

Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie)

– Arbeitshilfe für Geologische Dienste –

Vorwort

Der Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) hat am 23./24.09.2004 der Ad Hoc AG Hydrogeologie der staatlichen geologischen Dienste (SGD) den Auftrag erteilt, zwei Personenkreise (PK) zu den Themen „Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials“ und „Nutzung des tiefen geothermischen Potenzials“ einzurichten. Die beiden PK sollen einen bundeseinheitlichen digitalen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung geothermischer Daten erarbeiten.

Der PK „Tiefe Geothermie“ traf sich zu seiner konstituierenden Sitzung am 13.04.2005 und hat in der Sitzung am 15.06.2005 beschlossen, zunächst eine Arbeitshilfe für die Nutzung der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund zu erstellen. Sie soll einen Überblick über Verfahren, Datengrundlage und Planungsschritte für Projekte der tiefen Geothermie geben. Zielgruppe sind die staatlichen geologischen Dienste, Bergbehörden und ggf. Planer und Entscheidungsträger für Geothermieprojekte. Die hier vorliegende Arbeitshilfe wurde vom PK „Tiefe Geothermie“ am 22.06.06 abschließend behandelt und vom BLA-GEO in seiner Sitzung am 27./28.09.06 verabschiedet.

Die Arbeitshilfe wird ergänzt durch eine ausführliche Tabelle von Projekten der tiefen Geothermie, die in Deutschland im Betrieb, im Bau oder in Planung sind. In einem weiteren Papier werden die für die jeweiligen geothermischen Nutzungen zu erfassenden geowissenschaftlichen Datenfelder bzw. Parameter definiert. Zusammen mit der Arbeitshilfe stellt es den Produktkatalog für die Nutzung des tiefen geothermischen Untergrundes dar.

Die entsprechenden Daten sollen dann im Rahmen des im Aufbau befindlichen Geothermischen Informationssystems für Deutschland der Fachöffentlichkeit in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden.

Die vorstehende Arbeitshilfe wurde vom PK Tiefe Geothermie der Ad Hoc AG Geologie des Bund-Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) erstellt. Mitglieder im PK Tiefe Geothermie waren: R. Blum, H.-G. Fritsche, T. Fritzer, M. Göthel, H. Huckenriede, J. Iffland, T. Kärcher, M. Kracht, W. Kuhn, M. Pasternak, S. Pester, I. Rappsilber, R. Schellschmidt, R. Schulz, I. Stober, C. Thomsen, T. Walter, P. Wolf und V. Wrede. Der Personenkreis wurde von Frau I. Stober geleitet. Wir hoffen, hierdurch den Geologischen Diensten und Bergbehörden eine Handreichung für die Beurteilung von Anträgen oder Gutachten geothermischer Nutzungen aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) geben zu können.

Inhalt

1	Allgemeines zur Tiefen Geothermie	3
2	Thermische Eigenschaften des Nutzhorizontes.....	5
3	Hydraulische Eigenschaften des Nutzhorizontes.....	6
3.1	Durchlässigkeitseigenschaften	6
3.2	Speichereigenschaften.....	7
3.3	Untersuchungsmethoden	8
3.4	Produktivitätsindex	10
4	Hydrothermale Nutzung (Aquifere).....	10
4.1	Dublette.....	10
4.2	Fündigkeit.....	12
4.3	Bohrungsabstand	12
4.4	Wirtschaftlichkeit	14
5	Geologische Störungszonen.....	14
6	Hot-Dry-Rock-Verfahren	15
6.1	Grundprinzip.....	15
6.2	Voraussetzungen	16
6.3	Vorerkundungen.....	17
6.4	Langzeitverhalten	17
7	Tiefe Erdwärmesonden	18
8	Tunnel, Kavernen, Bergwerke	20
9	Checkliste für eine hydrothermale Nutzung.....	20
10	Literaturliste, Regelwerke, Quellen, Links	22
10.1	Verwendete Literatur	22
10.2	Verwendete Regelwerke	22
10.3	Weiterführende Literatur.....	23
10.4	Atlanten und Karten.....	23
10.5	Quellenhinweise für Abbildungen:	24
10.6	Links.....	24

1 Allgemeines zur Tiefen Geothermie

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde (VDI-RICHTLINIE 4640). Synonyme sind **Erdwärme** oder auch **Geothermie**.

Erdwärme steht generell überall und jederzeit zur Verfügung. Bei sachgerechter Bewirtschaftung ist sie praktisch unerschöpflich. Zu einem geringeren Teil (~30%) entstammt die Erdwärme der Gravitationswärme aus der Entstehung der Erde vor 4,5 Mrd. Jahren, der größere Teil (~70%) ist auf den radioaktiven Zerfall von Uran-, Thorium- und Kaliumisotopen in der Erdkruste zurückzuführen. Die Temperatur steigt mit der Tiefe im Mittel um 3 °C pro 100 m an. Die Temperaturzunahme pro Teufenabschnitt wird als Temperaturgradient bzw. geothermischer Gradient bezeichnet und in mK/m gemessen, was der Angabe °C pro km entspricht. Dieser Gradient wird durch den Wärmestrom aus der Tiefe an die Erdoberfläche verursacht. Die Wärmestromdichte beträgt in Deutschland durchschnittlich etwa 70 mW/m².

Die Temperaturverteilung im Untergrund ist nicht einheitlich. In Deutschland gibt es Gebiete, in denen der Temperaturgradient gegenüber dem Durchschnittswert wesentlich erhöht ist. In manchen Bereichen des Oberrheingrabens, im Gebiet von Bad Urach am Fuß der Schwäbischen Alb, bei Landshut in Bayern oder in einzelnen Bereichen im Norddeutschen Becken nimmt die Temperatur um 5 °C, teilweise sogar über 10 °C pro 100 m zu. In diesen Bereichen liegen so genannte positive Temperaturanomalien vor. Für die Nutzung der geothermischen Energie hat dies den Vorteil, dass die gewünschte Temperatur in geringerer Tiefe erreicht wird als in „normalen, ungestörten“ Gebieten und dadurch niedrigere Bohrkosten sowie geringere Investitionskosten anfallen.

Geothermische Systeme lassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Wenn man gleichzeitig die Tiefe der Wärmegegewinnung und die Nutzungsart der geothermischen Energie berücksichtigen will, bietet sich die Unterteilung in tiefe und oberflächennahe Geothermie an (Abb. 1). Diese Unterscheidung ist auch deshalb sinnvoll, weil neben den unterschiedlichen Techniken zur Energiegewinnung unterschiedliche geowissenschaftliche Parameter zur Beschreibung der Nutzungsarten erforderlich sind.

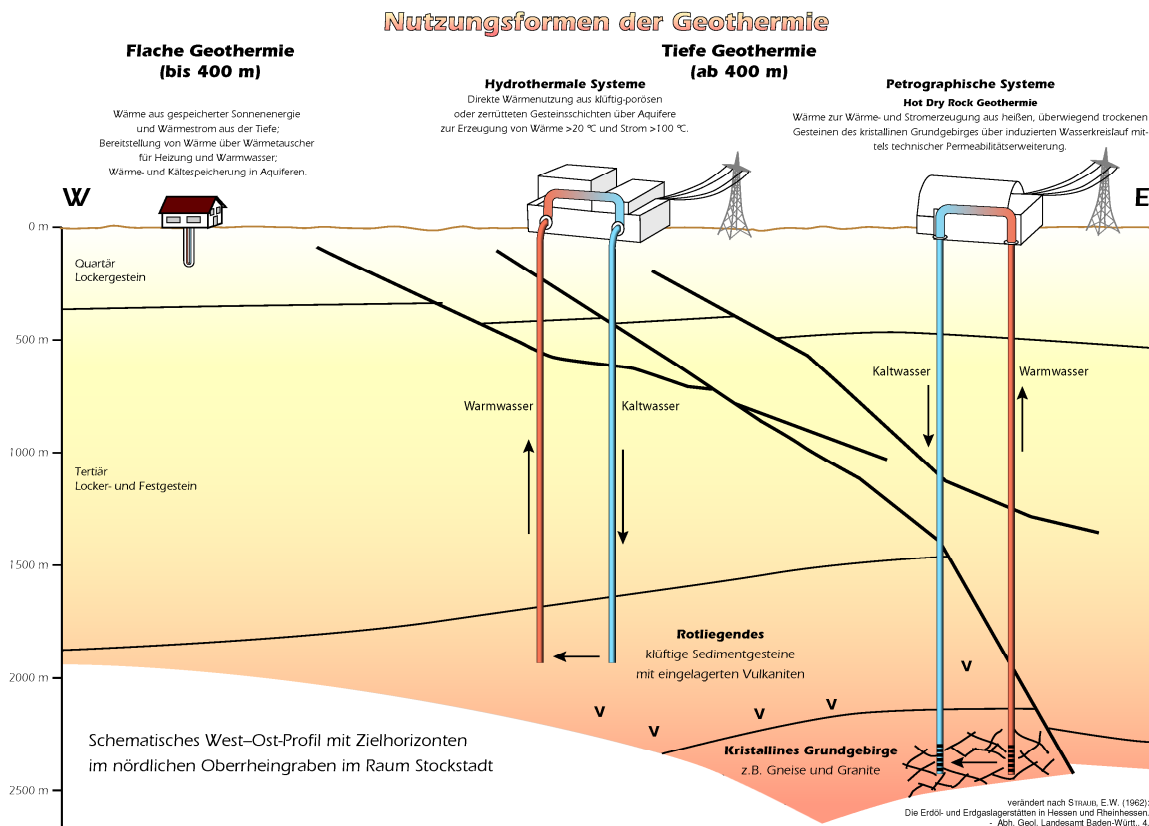


Abb. 1: Beispiele für Nutzungsformen der Geothermie

Die **tiefe Geothermie** umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveaueinhebung) genutzt werden kann.

Nach dieser Definition gehören zur tiefen Geothermie insbesondere folgende Systeme:

- **Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie (Wärmeinhalt):**
Überwiegend Nutzung des im Untergrund vorhandenen Wassers; sie erfolgt meist direkt (ggf. über Wärmetauscher), zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen, zur landwirtschaftlichen oder industriellen Nutzung oder für balneologische Zwecke; ab ca. 100 °C ist eine Verstromung möglich. Beispiele sind:
 - **Aquifere** (Grundwasserleiter) mit heißem (> 100 °C), warmem (60 – 100 °C) oder thermalem (> 20 °C) Wasser.
 - **Störungen bzw. Störungszonen** im gleichen Temperaturbereich (Potenzial abgeschätzt (JUNG et al. 2002), Realisierung bisher für energetische Nutzung nicht erfolgt).
- **Hydrothermale Systeme mit hoher Enthalpie:**
Nutzung von Dampf- oder Zweiphasensystemen zur Stromerzeugung; in Deutschland nicht vorhanden.

➤ **Petrothermale Systeme:**

Überwiegend Nutzung der im Gestein gespeicherten Energie. Beispiele für diese Nutzungssysteme sind:

- **Hot-Dry-Rock-Systeme (HDR)**, auch Deep Heat Mining (DHM), Hot Wet Rock (HWR), Hot Fractured Rock (HFR) oder Stimulated Geothermal System (SGS) genannt. Der umfassende Begriff ist Enhanced Geothermal Systems (EGS). Es handelt sich hierbei um eine Energiegewinnung aus dem Gestein selbst; sie ist also weitgehend unabhängig von wasserführenden Strukturen. Das heiße Gestein (meist Grundgebirge) wird als Wärmetauscher genutzt. HDR-Systeme werden primär zur Stromerzeugung eingesetzt.
- **Tiefe Erdwärmesonden:** Energienutzung aus einer beliebigen Gesteinsabfolge mit geschlossenem Kreislauf des Wärmeträgermediums in der Sonde; nur zur Wärmeversorgung.

Ein weiterer Bereich der tiefen Geothermie ist die Nutzung der geothermischen Energie aus **Bergwerken, Kavernen, Tunneln** sowie die **Speicherung** von Energie in hydro- oder petrothermalen Systemen.

Im Gegensatz zur tiefen Geothermie wird bei der **oberflächennahen Geothermie** die geothermische Energie dem oberflächennahen Bereich der Erde (meist bis 150 m, max. bis 400 m Tiefe) entzogen, z. B. mit Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfählen. Direktheizungen im Niedrigsttemperaturbereich (z. B. Heizung von Weichen) über Heat-Pipes bspw. mit CO₂ als Wärmeträgermedium sind in der Entwicklung.

Nach dieser Abgrenzung beginnt die tiefe Geothermie bei einer Tiefe von mehr als 400 m (vgl. VDI-RICHTLINIE 4640) und einer Temperatur von über 20 °C. Von tiefer Geothermie im eigentlichen Sinn sollte man jedoch erst bei Tiefen von über 1000 m und bei Temperaturen größer als 60 °C sprechen. Einen Sonderfall stellen Bereiche mit aufsteigenden Thermalwässern dar (z. B. Aachen, Baden-Baden, Wiesbaden). Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen fließend sind.

Zur Charakterisierung von Standorten für die Nutzung tiefer Geothermie sind Kenntnisse über wesentliche Eigenschaften des tiefen Untergrundes wichtig, von denen die wesentlichsten in den Abschnitten 2 und 3 beschrieben werden.

2 Thermische Eigenschaften des Nutzhorizontes

Zu den wichtigen thermischen Eigenschaften zählen die **Wärmeleitfähigkeit** λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] und die **spezifische Wärmekapazität** c [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt das Vermögen eines Stoffes thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren, die Wärmekapazität das Vermögen, Wärme zu speichern. Letzterer Parameter ist wichtig für die Charakterisierung transienter, d. h. zeitlich veränderlicher Prozesse.

Eine weitere wichtige Größe ist die **Wärmestromdichte** q [$W\ m^{-2}$], der Wärmestrom pro Fläche. Im Wärmestrom ist der Faktor Zeit integrativ enthalten. Die Wärmestromdichte entspricht dem Produkt aus der Wärmeleitfähigkeit λ und dem **Temperaturgradienten** $\text{grad } T$ [$K\ m^{-1}$] und ist durch die Fouriergleichung definiert, welche die konduktive Wärmeleitung beschreibt:

$$q = \lambda * \text{grad}T \quad (1)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ schwankt im Festgestein zwischen 2 und 6 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$, während die Wärmeleitfähigkeit von Wasser nur 0,598 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ (bei 20 °C) beträgt. Hochdurchlässige Grundwasserleiter mit hoher Porosität besitzen daher eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als Aquifere mit geringerer Durchlässigkeit und Porosität. Die spezifische Wärmekapazität c liegt für Festgesteine zwischen 0,75 und 0,85 $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$; die Bandbreite ist somit sehr gering. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist mit 4,187 $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$ wesentlich größer. Das bedeutet, dass Wasser Wärme zwar schlechter leiten kann als Gestein, dafür aber diese wesentlich besser speichert.

Sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Wärmekapazität sind druck- und temperaturabhängig. Sie werden fast ausschließlich an Bohrproben im Labor gemessen. Meist werden die Werte bei Zimmertemperatur bestimmt, sie können jedoch auch unter Lagerstättenbedingungen ermittelt werden. Durch Kenntnis der Reservoirtemperatur lassen sich für den Fall, dass keine temperatur- und druckabhängigen Messungen vorliegen, Abschätzungen treffen.

3 Hydraulische Eigenschaften des Nutzhorizontes

3.1 Durchlässigkeitseigenschaften

Die **Permeabilität** und der **Durchlässigkeitsbeiwert** (hydraulische Leitfähigkeit) beschreiben die Durchlässigkeit eines Mediums gegenüber einer viskosen Flüssigkeit mit einer bestimmten Dichte, wobei sich die Permeabilität auf die Gesteinseigenschaften beschränkt und der Durchlässigkeitsbeiwert die Eigenschaften des z. T. hoch mineralisierten und gasreichen Wassers zusätzlich einbezieht. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [$m\ s^{-1}$] gibt an, welcher Volumenstrom Q [$m^3\ s^{-1}$] bei einem hydraulischen Gradienten i [-] pro Fläche A [m^2] strömt:

$$k_f = \frac{Q}{i * A} \quad (2)$$

Die Permeabilität K [m^2] steht mit dem Durchlässigkeitsbeiwert unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Wassers (Viskosität μ , Dichte ρ) in Beziehung: 0

$$k_f = K * \left(\frac{\rho * g}{\mu} \right) \quad (3)$$

wobei g die Erdbeschleunigung ist. Beide Parameter (k_f , K) können richtungsabhängig sein und werden dann als tensorielle Größen geschrieben. Für die Permeabilität wird häufig auch die Maßeinheit Darcy verwendet (1 Darcy = $0,98697 \cdot 10^{-12}\ m^2$).

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist von zentraler Bedeutung, wenn es um die Quantifizierung von Stoffflüssen im Untergrund geht. Er geht als Faktor in das **Darcy-Gesetz** ein (Gl. 2). Kennt man den durch den Grundwasserfluss erfassten Querschnitt, so lässt sich dadurch die Wassermenge pro Zeiteinheit Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] bestimmen. Das Darcy-Gesetz ist streng genommen nur im Bereich laminaren (linearen) Fließens gültig. Bei sehr geringen Durchlässigkeiten mit äußerst niedrigen hydraulischen Gradienten sowie bei sehr hohen Durchlässigkeiten mit extrem hohen Gradienten sind jeweils andere Fließgesetze gültig. Beide Extreme liegen jedoch bei hydrothermalen Nutzungen i. d. R. nicht vor.

Das Darcy-Gesetz ist Grundlage aller **hydraulischen Tests** in Bohrlöchern. Bei diesen Tests wird von der Förder- oder Injektionsrate und den beobachteten Gradienten (Wasserspiegel-Absenkung und -Anstieg, Druckauf- und -abbau) auf die Durchlässigkeit des Untergrundes geschlossen. Dabei ergibt sich jedoch nicht direkt die oben beschriebene Permeabilität oder der Durchlässigkeitsbeiwert, sondern man erhält primär einen integralen Wert über den Testhorizont (Aquifermächtigkeit H), die Profildurchlässigkeit oder auch **Transmissivität** T [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]. Ist der Grundwasserleiter homogen und isotrop, so kann der Durchlässigkeitskoeffizient direkt aus der Transmissivität errechnet werden

$$T = k_f * H \quad (4a)$$

Ist der Aquifer schichtig aufgebaut (Stockwerksbau), so repräsentiert die Transmissivität des Aquifers die Summe der Einzeltransmissivitäten der Schichten:

$$T = \sum k_{f,i} * H_i \quad (4b)$$

oder allgemein:

$$T = \int k_f * dh \quad (4c)$$

Zwischen Transmissivität und der so genannten **Transmissibilität** [m^3] besteht die gleiche Beziehung wie zwischen Durchlässigkeitsbeiwert und Permeabilität (Gl. 3).

3.2 Speichereigenschaften

Der **Hohlraumanteil** n [-] ist der Quotient aus dem Volumen aller Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen (engl. porosity). Er charakterisiert das Speichervermögen eines Aquifers und umfasst sowohl die Hohlräume bzw. Poren der Gesteinsmatrix als auch die durch Haarrisse entstandenen Hohlräume im Gestein bis hin zu Klüften und Kavernen (DIN 4049, Teil 3). Durchlässigkeit und Ergiebigkeit eines Gebirges werden maßgeblich vom Klufnetz und Kavernensystem bestimmt. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil n_f [-] kennzeichnet den Hohlraumanteil, der im Unterschied zum Hohlraumanteil n nur den Teil umfasst, in dem Wasser frei beweglich ist und damit für eine Nutzung zur Verfügung steht (bspw. kein Haftwasser). Der durchflusswirksame Hohlraumanteil bietet Durchlässigkeit, ist jedoch nicht direkt in diese umsetzbar, da zusätzlich auch die Größe, Gestalt und Verbindung der Hohlräume entscheidend sind. Er kann aus Markierungsversuchen oder aus Pumpversuchen bestimmt werden.

Mit Hilfe von hydraulischen Tests kann neben der Transmissivität auch der **Speicherkoeffizient** S [-] ermittelt werden. Der Speicherkoeffizient ist ein Maß für die volumetrische Änderung des gespeicherten Wassers ΔV bei Änderung der Druckhöhe der Wassersäule Δh pro Oberfläche F :

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta h * F} \quad (5)$$

Der **spezifische Speicherkoeffizient** S_s [m^{-1}] bezieht sich nicht auf die Fläche, sondern auf das Volumen. Die Beziehung zwischen Speicherkoeffizient und spezifischem Speicherkoeffizient ist analog der Beziehung zwischen Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwert. Bei homogenen isotropen Grundwasserleitern gilt:

$$S = S_s * H \quad (6a)$$

Bei schichtig aufgebauten Grundwasserleitern wird der Speicherkoeffizient des Gesamtaquifers aus der Summe der Speicherkoeffizienten der einzelnen Schichten ermittelt:

$$S = \sum S_i = \sum S_{s,i} * H_i \quad (6b)$$

und allgemein:

$$S = \int S_s * dh \quad (6c)$$

Der Speicherkoeffizient entspricht im freien Grundwasser dem durchflusswirksamen Hohlraumanteil. Bei gespannten Verhältnissen spielt die Volumenänderung durch die Elastizität der Matrix und des Grundwasserleiters eine Rolle. Je nachdem, ob gespanntes oder ungespanntes Grundwasser vorliegt, unterscheiden sich daher die Speicherkoeffizienten um mehrere Größenordnungen voneinander.

3.3 Untersuchungsmethoden

Zur Bestimmung der Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften des Untergrundes werden in Bohrungen **hydraulische Tests** (Pumpversuche) durchgeführt (DVGW REGELWERK W111). In der tiefen Geothermie stehen meist im engeren Umkreis - vergleichbar der Erdöl-/Erdgasexploration in der ersten Phase der Erkundung - keine weiteren Beobachtungsbohrungen im Sinne eines Messnetzes zur Verfügung. Erst bei Fündigkeit wird eine zweite Bohrung abgeteuft. Durchführung und Auswertung hydraulischer Tests für geothermische Zwecke orientieren sich daher an Verfahren, wie sie bei Tests der Erdöl-/Erdgasindustrie Verwendung finden (z. B. Drillstem-Test, Slug- und Bailtest, Pump- oder Injektionsversuch).

Die Auswertung hydraulischer Tests ist auf Wasserspiegel- oder Druckmessungen in der Produktionsbohrung beschränkt. **Brunnenspezifische Einflüsse**, wie Brunnenspeicherung oder Skineffekt, sind daher zu berücksichtigen. Je länger ein hydraulischer Test dauert, desto größer ist i. d. R. der vom Drucksignal erfasste Raum, die Brunnenspeicherung ist dann nicht mehr wirksam. Die hydraulischen Parameter charakterisieren einen größeren, vom Bohrloch unbeeinflussten Gebirgsbereich.

Zusätzliche Störeffekte in größerer Entfernung, wie Störungszonen (hydraulisch wirksame Ränder), können erkannt werden. Häufig wird der Produktionshorizont unter Einsatz von Packern separat untersucht. Für die Auswertung der unterschiedlichen hydraulischen Tests existiert eine Vielzahl von Auswerteverfahren und -programmen, mit denen die verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen berücksichtigt und die unterschiedlichen Aquifermodelle erkannt und beurteilt werden können (STOBER 1986).

Weitere Anhaltspunkte zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften des Nutzhorizontes können diverse **bohrlochgeophysikalische Verfahren** liefern. In diesem Zusammenhang wird auf das DVGW REGELWERK W110 hingewiesen.

Die folgenden bohrlochgeophysikalischen Messverfahren stellen ein Mindestmaß für geothermische Fragestellungen dar:

- **Temperatur-Log**, ermittelt die Temperatur in der Bohrlochflüssigkeit. Wegen der Störung der Temperatur durch den Bohrvorgang sollte zur Bestimmung der ungestörten Gebirgstemperatur die Messung möglichst mehrfach oder erst nach längerer Stillstandzeit erfolgen. Änderungen im Gradienten können auf Wasserzu- bzw. -abflüsse hinweisen (so genanntes thermisches Flowmeter).
- **Gamma-Ray-Log**, misst die natürliche Gammastrahlung, die vom besonders in Tonmineralen häufig vorkommenden Kalium mit dem radioaktiven ^{40}K -Isotop sowie den Isotopen der Uran- und Thorium-Reihen stammt.
- **Kaliber-Log**, erfasst mit ausfahrbaren Messarmen den Querschnitt einer Bohrung. Es zeigt Ausbruchzonen an.
- **Dichte-Log**, benutzt eine aktive Gammastrahlungsquelle. Die dadurch sekundär erzeugten Gammastrahlen sind ein Maß für die Gesteinsdichte.
- **Akustik- oder Sonic-Log**, misst die Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen im Gestein, die von Material, Klüftigkeit und Porosität abhängt. Hiermit können kontinuierliche Porositätsprofile (Log des Hohlraumanteils) ermittelt werden.

Darüber hinaus gibt es wichtige Verfahren, die je nach Fragestellung eingesetzt werden können oder müssen, wie z. B. zur Bestimmung von Wasserzutritten in Bohrungen (Flowmeter), Güte der Verrohrungszementierung (CBL) sowie weitere Verfahren, die in dem oben genannten DVGW REGELWERK W110 zu finden sind.

Die Größe des Durchlässigkeitsbeiwerts wird maßgeblich von Dichte und Viskosität des Wassers beeinflusst. Die physikalischen Eigenschaften von Wasser sind wiederum vom Gesamtlösungsinhalt (TDS), vom Druck und von der Temperatur abhängig. In der Erdöl- und Erdgasbranche werden daher zur quantitativen Beschreibung einer Lagerstätte anstelle von Durchlässigkeitsbeiwert bzw. Transmissivität und Speicherkoeffizient die fluidunabhängigen Parameter Permeabilität und Porosität benutzt.

Diese beiden Parameter werden in der Erdöl-/Erdgasindustrie häufig nur an **Bohrproben im Labor** bestimmt; sie werden als „**Poro-Perm-Daten**“ bezeichnet. Ein Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität kann empirisch spezifisch für eine Lithologie ermittelt werden. Die im Labor ermittelten Parameter beziehen sich jedoch ausschließlich auf die Gesteinsmatrix; Durchlässigkeit und Ergiebigkeit eines Gebirges

werden allerdings maßgeblich vom Klufnetz und Kavernensystem bestimmt und können daher um mehrere Größenordnungen höher liegen.

3.4 Produktivitätsindex

In der Anwendung interessiert letztendlich die Ergiebigkeit einer Bohrung. Als Kennwert hierfür wird häufig die gegenüber Transmissivität oder Transmissibilität vereinfachte Größe des **Produktivitätsindex** PI [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$] gewählt. Er beschreibt die Förderrate Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] in Abhängigkeit von der Druckabsenkung Δp [Pa] und kann streng genommen nur bei stationären Verhältnissen bestimmt werden. In jedem Fall sind sehr lang dauernde Fördertests notwendig. Im Unterschied zur Transmissivität enthält der Produktivitätsindex auch die brunnenspezifischen Eigenschaften; er ist somit kein reiner Aquiferparameter.

Je nachdem, welche Untersuchungsmethoden gewählt werden, liegen unterschiedliche Durchlässigkeitsparameter (k , k_f , T , T^* , PI), Speicherparameter (n , n_f , S , S_s, \dots) oder Transporteigenschaften des Untergrundes vor bzw. können aus den entsprechenden Untersuchungen ermittelt werden. Nicht jeder Test liefert dieselben Parameter in derselben Genauigkeit. Für eine Validierung sollten daher die Testergebnisse zusammen mit den jeweiligen Testbedingungen und den verwendeten Auswerteverfahren berücksichtigt werden.

4 Hydrothermale Nutzung (Aquifere)

4.1 Dublette

Bei der hydrothermalen Nutzung wird Wasser aus tiefen wasserführenden Gesteinsschichten (Aquifere) gefördert; über einen Wärmetauscher wird diesem die Wärme entzogen. Das so abgekühlte Wasser wird meist in denselben Aquifer in einer bestimmten Entfernung zur Erneuerung (Recharge) zurückgegeben (injiziert). Ein derartiges System (Abb. 2) besteht aus einer Förder- und einer Injektionsbohrung (**Dublette**). Grundsätzlich ist eine Kombination von mehreren Förder- und Injektionsbohrungen möglich.

Da Tiefenwässer häufig eine hohe Mineralisation und hohe Gasgehalte aufweisen, ist die Reinjektion auch aus entsorgungstechnischen Gründen notwendig. Aus hydrogeologischer Sicht ist es problematisch, wenn die Injektion nicht in denselben Aquifer erfolgt, aus dem produziert wird (fehlende Recharge, potentielle Ausfällungen).

Das klassische System einer Dublette besteht aus zwei Vertikalbohrungen in entsprechender Entfernung. Heute werden die Förder- und Injektionsbohrung meist von einem Bohrplatz aus abgeteuft, wobei der Nutzhorizont untertägig durch abgelenkte Bohrungen erschlossen wird (Abb. 2). Die hydraulische Anbindung an den Aquifer ist dabei günstiger als bei Vertikalbohrungen. Die übertägige Anlage ist platz sparend; alle technischen Einrichtungen können an einem Ort installiert werden.

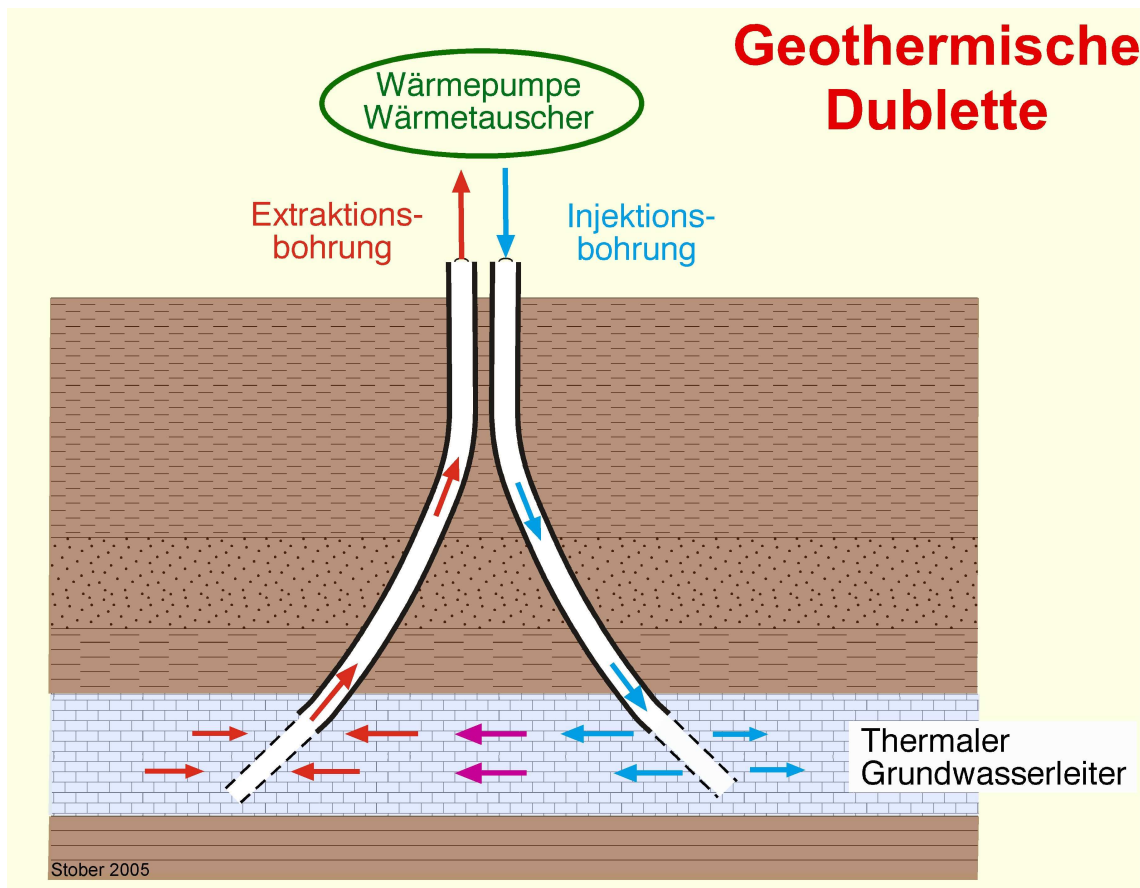


Abb. 2: Schema einer hydrothermalen Nutzung (Dublette)

Die Technik der hydrothermalen Nutzung mittels Dubletten ist weitgehend ausgereift. Besonders in Frankreich, aber auch in Italien, Polen, Österreich oder Deutschland (z. B. Neustadt-Glewe, Waren) existieren bereits seit einigen Jahren, teilweise seit Jahrzehnten hydrothermale Anlagen. Das geförderte und nach der Abkühlung wieder injizierte Wasser zirkuliert übertägig in einem geschlossenen Kreislauf, der oft unter Druck gehalten werden muss, um Ausfällungen von Mineralen aus dem hoch mineralisierten Wasser zu verhindern. Das mit Hilfe einer Tauchpumpe an die Oberfläche geförderte Thermalwasser wird über einen Wärmetauscher geleitet, und die gewonnene **Wärme** in einen sekundären Kreislauf, beispielsweise in ein Fernwärmenetz, eingespeist.

Bei Temperaturen über 100 °C kann mittels zusätzlicher Technologien, wie einer ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle) oder einer Kalina-Anlage (Wasser-Ammoniak-Mischung als Arbeitsmedium), **Strom** produziert werden. Längere praktische Erfahrungen liegen jedoch nur für ORC-Anlagen vor.

Ein Sonderfall der hydrothermalen Geothermienutzung ist die **balneologische Nutzung** von Tiefenwässern in Thermalbädern. Dafür reicht eine einzelne (Produktions-)Bohrung aus.

4.2 Fündigkeit

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

Die Quantität wird dabei über die thermische Leistung, die mit Hilfe einer Bohrung erreicht werden kann, definiert. Diese Leistung P ist proportional zur Förderrate Q und der Temperatur T :

$$P \sim Q \cdot T \quad (7).$$

Unter Qualität versteht man im Wesentlichen die Zusammensetzung (Chemismus) des Wassers. Es könnten Bestandteile im Wasser auftreten (Gase, Salinität, o. ä.), die eine geothermische Nutzung ausschließen oder erschweren. Allerdings galten alle bisher bei geothermischen Bohrungen in Deutschland angetroffenen Wässer hinsichtlich ihrer Zusammensetzung für geothermische Nutzung, zwar mit unterschiedlichem technischen Aufwand, als beherrschbar. Somit gilt eine Geothermiebohrung als **fündig**,

- wenn die Thermalwasser-Schüttung mehr als eine **Mindestförderrate Q** bei einer max. **Absenkung Δs** erreicht und
- wenn eine **Mindesttemperatur T** erreicht wird.

Die Angaben zur Mindestförderrate und -temperatur ergeben sich in der Regel aus den Wirtschaftlichkeitsüberlegungen des Betreibers.

Der für hydrothermale Systeme entscheidende Parameter ist somit neben der Temperatur T des Aquifers die Ergiebigkeit, d. h. die zu erzielende Förderrate Q bei einer noch (wirtschaftlich und technisch) vertretbaren Absenkung (Druckentlastung). In Festgesteins-Grundwasserleitern beruht die Durchlässigkeit und damit die Ergiebigkeit des Aquifers auf dem Vorhandensein von offenen Klüften oder Kavernen, auf einer ausreichenden durchflusswirksamen Porosität sowie auf anderen makroskopischen Hohlräumen, wie sie u. a. in Störungszonen angetroffen werden können. Aquifere können je nach Art ihres überwiegenden Hohlraumanteils in drei Grundtypen unterscheiden werden: porös, klüftig und karstig.

Wird die erwartete Durchlässigkeit bei der Erschließung zunächst nicht angetroffen, so sind **Ertüchtigungsmaßnahmen** erforderlich. Zu diesen Maßnahmen gehören beispielsweise das Säuern bei karbonatischem Gestein oder das hydraulische Stimulieren (hydraulic fracturing) ggf. in Kombination mit einer Säuerung. In Anlehnung an Erfahrungen aus der Erdölindustrie können zur Steigerung der Ergiebigkeit auch Ablenkbohrungen (Sidetracks) im Nutzhorizont durchgeführt werden.

4.3 Bohrungsabstand

Bei diesen hydrothermalen Nutzungen darf es zu keinem **hydraulischen oder thermischen „Kurzschluss“** zwischen Förder- und Injektionsbohrung kommen. Hydraulische Verbindungen zu anderen Grundwasserstockwerken sind durch

entsprechende Abdichtungen auszuschließen; Abb. 3 zeigt ein entsprechendes Schema für eine Injektionsbohrung.

Der Abstand zwischen Injektions- und Förderbohrung muss so groß sein, dass innerhalb des vorgesehenen Bewirtschaftungszeitraums (20 – 30 Jahre) keine nachteiligen Temperaturerniedrigungen in der Förderbohrung infolge der Einleitung des abgekühlten Wassers in den Nutzhorizont über die Injektionsbohrung auftreten können. Bestimmte Mindestabstände zwischen den beiden Bohrungen im Aquifer müssen daher eingehalten werden. Allerdings darf der Abstand auch nicht zu groß sein, damit eine hydraulische Verbindung der beiden Bohrungen und somit eine dauerhafte Ergiebigkeit der Förderbohrung gewährleistet ist.

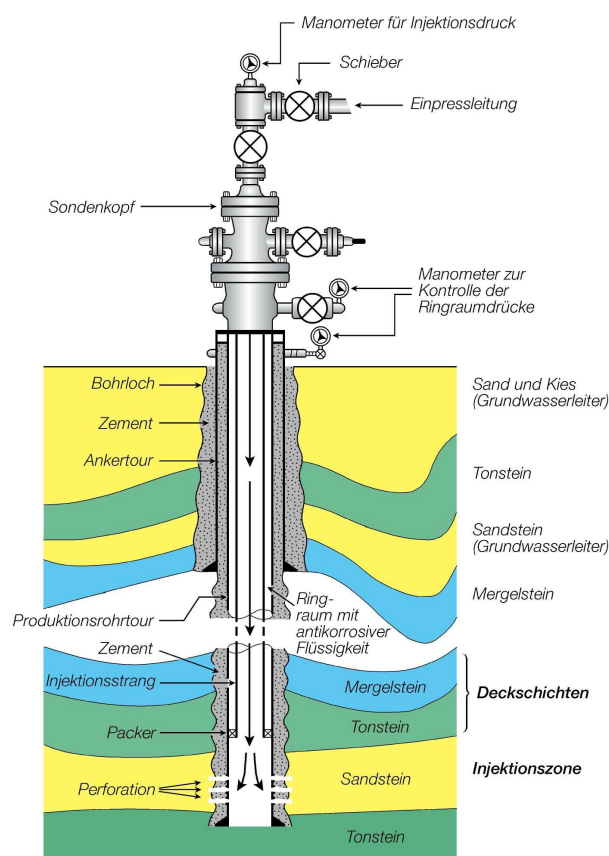


Abb. 3: Schema einer Injektionsbohrung

Mit Hilfe von numerischen Modellen wird versucht, den Abstand zwischen Förder- und Injektionsbohrung zu optimieren. Diese Berechnungen sind auch für die Bemessung von **Bewilligungsfeldern** erforderlich (SCHULZ 2004). Wegen nur beschränkt vorhandener Daten und numerischer Modellannahmen können die Untergrundverhältnisse jedoch nur sehr stark vereinfacht beschrieben werden.

4.4 Wirtschaftlichkeit

Aussagen über Effizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Anlage sind entscheidend von den hydraulischen und thermischen Eigenschaften des Nutzhorizontes sowie der Zusammensetzung des Wassers abhängig. Diese Eigenschaften müssen vorab bestmöglich erkundet werden. Angaben zu den gewählten Untersuchungs- und Auswerteverfahren sind detailliert festzuhalten. Die Entscheidung über die Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen trifft aber letztendlich der Betreiber/Investor aufgrund betriebswirtschaftlicher Überlegungen. Dabei hat die Abnehmerstruktur eine hohe Priorität.

Standorte mit erhöhten Temperaturgradienten (Temperaturanomalien) können zu Kostenersparnissen infolge geringerer Bohrtiefen führen. Allerdings muss immer die zu erzielende Förderrate berücksichtigt werden. Bei der Gewinnung geothermischer Energie fällt Wärme an. Bei Temperaturen oberhalb von 100°C ist mit entsprechender Technologie die Erzeugung von Strom möglich. Dieser Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) macht aufgrund der gegenwärtigen Rahmenbedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) vor allem aus ökonomischen Erwägungen Sinn. Je höher das erzielte Temperaturniveau ist, umso besser ist der elektrische Wirkungsgrad der KWK. Für den wirtschaftlichen Betrieb einer geothermischen KWK-Anlage ist es unabdingbar, die Wärme über ein Nah- oder Fernwärmenetz möglichst ganzjährig zu nutzen. Die Nutzung der Wärme hintereinander auf verschiedenen Temperaturniveaus (Kaskadenprinzip) ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht anzustreben, beispielsweise in der Kombination Fernwärme (90 – 60 °C), Gewächshäuser (60 – 30 °C) und Fischzucht (unter 30 °C). Analoge Überlegungen gelten für die Nutzung beim HDR-Verfahren.

5 Geologische Störungszonen

In der Nutzung von Störungszonen als geothermisches Reservoir besteht derzeit noch wenig Erfahrung. Ihnen wird ein großes Potenzial zugerechnet (JUNG et al. 2002), weil sie natürliche Wasserwegsamkeiten darstellen können, die in große Tiefen reichen. Störungszonen können auch Aquifere in unterschiedlichen Tiefenlagen miteinander verbinden. Abhängig vom Störungstyp, d. h. der Entstehung der Störung, den rezenten Spannungsverhältnissen, aber auch den geochemischen Prozessen, können diese Strukturen sehr gut bis nicht durchlässig sein. Unsicherheiten bezüglich ihrer hydraulischen Eigenschaften einzugrenzen, eröffnet einen Forschungsbereich, der erst die Voraussetzung dafür schaffen muss, diesen Reservoirtyp planbar zu machen.

Die technische Realisierung für eine energetische Nutzung ist in der Regel sehr aufwändig und sehr stark von den geologischen Verhältnissen abhängig. Bei den natürlichen Thermalwasseraustritten, die über Bohrungen bzw. Brunnen gefasst sind und zu balneologischen Zwecken genutzt werden, handelt es sich z. T. um Tiefenwässer, die auf solchen Störungszonen bis oder nahe zur Erdoberfläche aufsteigen und dort genutzt werden.

6 Hot-Dry-Rock-Verfahren

6.1 Grundprinzip

Mit dem HDR-Verfahren soll der tiefere Untergrund als Wärmequelle zur Stromerzeugung und Wärmeabgabe genutzt werden (Abb. 4). Die Gewinnung geothermischer Energie erfolgt unabhängig von Wasser führenden Horizonten, meist aus dem kristallinen Grundgebirge. In jüngster Zeit werden jedoch auch einige Projekte in Sedimentgesteinen durchgeführt. Meist werden ein Temperaturbereich von 150 – 250 °C und Tiefen um 5000 m anvisiert.

HOT-DRY-ROCK - Verfahren Strom und Wärme aus heißem Tiefengestein

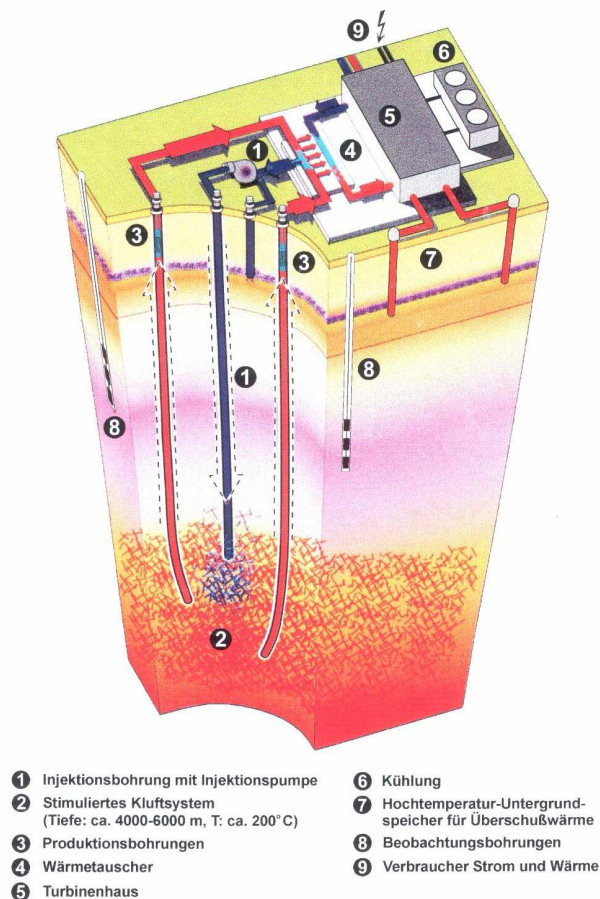


Abb. 4: Schema für ein HDR-Vorhaben

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist das kristalline Grundgebirge der oberen Erdkruste geklüftet. Die Klüfte sind z. T. geöffnet, auf ihnen zirkuliert Wasser, allerdings mit sehr niedrigen Fließraten. Das kristalline Grundgebirge verhält sich also wie ein Aquifer mit geringen Durchlässigkeiten. Durch Aufbringen hoher hydraulischer Drücke wird dieses natürlich vorhandene Kluftsystem geweitet oder es werden künstliche Risse (Fracs, bevorzugt in Sedimentgesteinen) neu geschaffen. Das Gebirge wird sozusagen

stimuliert. Um die notwendigen Durchflussraten und Temperaturen zu erzielen, muss das Riss-System eine Mindestgröße für die Wärmeaustauschfläche aufweisen. Durch diesen „Wärmetauscher“ oder „Durchlauferhitzer“ schickt man Wasser über Injektions- und Förderbohrungen um die Gebirgswärme aufzunehmen.

Das Wasser in den erforderlichen Tiefen ist mit einem **Gesamtlösungsinhalt** von teilweise einigen 10er g/l hoch salinar und hat wahrscheinlich erhöhte Gaskonzentrationen. Die Tiefenwässer sind i. d. R. an der Erdoberfläche bezüglich bestimmter Minerale übersättigt und neigen daher zu Ausfällungen. Zur Vermeidung muss die Wasserzirkulation in einem geschlossenen System mit Überdruck erfolgen.

6.2 Voraussetzungen

Für ein HDR-Vorhaben ist zunächst die **Temperatur** und damit die Bohrtiefe entscheidend; angestrebt werden Temperaturen von über 200 °C. Standorte mit erhöhten Temperaturgradienten sind dabei aus Kostengründen von besonderem Interesse. Als weiteres Auswahlkriterium ist die **Standfestigkeit** des Gebirges zu nennen. Sehr stark gestörte Bereiche sollten im Gebiet der geplanten Stimulationsstrecken und Zirkulationsbereiche gemieden werden. Des Weiteren sollten die **Wasserverluste** möglichst gering bzw. kontrollierbar sein und unter 10% betragen.

Unter der Voraussetzung, dass i. W. nur das vorhandene Kluftnetzwerk ausgenutzt werden kann, sollte die natürliche **Kluftdichte** des Gebirges mittel bis hoch sein. Totale Mylonitisierungen sind unerwünscht. Das natürlich vorhandene Kluftsystem sollte relativ gleichmäßig verteilt sein, um bei den Stimulationen unter dem vorgegebenen Stressfeld eine optimale Größe für die **Wärmeaustauschflächen** zu erhalten. RYBACH (2004) fordert beispielsweise eine Mindestgröße für die Wärmeaustauschfläche von mehr als 2 km². Da **granitische Gesteinsverbände** i. a. wesentlich rigider auf eine tektonische Beanspruchung reagieren als **metamorphe Gebirge**, sind Granitgebirge in unseren Breiten meist durchlässiger als metamorphe (STOBER 1995). Erfahrungen bei HDR-Projekten haben gezeigt, dass sich durch die Stimulation i. d. R. entsprechend dem vorherrschenden Stressfeld ein steil stehendes, ellipsoidförmiges Reservoir ausbildet. Die **Reservoirgröße** sollte ausreichend groß sein und nach RYBACH (2004) mindestens 0,2 km³ betragen. Daraus ergibt sich ein untertägiger **Abstand** bei einem Zwei-Bohrloch-System von etwa 1000 m bei einer Länge des Open-Hole (unverrohrter Bohrlochabschnitt) von etwa 300 m.

Bei den Stimulationsmaßnahmen sollte eine ausreichend große **Durchlässigkeit** generiert werden. Zu hohe Durchlässigkeit (niedrige Impedanz) birgt die Gefahr **hydraulischer Kurzschlüsse** und somit unzureichender Wärmeübertragung. Um dieser Gefahr vorzubeugen und um eine extreme Stimulation singulärer Klüfte zu vermeiden, empfiehlt es sich, die dafür notwendigen Injektionsversuche, falls technisch machbar, abschnittsweise (mit Einsatz von Packern) durchzuführen. Nach derzeitigem Kenntnisstand liegt die Reichweite einer Stimulationsmaßnahme bei mehreren 100 m.

Der Stimulationsbereich bzw. das Reservoir dürfte sich in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung des **natürlichen Stressfeldes** ausbilden.

6.3 Vorerkundungen

Aus hydrogeologischer Sicht wird empfohlen, im Zuge von Erkundungsmaßnahmen für ein HDR-Vorhaben zunächst die ggf. existierende **Prospektions-Seismik** der Erdöl-/Erdgasindustrie geologisch zu interpretieren (eventuell Reprozessing). Das Ziel sollte in einer genauen Aufnahme von Störungen liegen. Auf der Basis dieser Ergebnisse ist über die Notwendigkeit neuer seismischer Untersuchungen zu befinden. Die Erkundung des Verlaufs von Störungen im kristallinen Grundgebirge ist generell wesentlich schwieriger als in sedimentären Ablagerungen. Die Interpretation seismischer Profile wird jedoch durch die Möglichkeit einer Extrapolation des Verlaufs von Störungen durch die Sedimente ins kristalline Grundgebirge hinein erleichtert.

Im Rahmen der Vorerkundung wäre es wünschenswert, eine **Erkundungsbohrung** ins kristalline Grundgebirge (bzw. in das zu stimulierende Gestein) abzuteufen. Diese Bohrung kann später u. a. zur Aufzeichnung seismischer Signale bei den Stimulationsversuchen in den HDR-Tiefbohrungen verwendet werden. In der Erkundungsbohrung sollten für das kristalline Grundgebirge hydraulische Versuche vorgesehen werden, um sowohl Aussagen zur Durchlässigkeit und zum Speichermögen des Untergrundes vor der Stimulation als auch zu den hydrochemischen Eigenschaften der Wässer inklusive deren Gasgehalte zu erhalten. Dadurch kann bspw. rechtzeitig die Problematik der Ausfällungen behandelt werden. In der Regel wird wegen der hohen Kosten die erste Bohrung aber gleich als spätere **Produktionsbohrung** abgeteuft, in der die entsprechenden Stimulationsmaßnahmen durchgeführt werden. Grundsätzlich sind die Bohrungen und Stimulationsarbeiten durch geophysikalische Bohrlochmessverfahren zu begleiten.

Unter Umständen kann in Gebieten mit natürlicher **Seismizität** diese durch das HDR-Verfahren insbesondere während der Bauphase bei den notwendigen Stimulationsverfahren beeinflusst werden. Es besteht die Möglichkeit, dass die entstehenden Erschütterungen die Wahrnehmbarkeitsschwelle an der Erdoberfläche überschreiten. Das Auftreten von durch HDR induzierter Seismizität hängt im Einzelnen von der geologischen Umgebung (Kristallin oder Sedimentgesteine), den tektonischen Spannungen, Injektionsdrücken bzw. Fließraten und wahrscheinlich auch der Größe des stimulierten Riss-Systems ab. Das Auftreten von induzierter Seismizität wird aber bis zu einem gewissen Grade als beurteilbar, prognosefähig und zum Teil als beeinflussbar angesehen. Schlüssel hierzu sind laufende Messungen und Kontrolle des in die Tiefe eingebrachten Injektionsdrucks und ein seismologisches Monitoring in der näheren und weiteren Umgebung der Anlage. Gegebenenfalls sind die Injektionsdrücke bzw. Injektionsmengen zu reduzieren. In den Bundesländern, in denen mit erhöhter Seismizität nach DIN 4149 zu rechnen ist, sollte der örtlich zuständige Erdbebendienst zur Beurteilung mit einbezogen werden.

6.4 Langzeitverhalten

Durch das HDR-Projekt Soultz-sous-Forêts liegen aus dem Oberrheingraben bereits Erfahrungen aus einem tektonisch beanspruchten Gebiet in einer Dehnungsstruktur im Granit vor. Die Befunde aus dem Gneisgebirge von Bad Urach können noch nicht abschließend beurteilt werden. Das mechanische Verhalten von Graniten und Gneisen

ist sehr unterschiedlich, so reagieren Gneise auf eine mechanische Beanspruchung eher duktil, Granite hingegen eher spröde. Dennoch werden für ein HDR-Projekt aus geologischer Sicht derzeit sowohl granitische und metamorphe Gebirge als auch Sedimentgesteine als geeignet betrachtet.

Über das Langzeitverhalten der Klüfte und der Gesteinsmatrix im Zuge des Betriebs einer HDR-Anlage gibt es bislang wenige Untersuchungen; praktische Erfahrungen liegen nicht vor. Möglicherweise dichten sich die Klufflächen gegenüber der Gesteinsmatrix während der langen Injektionszeiten ab. In der Gesteinsmatrix ist verstärkt mit Alterationsreaktionen (Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen) oder der Bildung von Sekundärmineralen (Tonminerale) zu rechnen, wodurch sich die Porosität der Gesteinsmatrix reduzieren kann. Es ist derzeit nicht bekannt, welche Auswirkungen diese Vorgänge auf die Lebensdauer einer HDR-Anlage haben.

Weltweit existieren noch keine Stromproduktionsanlagen, die nach dem HDR-Prinzip arbeiten, demzufolge liegen auch keine Langzeiterfahrungen vor.

7 Tiefe Erdwärmesonden

Tiefe Erdwärmesonden haben eine den sehr oft angewandten flachen Erdwärmesonden vergleichbare Technologie. In einer tiefen Erdwärmesonde zirkuliert ein Wärmeträgermedium in einem **geschlossenen System** bis zu Tiefen von ca. 3000 m (Abb. 5). Die Nutzung solcher tiefen Erdwärmesonden erfolgt in einer Heizzentrale in Kombination mit anderen Wärmeerzeugern. Die Heizleistung einer tiefen Erdwärmesonde kann in Abhängigkeit von den jeweiligen Rahmenbedingungen bis zu ca. 500 kW betragen.

Durch Wärmeleitung aus dem Gestein über die Verrohrung und das Hinterfüllmaterial der Sonde erfolgt die Wärmeübertragung auf das in der Sonde zirkulierende Fluid. Im Ringraum eines Doppelrohrsystems (Koaxialrohr) wird das kalte Fluid mengengeregelt nach unten geleitet. Bei seiner langsamen Bewegung (5 – 65 m/min) erwärmt es sich konvektiv und steigt aufgeheizt im isoliert ausgeführten Innenrohr nach oben (Abb. 5). Vom Sondenaustritt gelangt das warme Fluid in die oberirdische Nutzungsanlage, wo es auf ca. 15 °C ausgekühlt und mit einer Sondenkreispumpe wieder in den Ringraum zurückgeführt wird. Als Kältemittel wird häufig Ammoniak eingesetzt. Durch den Wärmeentzug kühlt sich das Umgebungsgestein etwas ab; es entsteht ein horizontaler Temperaturgradient, der das Nachfließen von Wärme aus der weiteren Umgebung zur Folge hat.

Tiefe Erdwärmesonden sind nicht auf gut durchlässige Grundwasserleiter angewiesen und können daher theoretisch nahezu überall installiert werden. Für das Verfahren bieten sich wegen der hohen Investitionskosten bereits vorhandene Tiefbohrungen an. Da tiefe Erdwärmesonden einen geschlossenen Kreislauf besitzen, erfolgt kein Eingriff in Stoffgleichgewichte des Gebirges. Lösungs- oder Fällungsreaktionen, wie sie bei hydrothermalen Systemen oder bei Hot-Dry-Rock-Systemen auftreten können, sind ausgeschlossen.

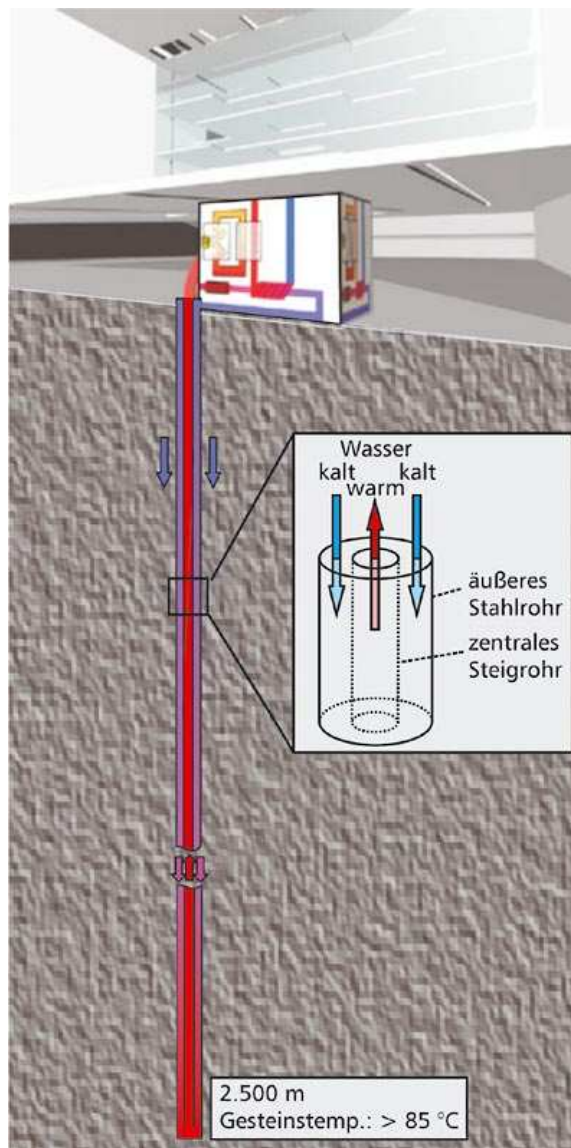


Abb. 5: Schema für eine tiefe Erdwärmesonde

Die nutzbare Energiemenge einer tiefen Erdwärmesonde hängt in erster Linie von der **Temperatur** des Untergrundes ab, besonders lukrativ sind daher positive Temperaturanomalien. Ein weiterer wichtiger Parameter sind die **thermischen Eigenschaften** des Untergrundes (Abschnitt 2), insbesondere die Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturgradient. Die nutzbare Energiemenge hängt neben der Betriebsdauer zusätzlich von der Bauart der Sonde und der Steigleitung ab, somit auch von den thermischen Eigenschaften der Ausbaumaterialien der Sonde. Lange und großkalibrige Sonden besitzen eine größere **Wärmeaustauschfläche** (Kontakt Sonde – Gestein).

8 Tunnel, Kavernen, Bergwerke

Liegt eine hohe Schüttung warmer Tunnelwässer (bis zu einigen 100 l/s) vor, so besteht eine gute Möglichkeit zur energetischen Nutzung dieser Wässer. Je wärmer das Wasser ist, desto höher ist das Wärmeleistungspotential. Nutzbare Tunnelwässer weisen im Mittel Temperaturen von 12 – 24 °C auf. Mit einer Wärmepumpe kann die Temperatur dieser Wässer auf ein nutzbares Niveau angehoben werden. Wässern mit deutlich höherer Temperatur können ggf. unmittelbar genutzt werden. In die Analyse der Wirtschaftlichkeit innerhalb der energetischen Gesamtbetrachtung sollten die ggf. erforderlichen Kosten für die Nah- oder Fernwärmeleitungen mit einkalkuliert werden.

Entsprechendes kann u. U. auch für Bergwerke gelten.

Die Gesamtwärmeleistung der gegenwärtig in der Schweiz genutzten Tunnelwässer liegt insgesamt bei etwa 17 MW (Abkühlung auf 10 °C). Die Investitionskosten für die Wärmeverteilung wachsen mit der Distanz zwischen Quelle und Verbraucher.

9 Checkliste für eine hydrothermale Nutzung

In der nachstehenden Checkliste sind die wichtigsten Arbeitsschritte, die bei einer geplanten hydrothermalen Erschließung der Reihe nach abzuarbeiten sind, stichwortartig zusammengestellt.

I. Stufe: Vorstudie

1. Zielstellung
2. Geowissenschaftliche Grundlagen
 - Datenlage (Übersicht über Daten; insbesondere Seismik-Profile und Bohrungen, hydraulische Tests, Temperaturangaben)
 - Geologischer Aufbau (geologische Schnitte durch das Untersuchungsgebiet, Interpretation seismischer Profile)
 - Tiefenlage und Mächtigkeit der wasserführenden Horizonte
 - Erste Abschätzung der Temperatur potentieller Nutzhorizonte
 - Durchlässigkeiten, Mögliche Förderraten
 - Hydrochemie
 - Übersicht über die Bergrechte, bergrechtliche Erlaubnis
3. Energetische Nutzung
 - Geplante / Vorhandene Wärmeversorgung (Angabe der Gemeinde bzw. des lokalen Energieversorgers: wie viel muss/kann die Geothermie zur Wärmeversorgung beitragen)
 - Stromerzeugung (optional, falls gewünscht)
4. Technisches Grobkonzept der Geothermieanlage
 - Erschließungsvarianten (Dublette, Entfernung der Bohrungen, Ablenkungen)
 - Ausbau der Bohrungen (als Grundlage für eine Kostenschätzung)
 - Übertageanlagen
5. Kostenschätzung

II. Stufe: Machbarkeitstudie

1. – 4. der Vorstudie als Feinkonzept; Festlegung der zu planenden Varianten.
5. Investitionskosten
 - Exploration
 - Untertageanlage
 - Übertageanlage
6. Wirtschaftlichkeit
 - Betriebskosten
 - Ausgaben und Erlöse
 - Wirtschaftlichkeitsberechnung
7. Risikoanalyse, Fündigkeitsrisiko, etc.
8. Ökologische Bilanz
9. Projektablaufplanung

III. Stufe: Exploration

1. Beauftragung eines Planungsbüros/Projektmanagements
2. Beantragung eines Erlaubnisfeldes bei der Bergbehörde
3. Geophysikalische Exploration, falls erforderlich
4. Bohrkonzeption (unter Berücksichtigung von Vorgaben der Bergbehörde)
5. Ausschreibung der ersten Bohrung, Aufstellen eines Betriebsplanes
6. Durchführung der Bohrung einschließlich Tests
7. Ggf. Stimulationsmaßnahmen
8. Entscheidung über Fündigkeit

IV. Stufe: Erschließung

1. Ausschreibung der zweiten Bohrung, Aufstellen eines Betriebsplanes
2. Durchführung der Bohrung einschließlich Tests
3. Ggf. Stimulationsmaßnahmen
4. Errichtung der Übertageanlagen (kann ggf. parallel zu 1 – 3 passieren)
5. Beantragung eines Bewilligungsfeldes bei der Bergbehörde
6. Produktion

10 Literaturliste, Regelwerke, Quellen, Links

10.1 *Verwendete Literatur*

BAUMGÄRTNER J, JUNG R, HETTKAMP T, TEZA D (2004): The Status of the Hot Dry Rock Scientific Power Plant at Soultz-sous-Forêts. – Z. Angew. Geol. 2/2004: 12-16.

JUNG R, RÖHLING S, OCHMANN N, ROGGE S, SCHELLSCHMIDT R, SCHULZ R, THIELEMANN T (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.

RYBACH L (2004): EGS – The State of the Art. – Tagungsband der 15. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, Stimulierte Geothermische Systeme, 7 S., Basel.

SCHULZ R (2004): Bergrecht und Erdwärme – Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern. – Geothermische Energie 40: 9-16.

STOBER I (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. – Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, 204 S., Hannover.

STOBER I (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – Ferdinand Enke Verlag, 191 S., Stuttgart.

10.2 *Verwendete Regelwerke*

DIN 4049: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Oktober 1994, 78 S., Berlin.

DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. – Normenausschuss Bauwesen im DIN, April 2005, 84 S.; Berlin.

DVGW REGELWERK TECHNISCHE REGEL ARBEITSBLATT W110: Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen – Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen. - Juni 2005, 50 S.; Bonn.

DVGW REGELWERK TECHNISCHE REGEL ARBEITSBLATT W 111: Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung. – März 1997, 37 S.; Bonn.

VDI-RICHTLINIE 4640: Blatt 1 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. – Dezember 2000, 32 S.; Berlin.

10.3 Weiterführende Literatur

- CLAUSER C (2005): Geothermal Energy. – In: HEINLOTH K (ED.): Landolt-Börnstein – Numerical Data and Functional Relationships, New Series, Vol. VIII: Energy Technologies, Subvolume 3: Renewable Energies; Berlin, Heidelberg (Springer).
- GEOLOGISCHER DIENST NRW (2005): „Geothermie-Studie Ruhrgebiet“ - Aufbau eines geothermischen Informationssystems zur Erhöhung der Realisierungschancen tiefegeothermischer Anlagen zur Wärme- und Stromproduktion im Ruhrgebiet. – 80 S., Krefeld (Geologischer Dienst NRW, unveröff.)
- JUNG R (2003): Geothermische Stromerzeugung. – In: KALTSCHMITT, M., WIESE, A., STREICHER, W.(HRSG.): Erneuerbare Energien; Berlin, Heidelberg (Springer).
- JUNG R, BAUMGÄRTNER J, RUMMEL F, TENZER H, TRAN-VIET T (1998): Ergebnisse eines Langzeit-Zirkulationstests im europäischen HDR-Versuchsfeld Soultz-sous-Forêts. – Geothermische Vereinigung & Stadtwerke Straubing, Geothermie: Forschung, Entwicklung Markt, Tagungsbd. zur 5. Geothermischen Fachtagung, Geeste 1998: 142-151.
- PASCHEN, H., OERTEL, D., GRÜNWARD, R. (2003): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. – Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht 84: 129 S.; Berlin (TAB).
- SCHULZ R, WORMBS J. (1992): Geothermik – ein Überblick. – In: SCHULZ R et al (Hrsg.): Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland: 12-23; Karlsruhe (C.F. Müller).

10.4 Atlanten und Karten

- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (Hrsg.) (2004): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung. – 104 S., Digitale Karten (CD-Rom), München.
- BEER, H. (2002): Geotemperatur in 2000 m und 4000 m Tiefe. – In: LGRB (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg: Karte 41 und 42; Kleinmachnow (LGRB).
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (1979): Geothermische Synthese des Oberrheingrabens. – BRGM Alsace & Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Strasbourg Freiburg.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (1981): Geothermische Bestandsaufnahme des Oberrheingrabens. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg.
- DIENER, I., PASTERNAK, G., STOLLBERG, K. (1992): Geologische Grundlagen zur Geothermienutzung in Nordost-Deutschland (Kartenwerk 1:200000), Blatt

- Rostock/Stralsund. – Berlin (UWG). (Entsprechende Unterlagen liegen für alle Blätter von Nordostdeutschland als Berichte des ZGI/UWG vor.)
- HÄNEL, R. (Ed.) (1980): Atlas of subsurface temperatures in the European Community. – Hannover (Th. Schäfer).
- HÄNEL, R., STAROSTE, E. (Eds.) (1988): Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Hannover (Th. Schäfer).
- HURTER, S., HAENEL, R. (Eds.) (2002): Atlas of Geothermal Resources in Europe. – Luxemburg (Office for Official Publications of the European Communities).
- KATZUNG, G. (Ed.) (1984): Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik. – Text, 27 Karten; Berlin (Zentrales Geologisches Institut).
- LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2004): Geothermie in Schleswig Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz. – Broschüre, 110 S.; Flintbek (LANU).
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGWESEN SACHSEN-ANHALT (Hrsg.) (2003): Übersichtskarte, Tiefliegende Rohstoffe und Energiestoffe in Sachsen-Anhalt, Blatt I, Energierohstoffe. – Halle / Saale (LGB).
- LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE M-V (Hrsg.) (2000): Geologische Karte von Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtskarte 1: 500 000 – Geothermie. Güstrow (LUNG).

10.5 Quellenhinweise für Abbildungen:

Abb. 1: <http://www.energieland-hessen.de>

Abb. 2: <http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/geothermie/grundlagen/nutzungsmoeglichkeiten>

Abb. 3: OWENS S R (1975): Corrosion in disposal wells. – Water and Sewag Works, p.10-12.

Abb. 4:
http://www.izt.de/img/assets/1010/659_geothermische_stromerzeugung_40prozent.jpg

Abb. 5:
http://www.geowissenschaften.de/index.php?cmd=focus_detail2_bild&f_id=185&rang=5&pid=4011

10.6 Links

Geothermische Vereinigung e.V. (GtV): <http://www.geothermie.de>

Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG): <http://www.geothermal-energy.ch>
International Geothermal Association (IGA): <http://www.geothermal-energy.org>