

Literatur

Bruton, T., 1996: Multi-Megawatt Upscaling of Silicon and Thin Film Solar Cell and Module Manufacturing 'MUSIC FM', Europäische Kommission, APAS RENA CT94 0008

Jones, E., et al., 2000: Opportunities for Cost Reduction in Photovoltaic Modules, Arthur D. Little Inc., 16th EU PV Solar Energy Conference, Glasgow, UK, May

Kaltschmitt, M., Wiese, A., 1997: Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin: Springer (2. Aufl.)

Staiß, F., 2000: Jahrbuch Erneuerbare Energien, Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Radebeul: Bieberstein-Verlag

Kontakt

Priv.-Doz. Dr. Gerhard Willeke
 Department Head Solar Energy Systems
 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
 Oltmannstraße 22, 79100 Freiburg
 Tel.: +49 (0) 7 61 / 45 88 - 2 66
 Fax: +49 (0) 7 61 / 45 88 - 2 50
 E-Mail: willeke@ise.fhg.de
 URL: www.ise.fhg.de

»

Nachhaltige Energiegewinnung aus Erdwärme

Ali Saadat, Ernst Huenges, Suzanne Hurter, Silke Köhler, Lutz Giese, Ute Trautwein, GeoForschungsZentrum Potsdam

Seit mehreren Jahren befasst sich das GFZ mit der Nutzung der Erdwärme im Rahmen von interdisziplinären Forschungsprojekten. Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die Nutzung hydrothermaler Niederdrucksysteme, die geologischen Rahmenbedingungen, den technischen Aufbau des Thermalwasserkreislaufes sowie zum aktuellen Stand des HDR-Verfahrens.

Die Nutzung der Erdwärme aus verschiedenen Tiefen ist machbar. Thermische Energie kann nahezu wirtschaftlich bereit gestellt werden. Erdwärme kann nachhaltig gewonnen werden und bietet eine umweltgerechte Energieversorgung.

Einführung

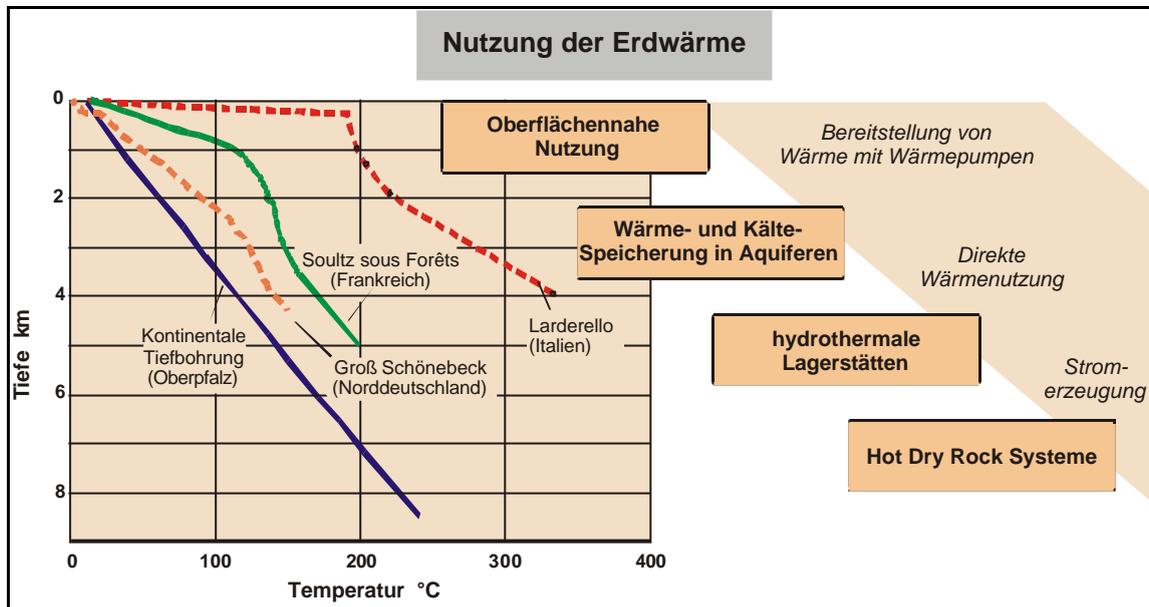
Die Nutzung der Energie aus Erdwärme kann in naher Zukunft eine wichtige Rolle in der Energieversorgung Deutschlands spielen. Ein stetiger Wärmefluss aus größeren Tiefen sorgt für eine nachhaltige Bereitstellung von Wärme in der Erde. Für die Energiegewinnung sind unter den hier gegebenen Bedingungen im Wesentlichen drei Bereiche von Bedeutung:

- Nutzung der oberflächennahen Geothermie mit Sonden und nachgeschalteten Wärmepumpen zur Raumheizung;
- Nutzung hydrothermalen Erdwärmeevorkommen zur Wärmelieferung an ein Heiznetz und/oder zur Stromerzeugung;
- Nutzung des tiefen Untergrundes mit Hilfe des Hot Dry Rock (HDR)-Verfahrens, ebenfalls zur Wärmelieferung an ein Heiznetz und/oder zur Stromerzeugung.

Temperatur-Tiefenverteilung

Unterhalb der vom Jahresgang der Außentemperatur beeinflussten Schichten der Erde nimmt im Normalfall die Temperatur im Untergrund mit der Tiefe stetig zu. Kenntnisse der regional stark unterschiedlichen Temperatur-Tiefenverteilung gehen vor allem auf Temperaturmessungen in Erdöl-, Erdgas-, Geothermie- oder anderen Erkundungs- bzw. tiefere Forschungsbohrungen zurück. Der Vergleich der auf der Kola-Halbinsel (Russland) in 12,3 km Tiefe gemessenen Maximaltemperatur von ca. 230°C mit der in der Oberpfalz bei 9,1 km Tiefe angetroffenen Temperatur von rund 280°C belegt den Zusammenhang zwischen geologischen Verhältnissen und thermischen Bedingungen in der Erdkruste. Bei einer mittleren Oberflächentemperatur zwischen 5 und 10°C zeigen die beiden Beispiele Temperaturgradienten von ca. 20 bzw. 30°C/km. Wesentlich höhere Gradienten sind z. B. aus dem Oberrheintalgraben (Soulz-sous-Forêt) bekannt. Nach den vorliegenden Messungen nimmt die Temperatur dort bis in Tiefen von etwa 1,5 km stark zu, steigt dann aber in größeren Tiefen mit normalen geothermischen Gradienten um 30°C/km an. Ein zumindest für die obersten 5 km etwa doppelt so hoher Temperaturgradient wird in der Toskana beobachtet, wo die Kruste schon in weniger als 5 km Tiefe 300°C heiß ist (Abb. 1).

Abb. 1: Nutzung der Erdwärme und Temperatur-Tiefenverteilung



Schon aus diesen wenigen Beispielen geht hervor, dass die Temperatur-Tiefenverteilung je nach Region und je nach Tiefe aufgrund spezieller Wärmetransportprozesse stark variieren kann. Ein oft als Durchschnittsgröße für die kontinentale Kruste angegebener geothermischer Gradient von 30°C/km kann als grober Richtwert angesehen werden.

Hydrothermale Geothermie

Voraussetzungen für die wirtschaftlich effiziente Nutzung hydrothermaler Lagerstätten sind entsprechende Thermalwasservorräte und technisch realisierbare hohe Volumenströme. Die Nutzung ist daher vor allem an die folgenden speziellen geologischen Voraussetzungen und Speichereigenschaften gebunden:

- das Vorhandensein einer ergiebigen wasserführenden Gesteinsschicht (Nutzhorizont);
- eine ausreichende vertikale und laterale Verbreitung dieser Gesteinsschicht (Nutzreservoir) zur Gewährleistung einer langfristigen Nutzung;
- ein wirtschaftlich interessantes Temperaturniveau im Nutzreservoir;
- die grundsätzliche Eignung des Tiefenwassers für den technologischen Prozess der Wärmegewinnung (Material- und

Systemverträglichkeit im Thermalwasserkreislauf).

In Deutschland sind als potenzielle Nutzhorizonte zwei grundsätzlich verschiedene Gesteinstypen von Interesse (Abb. 2). Sie unterscheiden sich in ihren strukturellen Eigenschaften, in der zeitlichen Anlage des Speicherraums und in der regionalen Verbreitung. Es handelt sich um

- primär poröse und mit Schichtwasser gefüllte Gesteine (Porenspeicher; z. B. mesozoische Sandsteine des Norddeutschen Beckens) und um
- sekundär geklüftete und/oder kavernöse Gesteine (Kluft/Karstspeicher; z. B. Malmkarbonate des Bayrischen Molassebeckens).

Abb. 2: Hydrothermale Vorkommen in Deutschland



Die hohen Volumenströme und die Gewährleistung einer langfristig stabilen Förderung und Reinjektion erfordern neben einer ausreichenden lateralen Verbreitung des Nutzhorizontes vor allem bestimmte Mindestwerte für Porosität, Permeabilität und Nettomächtigkeit. Somit ergeben sich erhebliche Anforderungen an einen für die hydrothermale Geothermie nutzbaren Porenspeicher: Benötigt werden ausreichend mächtige, hochporöse und sehr gut permeable, matrixarme Sandsteine. Aus den Erfahrungen bisher realisierter Projekte existieren für Sandsteine Orientierungswerte für die Nutzporosität von 20 %, für die Permeabilität von $0,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ und für die Mächtigkeit von 20 m. Eindeutige Grenzwerte lassen sich jedoch immer nur für konkrete standortspezifische Bedingungen ableiten.

Hot Dry Rock-Verfahren (HDR)

Anders als bei der Nutzung hydrothermaler Lagerstätten ist beim Hot Dry Rock (HDR)-Verfahren nicht zwingend eine ergiebige wasserführende Gesteinsschicht erforderlich. Bei diesem Verfahren werden im tiefen Untergrund

Klüfte durch das Einpressen großer Wassermengen unter hohem Druck erzeugt (hydraulische Stimulation). Dadurch wird zwischen Injektions- und Produktionsbohrung ein Zirkulationssystem mit vergleichsweise kurzen Verweilzeiten hergestellt. Als Wärmeträgermedium dient Wasser, das entweder bereits im Untergrund vorhanden ist und/oder von über Tage zugeführt wird. Das Erreichen der für den wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Temperaturen in entsprechenden Tiefen ist dabei primär ein finanzielles und weniger ein technisches Problem.

Die in HDR-Projekten gewonnenen Erkenntnisse über die Stimulation des Untergrundes werden in Zukunft verstärkt auch bei der Erschließung hydrothermaler Lagerstätten zur Verbesserung der Speichereigenschaften eingesetzt. Dies verringert das Fündigkeitsrisiko und gibt der Geothermie weitgehende Standortunabhängigkeit.

Im Rahmen eines EU Projektes wurde nach Voruntersuchungen in Rosemanowes (Großbritannien), Bad Urach (Deutschland) und Soultz-sous-Forêt (Frankreich) das im Elsass am Rande des Rheingrabens liegende Soultz für ein HDR-Projekt ausgewählt. Das Ziel ist es, in 5 km Tiefe Wasser mit Zirkulationsraten von rund $290 \text{ m}^3/\text{h}$ auf 190°C zu erhitzen, um mit den so erreichbaren $50 \text{ MW}_{\text{th}}$ in einer Pilotanlage etwa 5 MW_{el} zu erzeugen (th kennzeichnet die thermisch Leistung, el die elektrische).

Nutzungstechniken der Energiegewinnung aus Erdwärme

Sowohl die hydrothermale Geothermie als auch die in HDR-Anlagen gewonnene Wärme kann entweder direkt genutzt oder in elektrische Energie gewandelt werden. Bisher geschieht in Deutschland die energetische Nutzung hydrothermalen Ressourcen ausschließlich in geothermischen Heizzentralen. Eine solche Anlage besteht im Wesentlichen aus Förder- und Injektionsbohrungen sowie dem Thermalwasserkreislauf mit Förderpumpe und Wärmeübertrager über Tage. Falls erforderlich, wird die Temperatur mit einer Wärmepumpe auf das gewünschte Niveau angehoben. Zur Deckung der Spitzenleistung dienen meist mit fossilen Brennstoffen beheizte Kessel.

In Deutschland ist die Nutzung von niedrig-thermalen Tiefengewässern zwischen 40°C und 100°C vor allem im süddeutschen Molassebecken zwischen Donau und Alpen, im Oberrheingraben und im norddeutschen Becken möglich (Abb. 2).

Geothermische Heizzentralen

Ende 1999 waren in Deutschland 400 MW_{th} (hydrothermale Geothermie) installiert, davon

55 MW_{th} in 27 größeren Anlagen (Tab. 1), weitere 340 MW_{th} stammen aus Erdwärmesonden. Damit werden insgesamt 6 % der für die Deckung des Wärmebedarfs in Deutschland erforderlichen Endenergie bereitgestellt. Anlagen zur Stromerzeugung bestehen hier zu Lande bisher nicht. Alle in Deutschland errichteten Anlagen haben seit ihrer Inbetriebnahme ihre Wärmeabnehmer sicher versorgt.

Tab. 1: Parameter ausgewählter hydrogeothermaler Anlagen im Norddeutschen Becken (Waren, Neustadt-Glewe), im Molassebecken (Erding mit nur einer Bohrung, Altheim) und im südlichen Teil des Oberrheingrabens (Riehen)

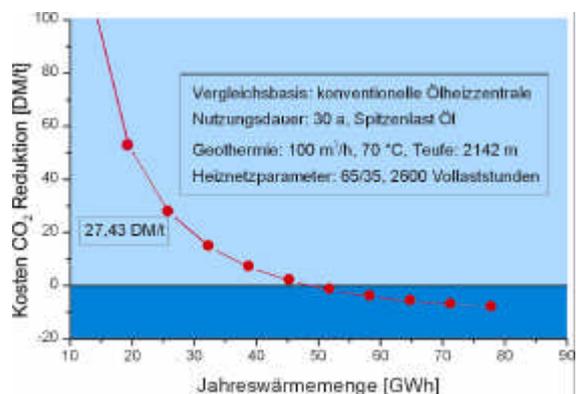
Ort	In Betrieb (modernisiert)	Installierte Leistung MW			Wärmelieferung (im Jahr) GWh		Tiefe Förder-/Injektionsbohrung m	Volumenstrom m³/h	Temperatur °C
		gesamt	geoth. direkt	Wärmepumpe	gesamt	geoth.			
Waren	1984 (94 – 95)	5,2	1,6		13,4 (1995)	8,5 (1995)	1566/1470	60	62
Neustadt-Glewe	1995	8,2	6,5	keine	16,2 (1996)	13,7 (1996)	2250/2303	120	98
Erding	März 1998	18	2,2	6,8	52 (geplant)	28 (geplant)	2350	86,4	65
Altheim (Österreich)	1990	10		keine			2300	165,6	86 - 104
Riehen (Schweiz)	1994	15,1	0,5	2,9	30,4 (96/97)	12,7 (96/97)	1547/1247	72	66

Kosten CO₂-Reduktion

Setzt man Wärmemengen bzw. Wärmegestehungskosten direkt zu Emissionswerten in Beziehung, dann können die CO₂-Minderungskosten hydrothermaler Wärmebereitstellung lokationsspezifisch angegeben werden. Die in Abbildung 3 angegebenen Parameter orientieren sich an einem bestehenden geothermischen Heizwerk in Neustadt Glewe in Mecklenburg.

Mit zunehmender Anlagengröße ist man demnach in der Lage, günstige CO₂-Minderungskosten zu erhalten.

Abb. 3: CO₂-Minderungskosten hydrothermaler Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Jahreswärmemenge*

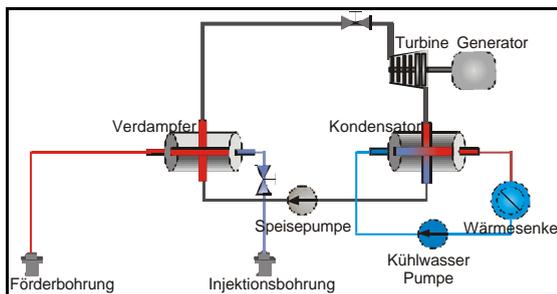


* Basis: konventionelle Wärmegestehungskosten 1998 (Heizöl extra leicht, 8,17 DM/GJ)

Geothermische Kraftwerke

Um die Wärme aus der Erde in elektrische Energie zu wandeln, stehen verschiedene Prozesse und Anlagen zur Verfügung. Alle beinhalten eine Turbine, in der das Arbeitsmedium entspannt und dabei über eine Welle einen Generator antreibt. Der klassische Dampfkraftprozess (Clausius-Rankine-Prozess) und der offene Gasturbinen-Prozess standen Pate für diese Prozesse. Das aus der Bohrung geförderte Fluid (Thermalwasser, Dampf oder eine Mischung aus beidem) dient entweder direkt als Arbeitsmedium oder es überträgt die Wärme in einem Wärmeübertrager an ein Sekundärfluid – meist bei geringen Temperaturen siedende Kohlenwasserstoffe –, das einen klassischen Kraftwerkskreislauf betreibt. Daher resultiert auch der Name dieser Anlagen: Organic Rankine Cycle (Abb. 4).

Abb. 4: Prinzipschaltbild einer ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle)



Bisher werden solche Kraftwerke jeweils für eine bestimmte Anwendung entworfen bzw. an einen bestimmten Standort angepasst, Standardlösungen sind so gut wie nicht verfügbar.

Neben Reservoirtemperatur, Dampfgehalt und Druck legen der Gehalt an nicht kondensierbaren Gasen, die Mineralisation und nicht zuletzt die Ergiebigkeit eines Geothermievorkommens fest, welche Arten von Kraftwerken zur Stromerzeugung im jeweiligen Fall infrage kommen:

- Anlagen zur direkten Nutzung des Fluides werden ab Reservoirtemperaturen von ca. 150°C eingesetzt. Alle diese Prozesse, sei es mit oder ohne vorhergehenden Flashprozess, profitieren von möglichst geringen Anteilen an nicht kondensierbaren Gasen und geringer Mineralisation.

- Binäranlagen werden ab Reservoirtemperaturen von 80°C verwendet, höhere Temperaturen sind möglich und verbessern den Wirkungsgrad erheblich. Durch Wahl eines geeigneten Arbeitsmittels kann das jeweilige Temperaturniveau bestmöglich genutzt werden. Die für Geothermieanlagen typischen verfahrenstechnischen Fragestellungen beschränken sich auf den Thermalwasserkreis. Daher werden Binäranlagen auch gerne bei Lagerstätten eingesetzt, die prinzipiell aufgrund des Dampfgehaltes und der Temperatur zur direkten Nutzung geeignet wären, aber hohe Mineralisation oder hohe Anteile an nicht kondensierbaren Gasen aufweisen. Dabei nutzen sie entweder das gesamte Enthalpiegefälle oder arbeiten als zweite Stufe hinter einer Gegendruckturbine.

Aktueller Stand der Nutzung – Internationaler Überblick

Weltweit sind zur Zeit insgesamt 16,2 GW_{th} aus Geothermie installiert, davon mehr als ein Drittel, d. h. 5,7 GW_{th}, in den USA und Kanada (USA 33,1 %; Kanada 2,3 %). Zusammen mit China (2,8 GW_{th} installiert) deckt diese Gruppe mehr als die Hälfte der als Wärme genutzten Geothermie ab. Die isländischen Heizungssysteme nehmen eine Sonderstellung ein: Sie funktionieren oftmals monovalent, d. h. ohne Spitzenkessel. So beziehen z. B. die rund 160.000 Einwohner der Hauptstadt Reykjavik ihren gesamten Heizwärmebedarf aus in der Nähe liegenden Geothermiefeldern.

Die weltweit installierte Leistung geothermischer Kraftwerke beträgt knapp 8GW_{el} (Stand 2000). Mit 2,2 GW_{el} befinden sich mehr als ¼ der Kraftwerksleistung in den USA (davon 90 % in Kalifornien, 8 % in Nevada, je 1 % in Utah und Hawaii). Die Philippinen liegen mit 1,9 GW_{el} installierter Leistung an zweiter Stelle. Italien und Mexiko folgen in weitem Abstand (785 bzw. 755 MW_{el}). Indonesien, Japan und Neuseeland tragen jeweils um die 6 % (440 - 590 MW_{el}) der installierten Leistung bei, Island, El Salvador und Costa Rica jeweils um die 2 % (140 - 170 MW_{el}).

Ausblick und Zusammenfassung

Forschung und Entwicklung im Bereich der Nutzung geothermischer Ressourcen beziehen sich auf die Bereitstellung von Wärme und Strom. Wärme aus der Erde wird in Deutschland aus dem flachen Untergrund mit Hilfe von erdgekoppelten Wärmepumpen sowie aus dem tiefen Untergrund durch Nutzung erbohrter wasserführender Schichten in Heizzentralen bereitgestellt. Die Machbarkeit der Bereitstellung von hydrothermal gewonnener Erdwärme ist gezeigt worden. Elektrischer Strom kann aus speziell aufbereiteten Lagerstätten des noch tieferen und damit wärmeren Untergrundes erzeugt werden.

Wirtschaftliche Überlegungen erfordern einen neuen Blick in Richtung auf eine weitergehende Nutzung der Erdwärme. Besondere Aufmerksamkeit ist der Ressourcenbewertung gerade in den Gebieten zu widmen, die bisher nicht behandelt wurden, weil leicht identifizierbare wasserführende Horizonte nicht nachgewiesen werden konnten. Durch noch zu erforschende und zu entwickelnde beziehungsweise aus der Erdöl-Erdgas Industrie zu adaptierende Methoden lassen sich dann Regionen einer Erdwärmennutzung zuführen, deren Potenzial bisher nicht erfasst oder anders bewertet wurden.

Die Erschließung solcher Ressourcen und die Technik der Gewinnung warmer Wässer aus der Tiefe erfordern gerade unter dem Ziel der Ortsunabhängigkeit die Entwicklung technischer Verfahren, die die Trefferquote geothermischer Bohrungen erhöhen. Dazu gehören spezielle Erkundungsverfahren, angepasste Bohrverfahren und die Adaption von Verfahren der Reservoirstimulation.

Mittelfristig sollte die Anwendung der Geothermie auf andere Felder erweitert werden. Diese können z. B. in der Nutzung des tiefen Untergrundes als Speicher oder in der Kälteerzeugung aus Geothermie – auch im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien – liegen.

Mit den Erfahrungen aus dem Betrieb der dann bestehenden Anlagen können technische Standardlösungen entwickelt werden, die notwendig sind, um Geothermie als festen Bestandteil einer zukunftsorientierten nachhaltigen Energieversorgung zu etablieren.

Weiterführende Literatur und Links

<http://www.gfz-potsdam.de/geothermie>

<http://www.soultz.net>

Barbier, E., 1997: Nature And Technology Of Geothermal Energy: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 1, No 1/2, p. 1-69 (Elsevier Science)

Hudson, R. B., 1995: Electricity Generation. In: Dickinson, M. H.; Fanelli, M. (Hrsg.): Geothermal Energy. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Huttrer, G. W., 2000: Status of world geothermal Power Generation – Proceedings World Geothermal Congress 2000; Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10

Kabus, F., 1991: Obertägige Verfahrenstechnik geothermischer Heizzentralen: Thermalwasserkreislauf. In: Bußmann; Kabus; Seibt (Hrsg.): Geothermie – Wärme aus der Erde. Technologie – Konzepte – Projekte. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller

Lund, J. W., Freeston, D.H., 2000: World-wide direct uses of geothermal energy 2000 – Proceedings World Geothermal Congress 2000; Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10

Müller, E. P., 1975: Papendiek, E.: Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. Zeitschrift für geologische Wissenschaften 3, S. 167-196

Pribnow, D.; Jung, R., 2000: Stromerzeugung aus Erdwärme ohne natürliche Dampfagerstätte – Die Möglichkeiten des Hot-Dry-Rock-Verfahrens. Info-Forum Geothermie, Tagungsband, Berlin, 25. Januar 2000, GEOAgentur Berlin Brandenburg

Saadat, A., Köhler, S., 2000: Möglichkeiten und Perspektiven der geothermischen Stromerzeugung. In: GeoForschungsZentrum Potsdam (Hrsg.): Geothermische Technologieentwicklung – geologische und energietechnische Ansatzpunkte. Scientific Technical Report STR00/23, Potsdam

Schulz, R. G.; Beutler, G.; Röling, H.-G.; Werner, K.-H.; Rockel, W.; Becker, U.; Kabus, F.; Keller, T.; Lenz, G.; Schneider, H., 1994: Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven in Nordwestdeutschland. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Bericht, 111758, Hannover

Kontakt

Dr. Ernst Huenges

GeoForschungsZentrum Potsdam

Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Tel.: +49 (0) 3 31 / 2 88 - 14 40

Fax: +49 (0) 3 31 / 2 88 - 14 50

E-Mail: huenges@gfz-potsdam.de

URL: <http://www.gfz-potsdam.de>

«