

# Geowissenschaftliche Basisdaten zur Qualitätssicherung bei der Tiefen Geothermie

Ingrid Stober

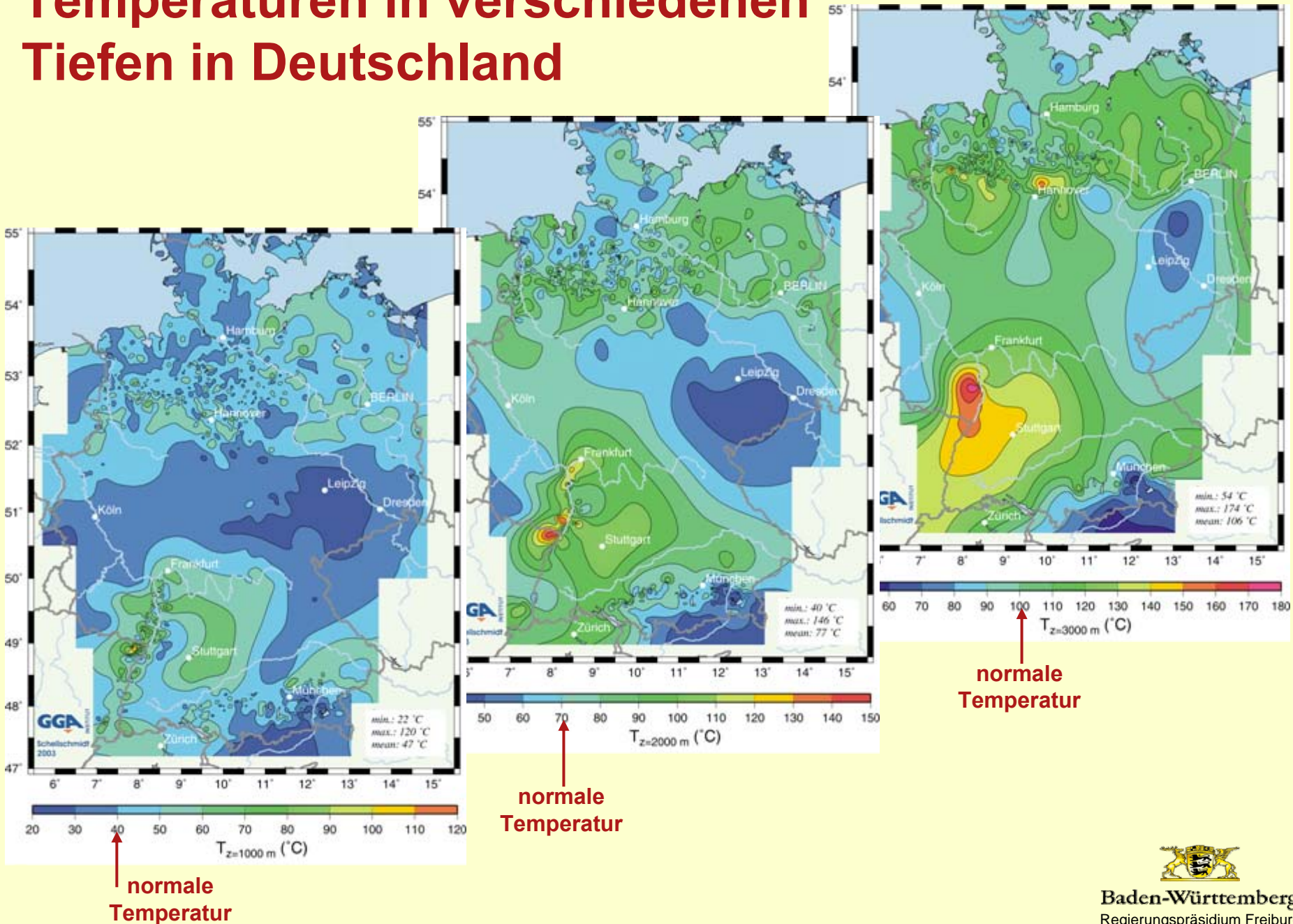


Baden-Württemberg

Regierungspräsidium Freiburg

GeoTHERM  
Messe Offenburg  
28.02.2008

# Temperaturen in verschiedenen Tiefen in Deutschland





# Tiefe Geothermie

Hydrogeothermische Dubletten

Tiefe Erdwärmesonden

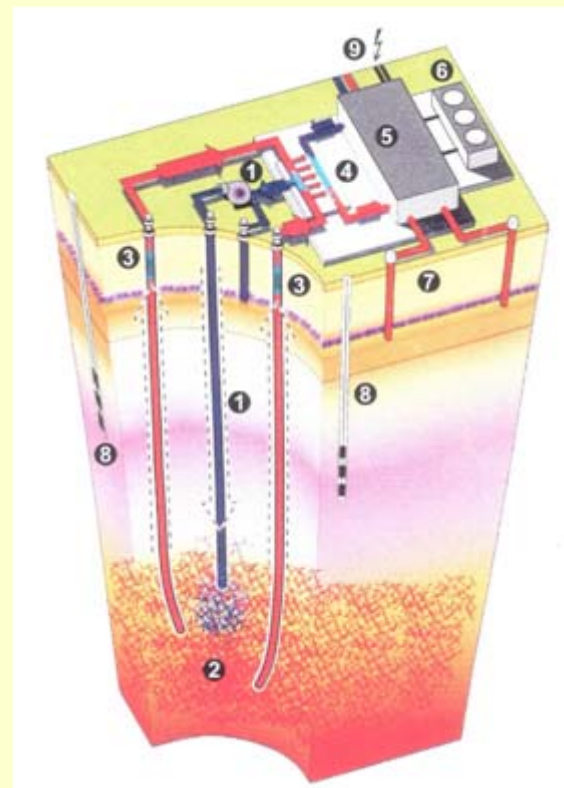
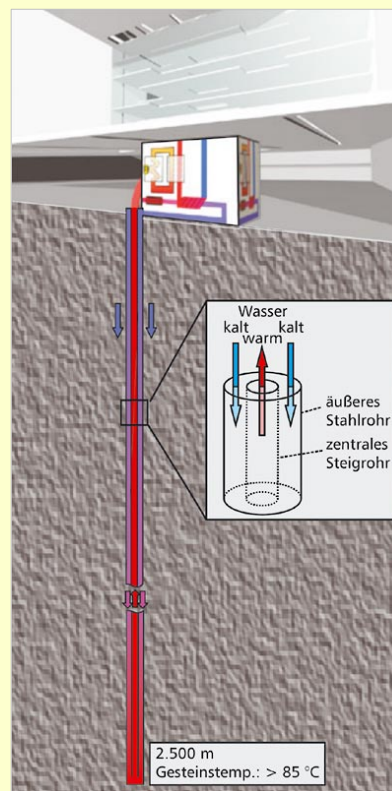
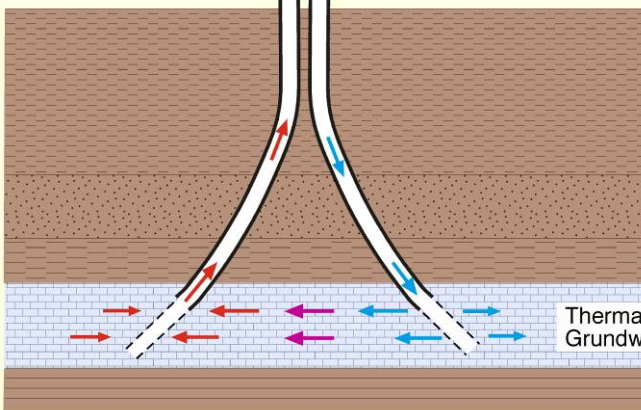
Hot-Dry-Rock-Verfahren

Geothermische Dublette

Wärmepumpe  
Wärmetauscher

Extraktionsbohrung

Injektionsbohrung





# Hydrogeothermie

Die Hydrogeothermie nutzt tiefe, heiße Wasser im Untergrund. Diese sog. **Thermalwässer** zirkulieren in hochdurchlässigen **Grundwasserleitern** in großen Tiefen.

Diese Wässer erhalten ihre gelösten Mineralstoffe, ihre Temperatur und Gasführung aus den unterschiedlichsten Gesteinen.

Mehrere **Anlagen zur Wärme-  
produktion** sind bereits seit vielen Jahren ohne Probleme auch in Deutschland in Betrieb. Zwei Anlagen produzieren **Strom** (Neustadt-Glewe, Landau).



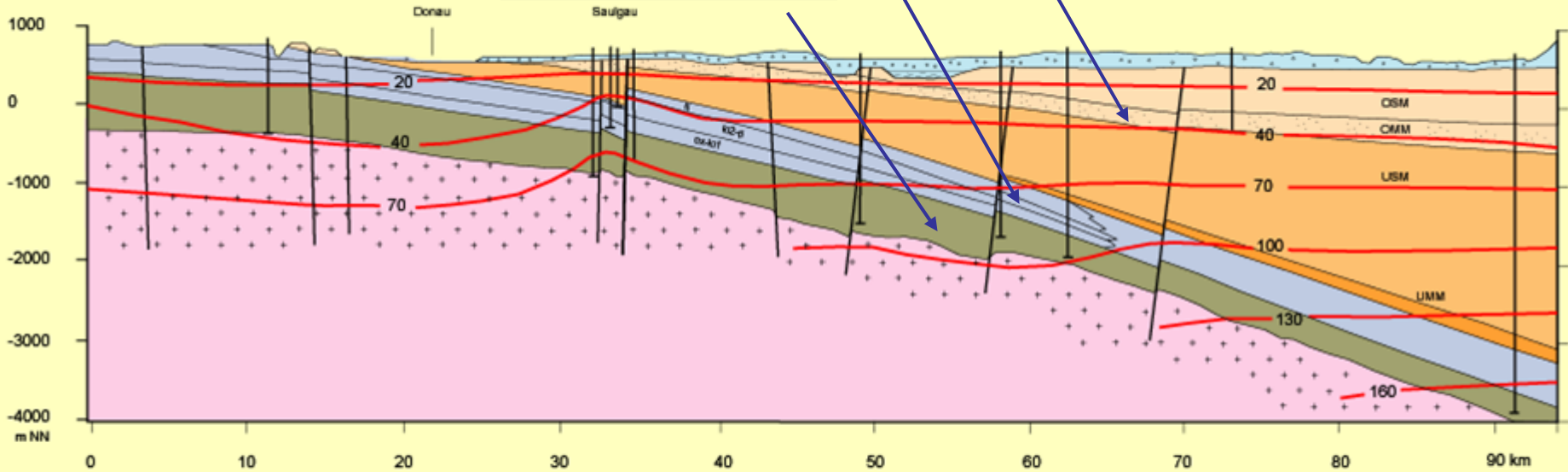
# Hydrogeothermie Molassebecken

*Geothermisch bedeutsame Grundwasserleiter:*



## Schwäbische Alb

## Molassebecken



*Oberer Muschelkalk*      *Oberjura*      *Obere Meeresmolasse*

Legende:

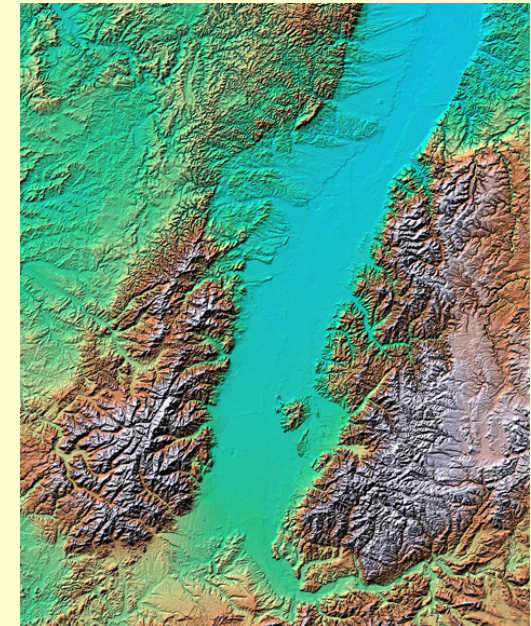
- Bohrung
- Isotherme (°C)
- Talfüllung, glaziale Ablagerungen (Quartär)
- OSM
- OMM
- USM
- UMM
- tertiäre Molasse
- Oberjura
- Unter- u. Mitteljura, Keuper, Muschelkalk, Perm, Permokarbon
- Grundgebirge
- Fazieswechsel

nach BERTLEFF et al. (1987)





# Situation am Oberrheingraben



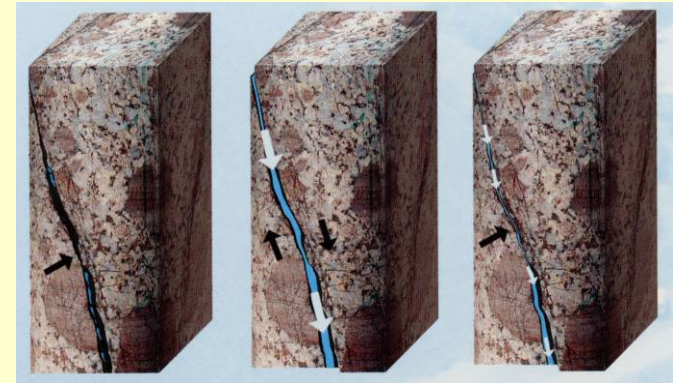
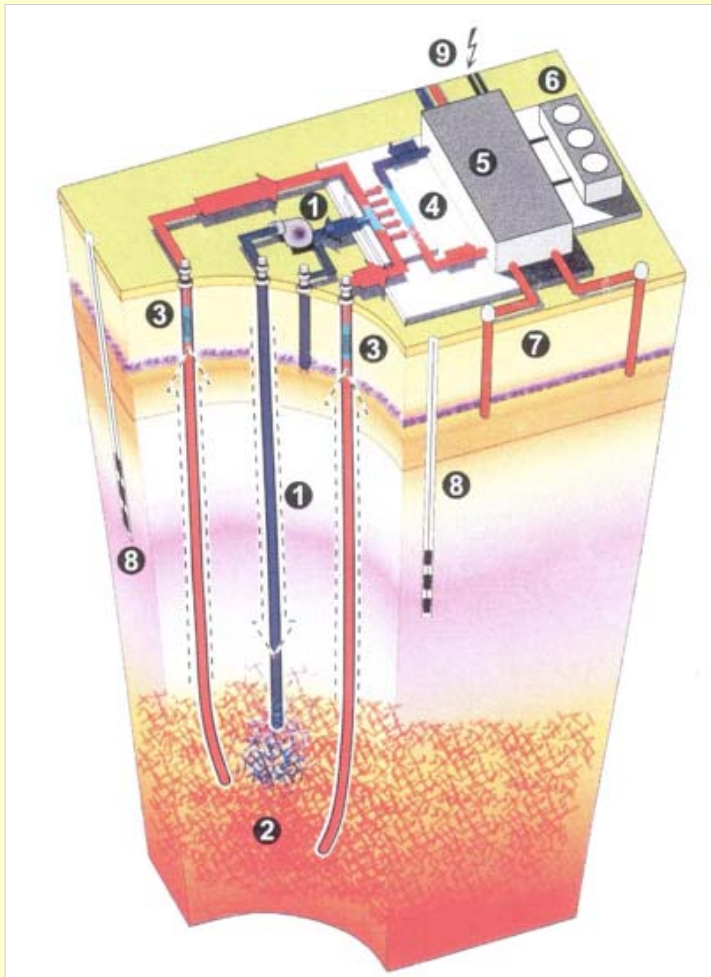
**3 potentielle Thermalwasser-Zielhorizonte:**  
**Tertiäre Sande im N, Hauptrogenstein im S,**  
**Obere Muschelkalk, Buntsandstein**

Die einzelnen Schichten sind zerhackt und liegen in den unterschiedlichen Tiefen (**Schollenmosaik**).

# Tiefe Geothermie: HDR (Hot-Dry-Rock)

Gewinnung geothermischer Energie aus dem kristallinen Grundgebirge (meist Granite, Gneise)

Tiefe: ca. 5000 m,  
Temperatur: ca. 200°C



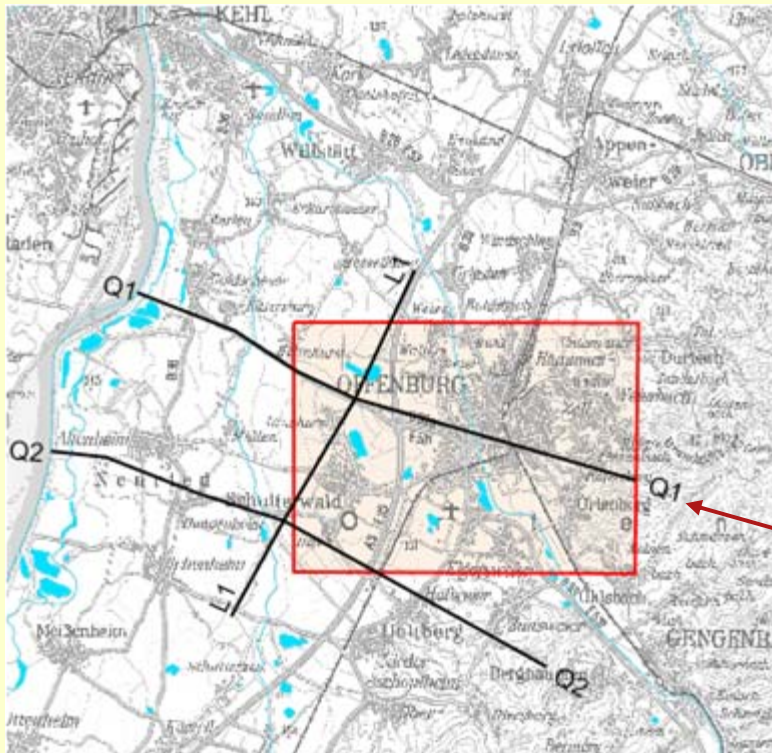
Hydraulische  
Stimulation  
vorhandener Klüfte

## Vorteil:

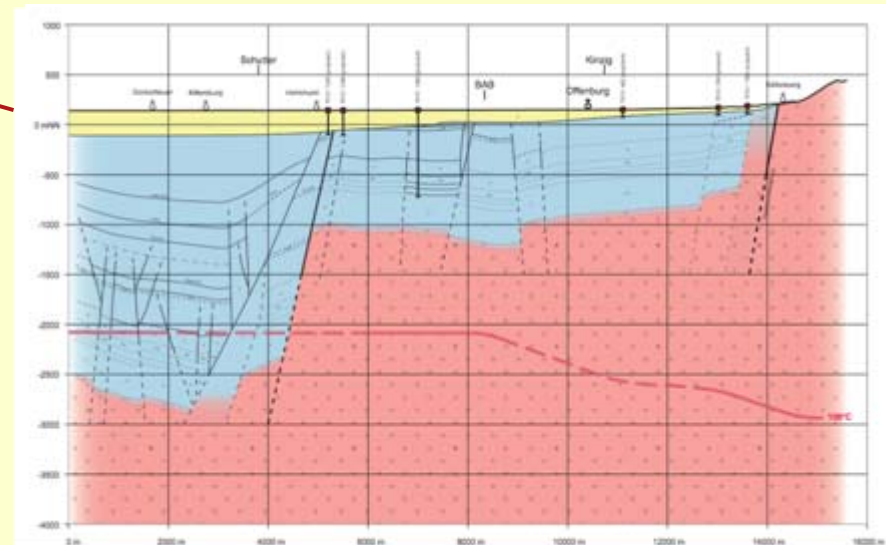
Man ist nicht auf einen thermalen hochdurchlässigen Grundwasserleiter angewiesen. Standortunabhängig

Für HDR-Projekte ist die genau Kenntnis der Durchlässigkeit vor, bei und nach Stimulationsmaßnahmen sowie der Wasserwegsamkeiten wichtig.

# Erforderliche Kenntnisse zur Charakterisierung von Standorten für die Nutzung der Tiefen Geothermie



**Geologischer Bau, Schichtenabfolge, Lage von Störungen, Tektonik (Dehnung-Kompression), Tiefenlage thermaler Grundwasserleiter, Mächtigkeit der Grundwasserleiter, Kluft- oder Karst-Grundwasserleiter ?**



**Hydrochemie der tiefen Wässern, Thermische Eigenschaften, Hydraulischen Eigenschaften?**



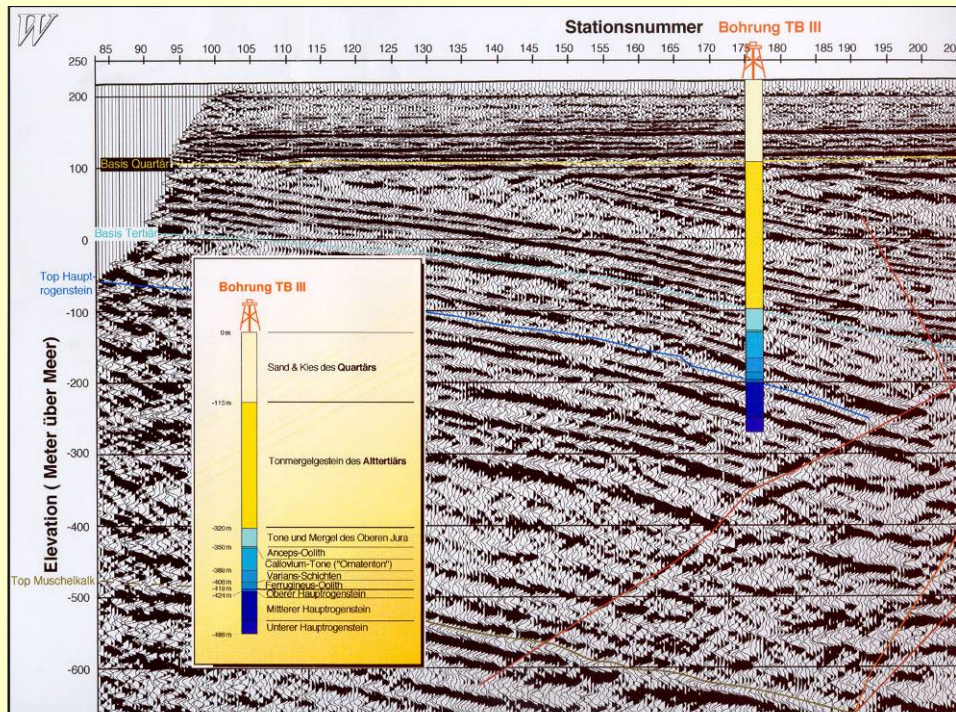


Erkundung der Thermalwasser führenden Schichten im tiefen Untergrund und des Verlaufs von tief reichenden Störungszonen mit modernen geophysikalischen Methoden, Seismik



# Interpretation seismischer Profile

Für die Auswertung der Seismik sind gute Kenntnisse der regionalen Geologie, strukturgeologische Kenntnisse und die Kenntnis aller relevanten Tiefbohrungen erforderlich



## Korrelation seismischer Strukturen mit Schichtgrenzen aus Bohrungen

potentielle Nutzhorizonte:

- Tiefenlage ⇒ Temperaturen
- Schichtdicke ⇒ Ergiebigkeit
- Störungen ⇒ Ergiebigkeit



„vor der Hacke ist es duster“

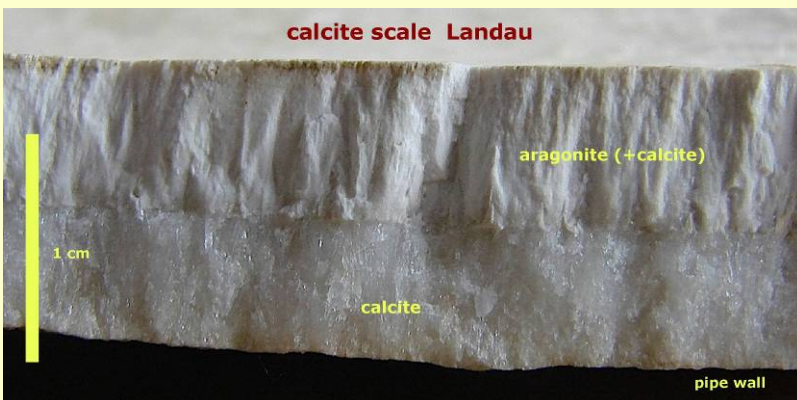
# Eigenschaften der Wässer

Generell sind die Wässer im Oberrheingraben hochmineralisiert (Na-(Ca)-Cl), gasreich (CO<sub>2</sub>,...)

Sorgfältige Beprobung, hydrochemische Analysen sowie thermodynamische Berechnungen notwendig

- Folgen:**
- bei Förderung (Druckentlastung) fällt Kalzit aus
  - bei Entgasung von CO<sub>2</sub> aus den Wässern fällt Kalzit aus
  - bei Sauerstoffzutritt in die Wässer fällt Eisen, Mangan aus

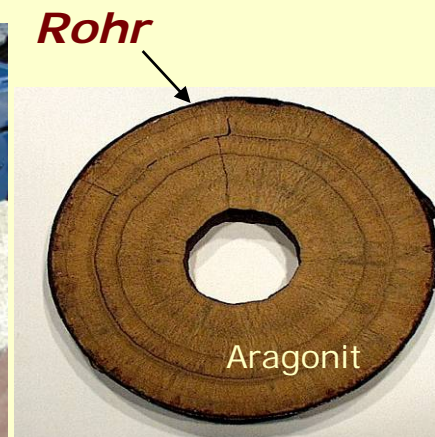
daher müssen die geförderten Wässer übertägig in einem geschlossenen System zirkuliert werden, mit leichtem Überdruck (~10 bar)



Landau: Beschichtung Innenrohr



Bruchsal: Beschichtung Innenrohr



Baden-Baden:  
Leitungsrohr



**Für geothermische Vorhaben und Anlagen müssen bereits in der Planungsphase, Bauphase und Betriebsphase die hydraulischen und thermischen Parameter des Untergrundes bekannt sein**

### **Thermische Parameter:**

Wärmeleitfähigkeit

Wärmekapazität

Temperaturgradient

Wärmestromdichte



### **Hydraulische Parameter:**

Durchlässigkeit ( $T$ ,  $k_f$ ,  $k$ )

Speichereigenschaft ( $n$ ,  $n_d$ ,  $S$ ,  $S_S$ )

Transporteigenschaften ( $u$ ,  $D$ )

hydraulischer Gradient



**Projekt GeotIS**

**(Deutschland, [www.geotIS.de](http://www.geotIS.de)) Förderung: BMU**



## Bereits im Vorfeld

### Abschätzung des Fündigkeitsrisikos:

(Versicherung für Bohrung)

Das **Fündigkeitsrisiko** ist das Risiko, ein geothermisches Reservoir mit einer (oder mehreren) Bohrung(en) in nicht ausreichender **Quantität** oder **Qualität** zu erschließen.

\* **Qualität** = Chemie des Wassers, Gasgehalt

Wässer in Dtl. gelten als handhabbar

\* **Quantität** = thermische Leistung ( $\approx$  **Förderrate** • **Temperatur**)

hydraulische Parameter erforderlich

thermische Parameter erforderlich



# Lebensdauer einer geothermischen Anlage hängt zusätzlich ab von:

Betriebsdaten:

- Förderrate (= Injektionsrate), ← hydraul. Parameter
- Wärmeentzug, d.h Injektionstemperatur, ← therm. Parameter
- Betriebszeit,

Abstand der Bohrungen ('Plazierung Zweitbohrung').

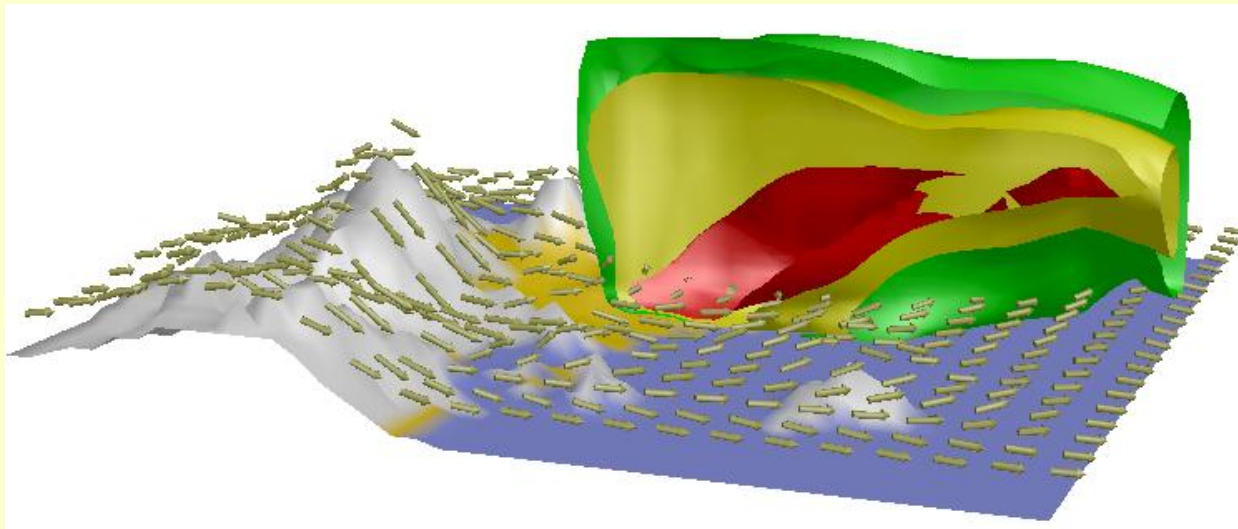
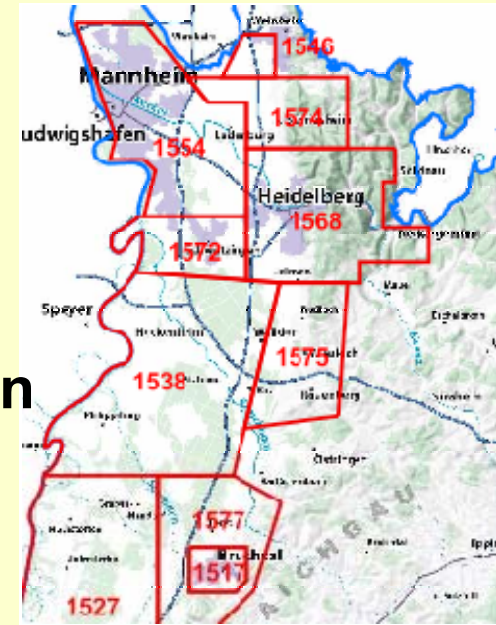
Der Standort für die **Zweitbohrung** (Abstand) unter den Aspekten der Lebensdauer der Anlage wird u.a. durch **numerische Modelle** bzw. mittels **analytischer Berechnungen** festgelegt.

→ Dazu sind thermische, hydraulische und (hydrochemische) Parameter des Reservoirs (Untergrundes) erforderlich.

# Bergrechtliches Bewilligungsfeld

Die Abgrenzung eines bergrechtlichen Bewilligungsfeldes orientiert sich am **hydraulischen und thermischen Einflußbereich** der geothermischen Anlage.

Die Berechnung des Einflußbereichs erfolgt mit numerischen **Strömungs- und Transportmodellen**.





# Thermische Parameter

Den Nachschub an Wärme, also an thermischer Energie, reguliert die **Wärmeleitfähigkeit** des Untergrundes. Die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen liegt bei **2 - 5 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>**.

**Wasser: 0,6 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>** (Luft: 0,02)

- \* Gut durchlässige Aquifere (großer Hohlraumgehalt) haben relativ geringe Wärmeleitfähigkeit.
- \* Die Wärme wird jedoch nicht nur **konduktiv** durch das Gestein, sondern auch **konvektiv** mit dem fließenden Wasser transportiert.
- \* Für hydrothermale Anlagen sind die Durchlässigkeit und Fließgeschwindigkeit entscheidend (anders bei HDR-Anlagen).

Gestein	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Kies, Sand, nass	1,8 - 2,4
Ton, feucht	0,9 - 2,2
Kalkstein	1,7 - 3,4
Sandstein	1,3 - 5,1
Granit	2,1 - 4,1
Gneis	1,9 - 4,0
Quarzit	3,6 - 6,0
Steinsalz	5,4





## Wärmekapazität

Wieviel Wärme im Untergrund gespeichert werden kann, bestimmt die **Wärmekapazität**. Die Wärmekapazität für Festgesteine liegt bei **0,75 - 0,85 kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>**.

### Wasser: 4,19 kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>

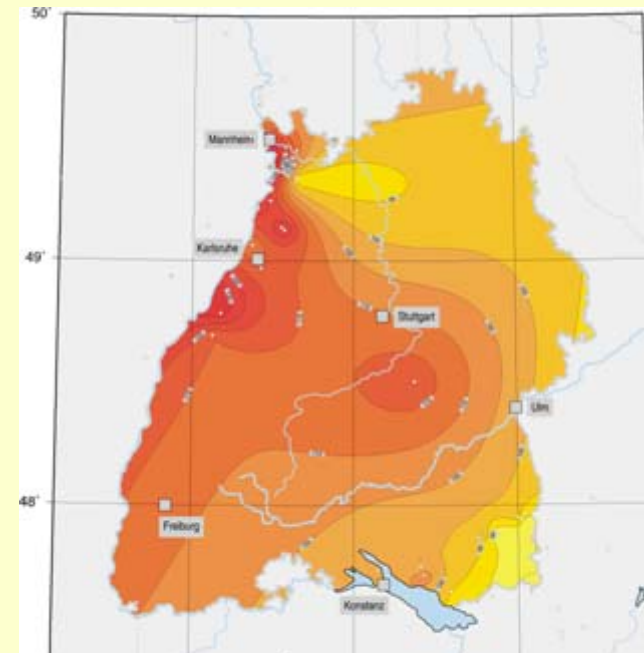
- \* Wasser kann Wärme wesentlich effizienter speichern als Gestein (**Faktor 5-6**).
- \* Bezogen auf das **Volumen** kann Wasser etwa **doppelt so viel Wärme** speichern.
- \* Um 1 m<sup>3</sup> Wasser um 1 °C zu erwärmen benötigt man etwa 2 m<sup>3</sup> Gestein.
- \* Gut durchlässige Aquifere (großer **Hohlraumgehalt**) haben rel. mehr Wärme gespeichert als gering durchlässige (**hydrothermale Anlagen - HDR-Anlagen**)

Die **Wärmeleitfähigkeit** und die **Wärmekapazität** sind von Druck und Temperatur abhängig.

Beide ändern sich daher mit der **Tiefe**. Sie nehmen mit der Tiefe ab.

Der **Temperaturgradient** nimmt daher ebenfalls mit der Tiefe ab, d.h. die Temperatur nimmt mit der Tiefe immer geringer zu.

Die Ermittlung der beiden Parameter erfolgt im Labor. Selten können Lagerstättenbedingungen simuliert werden. ( $\Rightarrow$  Abschätzung)



# Temperaturgradient

Der **Temperaturgradient** gibt an, um wieviel Grad die Temperatur mit der Tiefe zunimmt

(Normalwert:  $\text{grad}T = 2,8 - 3,0^\circ\text{C}/100\text{m}$ )

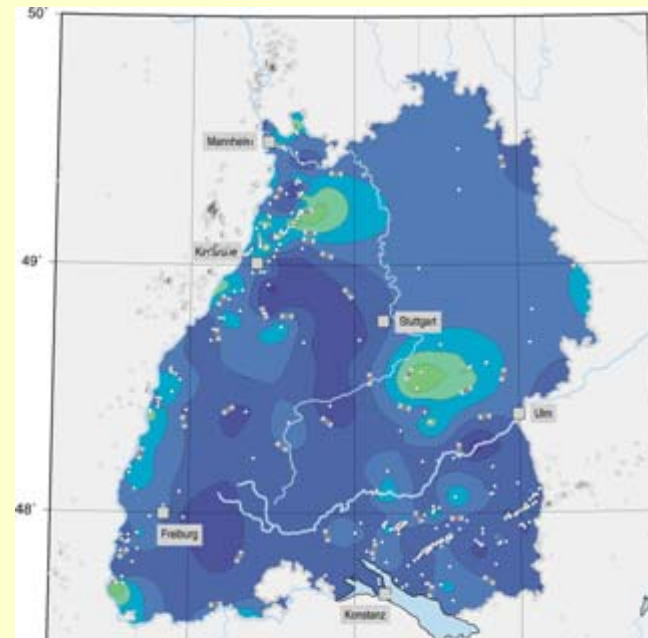
zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) bestimmen sie den Wärmefluss pro Fläche: die **Wärmestromdichte**

(Normalwert:  $q = 65 \text{ mW m}^{-2}$ )

$$q = \lambda \text{ grad}T$$

Der mittlere geothermische Gradient in BW bis 500 m Tiefe beträgt 4,54 °C/100m; höchste Werte: 10 °C/100m.

Die mittlere Wärmestromdichte in BW beträgt 85 mW m<sup>-2</sup>





# Hydraulische Parameter

## Durchlässigkeits-Eigenschaften

Parameter	physikalische Bedeutung	Eigenschaften
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ (m/s)	$k_f = Q/(F i)$	Gestein + Fluid
Transmissivität $T$ (m <sup>2</sup> /s)	$T = Q/(B i)$	Gestein + Fluid
Permeabilität $k$ (m <sup>2</sup> )	$k = k_f/(\rho g/\mu)$	Gestein

Darcy-Gesetz:  $Q/F = k_f i$

$\rho$  - Dichte (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  - dynamische Viskosität (Pa s)

### Speichereigenschaften

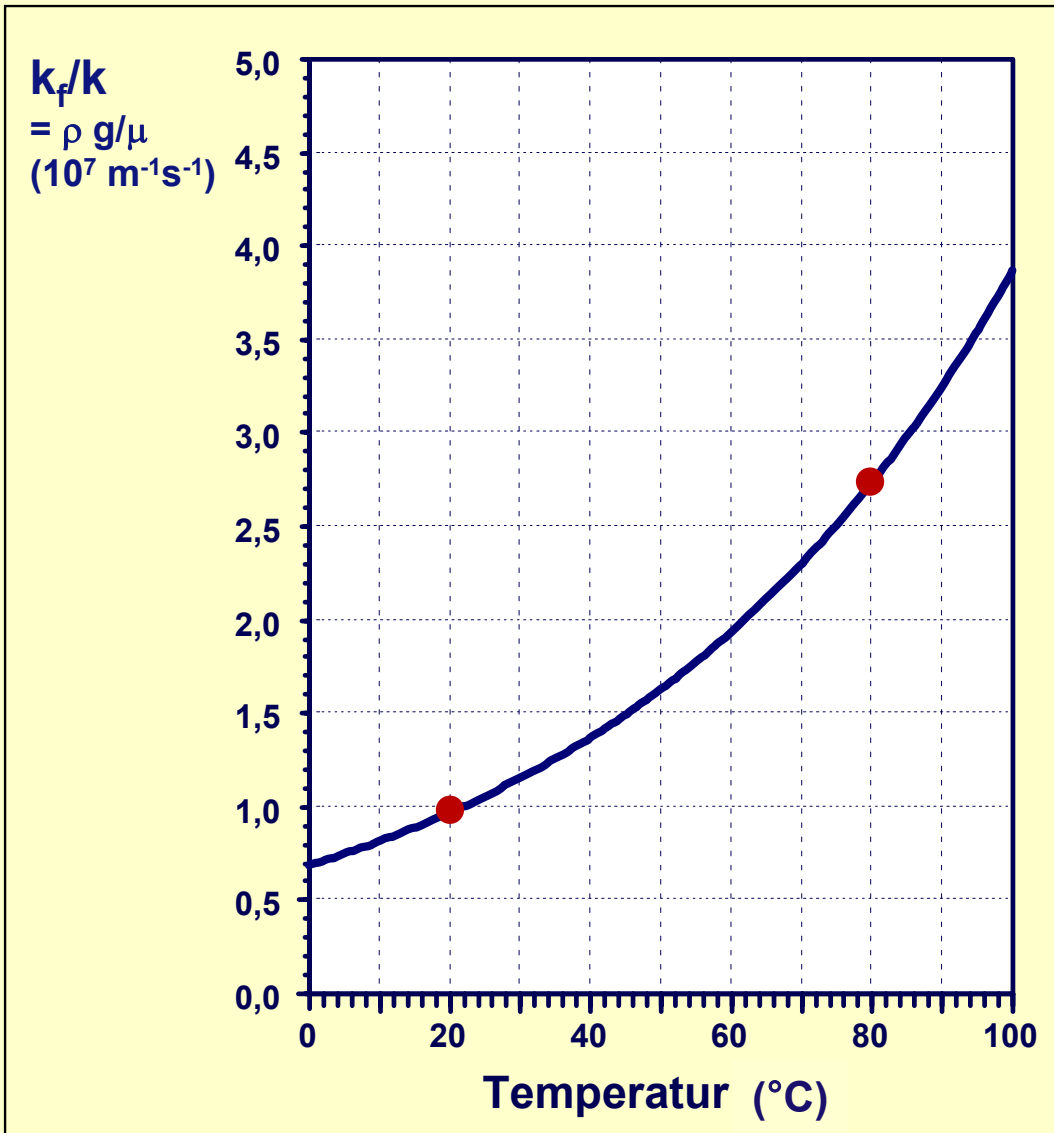
#### Parameter

absoluter Hohlraumgehalt,  $n$  (-)  
durchflusswirksamer Hohlraum.,  $n_d$  (-)  
Speicherkoefizient,  $S$  (-)

#### Eigenschaften

Gestein  
Gestein + Fluid ( $n_d < n$ )  
Gestein + Fluid  
frei:  $S \sim n_d$ , gespannt:  $S \ll n_d$

Geschwindigkeit:  $u = k_f i/n_d$



## Abhängigkeit des $k_f$ -Wertes von den Eigenschaften des Fluids

Vergleich der  $k_f$ -Werte desselben Aquifers bei 20°C und bei 80°C:

$$k_f(80^\circ\text{C}) / k_f(20^\circ\text{C}) = 2.75$$

Der Einfluss der Viskosität ( $\mu$ ) ist wesentlich grösser als derjenige der Dichte ( $\rho$ )

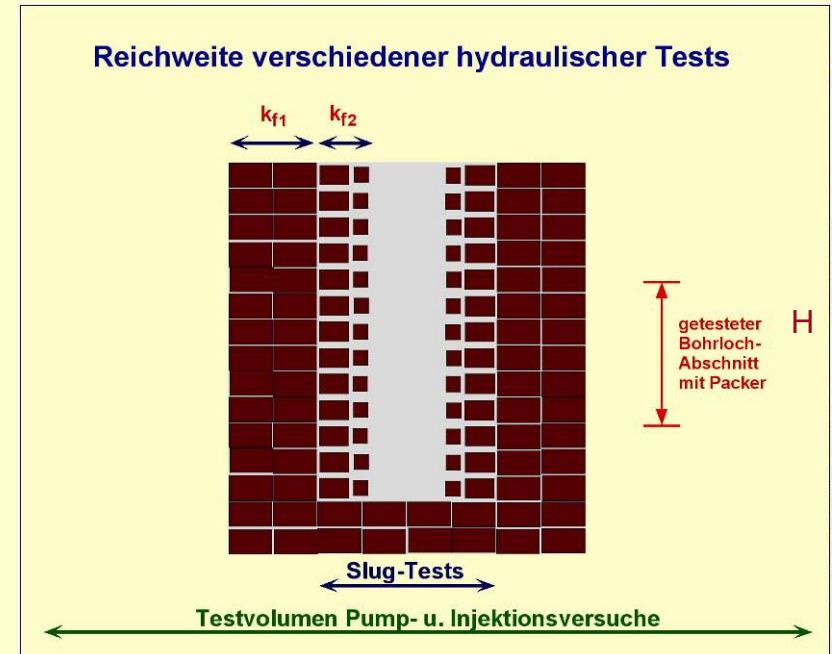
- Injektionsbohrung
- Zirkulationsrate (kg/s statt l/s, Massenerhaltungsgesetz!)

# Berechnung der Durchlässigkeit

**Gesteins-Matrix** ist sehr dicht, daher:  
\* nicht im Labor,  
\* nicht aus Bohrlochvermessungen  
Keine **Poro-Perm-Daten!**



Oberer Muschelkalk  
Talmühlequelle bei Horb



**Klüfte, Verkarstung** macht die Durchlässigkeit  
⇒ **Versuche in Bohrungen**

- Teststrecke, Aquifermächtigkeit (H)
- direkte Bestimmung von T,  
daraus Berechnung von  $k_f$  ⇒ **Thematik: H**
- Art des Tests, Auswerteverfahren  
⇒ **Thematik: Reichweite**



# Anmerkungen zur Durchlässigkeit

Poro-Perm-Daten (Labor, geophysikal. Logs) besitzen keine Aussagekraft für geothermische Nutzungen

Nur Hydraulische Tests liefern die Durchlässigkeit und Speichereigenschaft

Durchlässigkeit und Speichereigenschaft werden nicht nur vom Gesteinsverband geprägt, sondern auch vom Fluid:

- \* Art des Fluids: Wasser, Wasser-Gas-Gemisch,.... (Dichte, Viskosität)  
Dicke des Haftwasserfilms (Größe des durchströmbaren Hohlraums)
- \* Wasserinhaltsstoffen: Gesamtlösungsinhalt, Salinität, Spureninhaltsstoffe,.. (Dichte)
- \* Druck (Dichte)
- \* Temperatur (Viskosität)

„Parameter“ sind auch von der Wahl des hydraul. Tests (Slug-Test, Pumpversuch,...), von der Güte der Auswertung (Modell) und von der Interpretation des Zuflussbereichs (H) abhängig.

# Überblick über die für die verschiedenen geothermischen Nutzungssysteme relevanten natürlichen Parameter

	<b>Hydrothermale Nutzung</b>	<b>HDR</b>	<b>Erdwärmesonde</b>	<b>Abschnitt-Nr.</b>
Temperatur	1	1	1	1.2
Wärmestromdichte	2	2	2	1.3
<b>hydraulische Parameter</b>				
Permeabilität / Durchlässigkeit	1	2	3	3.3
Transmissivität / Transmissibilität	1	3	3	3.4
Porosität	1	3	3	3.5
Speicherkoeffizient	2	3	4	3.6
Produktivitätsindex	1	3	4	3.7
hydraulische Tests	1	1	4	4
<b>thermophysikalische Gesteinseigenschaften</b>				
Wärmeleitfähigkeit	3	2	1	2.1
Gesteinsdichte	3	2	1	2.2
Wärmekapazität	3	2	1	2.3
<b>Fluideigenschaften</b>				
Dichte, Viskosität, Kompressibilität.	1	2	4	8
pH, E <sub>H</sub> , Temperatur	1	1	3	8
Gase, Gasanalyse	1	1	2	8
Gesamtkonzentration (TDS)	1	1	3	8
Anionen - Kationen (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , ...)	1	1	3	8
Undissoziierte Stoffe	1	1	4	8
Problemstoffe (z. B. As, radioaktive Inhaltsstoffe)	2	2	3	
<b>geologische Eigenschaften</b>				
Störungen, Spannungsfeld	2	1	3	10, 11
Petrographie / Gesteinsart	1	1	2	11
Geometrie des Aquifers / Wärmeaustauschfläche	1	1	4	7, 11

**PK Tiefe Geothermie**  
([www.infogeo.de](http://www.infogeo.de))

- 1 - wichtig
- 2 - relevant
- 3 - geringe Bedeutung
- 4 - keine Bedeutung







# Qualitätsmanagement

**Die Güte, Machbarkeit und Lebensdauer eines geothermischen Nutzungssystems steht und fällt auch mit dem Grad der Kenntnis des geologischen Untergrundes und seiner Eigenschaften:**

- **Geologischer Bau, Schichtenabfolge, Lage von Störungen,**
- **Tektonische Verhältnisse (Dehnung-Kompression),**
- **Tiefenlage der thermalen Grundwasserleiter, Kluft- oder Karst-GW,**
- **Mächtigkeit des Grundwasserleiters,**
- **Hydrochemie der tiefen Wässern, Gasgehalte,**
- **Thermische Eigenschaften,**
- **Hydraulischen Eigenschaften**

**Primäres Ziel sollte daher bereits im Vorfeld die Erkundung der Eigenschaften des Untergrundes sein.**



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

