Haenel (Eds.). Publication number EUR17811 of the European commission.
- Leu, W., Keller, B., Mégel, T., Schärli, U. and Rybach, L., 1999. Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500m), Bundesamt für Energie.
- Müller, W.H., Naef, H., Graf, H.R., 2001. Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Züricher Weinland. Technischer Bericht, 99-08, Wettingen.
- Nagra, 1985. Sondierbohrung Böttstein – Untersuchungsbericht. Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 85-10, Nagra, Baden.
- Nagra, 1988. Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988 / Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz / Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 88-25, Baden.

- Nagra, 1989. Sondierbohrung Weiach - Untersuchungsbericht - Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 88-08, Baden.
- Nagra, 1990. Sondierbohrung Riniken - Untersuchungsbericht - Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 88-09, Nagra, Baden.
- Nagra, 1991a. Sondierbohrung Kaisten - Untersuchungsbericht – Textband. Schweizerische Geotechnische Kommission, Nagra Technischer Bericht, NTB 88-12, Baden.
- Nagra, 1991b. Sondierbohrung Leuggern– Untersuchungsbericht (Gemeinde Leuggern, Kanton Aargau, Schweiz). Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 88-11, Schweizerische Geotechnische Kommission.
- Nagra, 1992. Sondierbohrung Schafisheim – Untersuchungsbericht (Gemeinde Schafisheim, Kanton Aargau, Schweiz). Textband. Schweizerische Geotechnische Kommission, Nagra Technischer Bericht, NTB 88-10.
- Nagra, 2001. Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. Textband. Nagra Technischer Bericht, NTB 00-01, Wettingen.
- NEFF, 1980. Forschungsprojekt Geothermische Energie und unterirdische Wärmespeicherung - Teilprojekt 1: Geothermische Prospektion im Raume Koblenz, Wildegg, Dielsdorf / Schlussbericht, November 1980.
- Pfiffner, O.A., Lehner, P., Heitzmann, P., Mueller, St., Steck, A., (Editors) 1997. Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NRP 20. Birkhäuser, Basel.
- Rybach, L., Büchi, U.P., Bodmer, Ph., Griesser, J.-C., Israng, L., Kappeler, S., Rellstab, W., Schlanke, S., Weiss, H.P., 1981. Geothermische Datensynthese der Schweiz. Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 26.
- Rybach, L., 1992. Geothermal potential of the Swiss Molasse Basin. *Eclogae geolo. Helv.*, 85/3, 733-744.
- Schärli, U. and Kohl, T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. ISSN 0253-1186, Swiss Geophysical Commission (Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geophysik, Nr. 36). Sieber, Cassina & Partner, 1992. Überbauung Hohlstrasse 8302 Kloten. Pumpversuch, Massnahmen.
- Schmassmann, H., Balderer, W., Kanz, W., Pekdeger, A., 1984. Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Technischer Bericht, NTB 84-21, Baden.
- Schneider, A., Schlanke, S., 1986. Sondierbohrungen K1 - K5: Langzeit-Beobachtungen der Tiefengrundwässer. Nagra Technischer Bericht, NTB 85-11, Baden.
- Signorelli, S., Andenmatten Berthoud, N., Kohl, T., 200. Statistik geothermische Nutzung der Schweiz für die Jahre 2002 und 2003. Schlussbereich, Bundesamt für Energie.
- Stober, I., 1988. Geohydraulische Ergebnisse. In: Bertleff, B., Kozirowski, G., Leiber, J., Ohmert, W., Prestel, R., Stober, I., Strayle, G., Villinger, E., Werner, J.: Ergebnisse der Hydrogeothermie-Bohrungen Baden-Württemberg. *Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 30, 27-116.
- Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W.H., Naef, H., Pearson, F.J., Vomvoris, S., Wilson, W., 1994. Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht, NTB 93-01, Baden.

## 9. Anhang

*Tabelle 9: Zusammenstellung von Bohrungen in der Nordostschweiz, in denen das Kristallin erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 5.2) und der Isohyspenkarte Top Kristallin (siehe Kapitel 5.35.2) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Kristallin [m ü.M.]
Benken	690989	277843	404	-579
Boettstein	659340	268550	347.5	32.2
Herdern	711000	274500	519	-1635.4
Kaisten	644641	265623	320.4	23.4
Kreuzlingen 1	729201	276169	538.5	-2011.5
Leuggern	657664	271208	358.8	135.8
Lindau 1	692815	255098	516	-1849
Schafisheim	653620	246760	421.2	-1068.8
Siblingen	680090	286694	574.4	225.4
Weiach	676750	268620	368.7	-1651.3
Weiach 2	676375	268764	336.3	-1659.2
Zurzach Quelle 1	663970	271230	341	-73.8
Zurzach Z3	663740	271480	346	-56

*Tabelle 10: Zusammenstellung von Bohrungen in der Nordostschweiz, in denen der Oberen Muschelkalk erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 5.2) und der Isohyspenkarte Top Oberer Muschelkalk (siehe Kapitel 5.35.2) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Oberer Muschelkalk [m ü.M.]
Acheberg	661930	271450	509	182
Benken	690989	277843	404	-407
Berlingen 1	719685	280195	593	-1653
Beznau	659491	267242	326	110
Birmenstorf	660049	257455	344	210
Böttstein	659340	268550	347.5	226
Densbüren	646455	255054	516	478
Geisslingen 1	669440	273920	379	55
Geisslingen 2	670950	274210	383	49
Hausen-Habsburg HH1	657836	256939	380	99
Herdern	711000	274500	519	-1535
Leuggern	657664	271208	358.8	311
Kreuzlingen	729201	276169	538.5	-1942
Lindau 1	692815	255098	516	-1709
Oberlauchringen 1	667570	274150	366	157
Oberlauchringen 2	668920	275170	393	161
Oberlauchringen 3	669450	273920	378	70
Riniken	656604	261780	385.1	-231
Ruckfeld R1 (Döttingen)	662950	266850	414	-194
Ruckfeld R2 (D1) (Döttingen)	662375	267880	401	23
Schafisheim	653620	246760	421.2	-807
Schinznach-Bad S3	654769	256187	344.6	18
Schwerzen 1	669550	276680	402	266
Siblingen	680090	286694	574.4	397
Tegerfelden T1	663665	268915	397	13
Weiach	676750	268620	368.7	-450
Weiach 2	676375	268764	336.3	-429
Wilchingen	675730	273740	408	276
Zurzach Quelle 1	663970	271230	341	136
Zurzach Z3	663740	271480	346	135

*Tabelle 11: Zusammenstellung von Bohrungen in der Nordostschweiz, in denen der Oberen Malm erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 5.2) und der Isohyspenkarte Top Oberer Malm (siehe Kapitel 5.35.2) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Oberer Malm [m ü.M.]
Benken	690989	277843	404	205
Bergoeschingen	672440	271830	470	428
Berlingen 1	719685	280195	593	-1137
Beuren a. R.	695070	294990	500	420
Bühl	676560	274550	487	442
Eglisau 2	680820	269865	381.82	146
Guenzgen	676540	271440	392	360
Herdern	711000	274500	519	-1130
Kreuzlingen 1	729201	276169	538.5	-1512
Küsnacht 1	689296	241485	642	-2008
Lindau 1	692815	255098	516	-1149
Lottstetten (Nack)	686170	273670	405	153
Schafisheim	653620	246760	421.2	-155
Singen	706600	288800	435	59
Steisslingen	710740	295900	449	296
Weiach	676750	268620	368.7	183
Weiach 2	676375	268764	336.3	212

*Tabelle 12: Zusammenstellung von Bohrungen in der Nordostschweiz, in denen die Obere Meeresmolasse erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 5.2) und der Isohyspenkarte Top Obere Meeresmolasse (siehe Kapitel 5.35.2) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top OMM [m ü.M.]
Aqui 1 (Zürich)	682125	246560	420	119
Bassersdorf	690280	255000	455	191
Berlingen 1	719685	280195	593	-145
Berlingen 2	719600	280883	536	97
Berlingen 3	720142	281379	407	28
Fehraltorf 1	698056	249225	525	131
Goldach	753300	261000	422	68
Herdern	711000	274500	519	-179
Homburg	719150	278850	705	35
Kreuzlingen 1	729201	276169	538.5	-200.5
Kreuzlingen 2	730650	278850	417	-18
Kloten	687350	256200	444	319
Konstanz	730270	281000	400	2
Küsnacht 1	689296	241485	642	97
Lindau 1	692815	255098	516	151
Steckborn	719020	279750	643	71
Zürich Tiefenbrunnen	684200	245350	408	81

*Tabelle 13: Zusammenstellung von seismischen Linien in der Nordostschweiz, die für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 5.2) und der Isohyspenkarten (siehe Kapitel 5.3) verwendet*

NTB 99-08 Profil 1 mit 83-NF-15	83-NF-31_82-NF-30
NTB 99-08 Profil 2 mit 91-NF-58	83-NF-55
NTB 99-08 Profil 3 mit 91-NF-68	83-NS-01
NTB 99-08 Profil 4	83-NS-81
NTB 99-08 Profil 5 mit 91-NF-79	83-NS-91
NTB 99-08 Profil 6a mit 82-NF-00	84-NS-65
NTB 99-08 Profil 6b mit 91-NF-75	84-NS-71
NTB 99-08 Profil 7a	91-NO-58
NTB 99-08 Profil 7b	91-NO-61
75-SE-1/SE-74-1	91-NO-62
82-NF-10	91-NO-66
82-NF-50	91-NO-68
82-NS-70	91-NO-72
82-NS-90_83-NS-91	91-NO-73
82-NX-21	91-NO-75
82-NX-40	91-NO-77
82-NX-60	91-NO-79
83-NF-06	92-NO-77
83-NF-15	

*Tabelle 14: Zusammenstellung von Bohrungen in der Region Basel, in denen das Kristallin erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 6.1).*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Kristallin [m ü.M.]
Otterbach	612450	269700	253	-2395
Rheinfelden	627650	266680	300	-71
Weierfeld	623990	266220	281	-86
Wintersingen	629107	261606	386	-24
Zunzgen	635030	263400	412	156

*Tabelle 15: Zusammenstellung von Bohrungen in der Region Basel, in denen der Oberen Muschelkalk erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 6.1) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Oberer Muschelkalk [m ü.M.]
Eptingen	628357	249040	540	470
Otterbach	612450	269700	253	-1172
Reinach	612525	262126	292	-1422
Rheinfelden	627650	266680	300	288
Riehen 1	615863	270733	285	-1179
Riehen 2	616437	271468	285	-873

*Tabelle 16: Zusammenstellung von Bohrungen in der Region Basel, in denen der Oberen Malm erbohrt wurde. Diese Bohrungen wurden für die Erstellung des geologischen Modells (siehe Kapitel 6.1) verwendet.*

Bohrung	x-Koord	y-Koord	Bohrkote [m ü.M.]	Top Oberer Malm [m ü.M.]
Allschwil 1	607950	267310	277	-45
Allschwil 2	605970	265825	333	-581
Leymen	602740	261300	357	-352
Neuwiler	605780	263200	360	-280
Otterbach	612450	269700	253	-1172
Reinach	612525	262126	292	-435
Riehen 2	616437.4	271468.2	285.3	-155.7