Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 12 (2007)

Heft: 1

Artikel: Analyse des tiefengeothermischen Potenzials im Freistaat Sachsen

Autor: Boeck, Helmut-Juri / Lange, Thomas / Tunger, Bernd

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-226369

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol. Vol. 12/1 Juli 2007 S. 63-74

Analyse des tiefengeothermischen Potenzials im Freistaat Sachsen

Helmut-Juri Boeck[1], Thomas Lange[1], Bernd Tunger[2], Petra Schneider[2], Friedemann Grafe[3], Thomas Wilsnack[3]

Stichworte: GIS-basierte Geodatenbank, Tiefengeothermie, Temperaturfeldprognose, tiefe Erdwärmesonden, HDR/HWR-Technologie, simulationsgestützte Leistungsprognose, Potenzialbewertung

Keywords: GIS based geodatabase, deep geothermal resources, prognosis of temperature field, deep borehole heat exchanger, HDR/HWR technology, computer-based simulation of performance, assessment of potential

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE) des Freistaates Sachsen erfolgte eine Erfassung vorhandener tiefengeothermischer Messdaten und deren Aufbereitung in einer Geodatenbank. Dies geschah mit dem Ziel, eine GIS-gestützte Neubewertung des tiefengeothermischen Potenzials im Freistaat Sachsen vorzunehmen und eine aktuelle Ausgangsdatenlage für mittelfristig zu erwartende Tiefengeothermieprojekte zu schaffen. Hierzu wurde eine modellgestützte Temperaturfeldprognose auf der Basis der DV-technisch erfassten Daten vorgenommen. Aufgrund der begrenzten Datenlage war dazu ein geologisch basiertes Modell notwendig, welchem die vorhandenen Datenbestände (z. B. digitale geologische Karte, digitales Geländemodell DGM, Oberflächentemperaturen, geophysikalische Daten) zu Grunde liegen. Auf den Ergebnissen der Temperaturfeldprognose aufbauend wurde das technische Potenzial der geothermischen Nutzung mittels tiefen Erdwärmesonden beurteilt. Zu diesem Zweck wurde das Leistungsverhalten (Wärme und Strom) der Sonden simuliert. In Auswertung der Simulationsergebnisse und theoretischer Überlegungen zu anderen Arten des Wärmeentzuges (petro- und hydrothermale Nutzung) wurden die Perspektiven der geothermischen Nutzung im Freistaat Sachsen diskutiert.

Abstract

Based on the entry of existing deep geothermal borehole data and their processing in a geodatabase, a re-evaluation of the deep geothermal potential in the Free State of Saxony was performed within a research and development project (FuE) of the local government. The purpose was to create a recent and practicable base for middle-term expected deep geothermal projects. For this purpose a model-based prognosis of the temperature field was performed by processing all database recorded data. Due to a limited data extent, a geological based model was necessary including existing data sets (e.g. digital geologic map, digital terrain model, digital surface temperature distribution, and geophysical data). The assessment of technical potential of geothermal use was performed for deep borehole heat exchangers (BHE) by computer-based simulation of the performance of deep BHEs in respect to heat and electric power. In consideration of the simulation results and first estimations for other kinds of heat extracting technologies (petro- and hydrothermal use), the perspectives of geothermal use in Saxony are discussed.

[1] C&E Analytik- und Umweltdienstleistungs GmbH
[2] C&E Consulting und Engineering GmbH Chemnitz
[3] IBeWa-Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik

1. Einführung

Der Freistaat Sachsen mit ca. 18'415 km² Fläche befindet sich im Südosten der Bundesrepublik Deutschland und wird geologisch vorwiegend durch variszisch gehobene Kristallineinheiten (z. B. Erzgebirgskristallinkomplex, Lausitzer Block, Granulitkomplex) charakterisiert. Sedimentäre Becken mit hohen Versenkungstiefen und aktive Riftsysteme treten zurück bzw. fehlen gänzlich.

Im Zuge der Ressourcenbewertung infolge der Knappheit an fossilen Energieträgern (im wesentlichen Braunkohle) der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik wurden die geothermischen Potenziale erstmals für das Gesamtterritorium bewertet (z. B. Oelsner 1982, Katzung et al. 1984). Neuere geothermische Arbeiten (z. B. Förster & Förster 2000, Förster et al. 2003) befassten sich mit dem Grundgebirgsaufschluss des Erzgebirgskristallinkomplexes und bezogen die radiogene Wärmeproduktion in die Betrachtung mit ein. Grossmassstäbliche Kartenwerke (z. B. Hurter & Haenel 2002) sind zu ungenau für eine Bewertung des Freistaates Sachsen. Für Gesamtsachsen jedoch existierte keine die aktuell verfügbaren geothermischen Daten berücksichtigende, digitale, flächendeckende Modellvorstellung der geothermischen Ressourcen bis in Tiefen von 5000 m.

Um eine aktuelle und belastbare Grundlage zur Bewertung tiefengeothermischer Projekte auf dem Territorium des Freistaates Sachsen für die Zukunft zu schaffen, entschloss sich die Staatsregierung (Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) zur Durchführung eines FuE-Vorhabens mit dem Ziel einer ersten tiefengeothermischen Ressourcenbewertung. Hierzu wurde ein Konsortium bestehend aus der C&E Analytik- und Umweltdienstleistungs GmbH, der C&E Consulting und Engineering GmbH und der IBeWa-Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik mit der Projektdurchführung beauftragt.

2. Bearbeitungsmethodik

Die prinzipielle methodische Vorgehensweise bei der Datenerfassung und Datenaufbereitung gliederte sich in folgende Schritte (Boeck et al. 2004):

Datenrecherche
Recherche von geothermischen Messdaten nach Ursprung, Messmethodik und Verfügbarkeit und Recherche von lithologischen, strukturgeologischen und geophysikalischen Daten zum Tiefenbau der Oberkruste < 5000 m und den zugehörigen petrophysikalischen Daten.

Modellerstellung und Temperaturfeldprognose
Aufbau des geologisch basierten, geothermischen Modells zur Temperaturfeldprognose und Auswertung des prognostizierten Temperaturfeldes.

Auswertung
Bewertung des tiefengeothermischen Potenzials für Sachsen, Beurteilung der Nutzbarkeit tiefengeothermischer Potenziale, gegebenfalls Ausweisung potenziell besonders nutzbarer Regionen.

3. Datenlage und Datenerfassung

Der Schwerpunkt der Datenrecherche wurde auf diejenigen Messwerte gelegt, die hinsichtlich der geographischen Lage sicher zuordbar waren. Diese aus unterschiedlichen Quellen stammenden und in unterschiedlicher Form vorliegenden Messdaten wurden recherchiert, zu einem grossen Teil digitalisiert, auf ihre Plausibilität geprüft und in eine für die datenbanktechnische Erfassung notwendige Form gebracht. Tab. 1 fasst den Umfang der bearbeiteten geothermischen Messdaten zusammen (Boeck et al. 2005).

Die Gesamtanzahl der Aufschlüsse von 110 lässt sich nach der Endteufe der Aufschlüsse unterscheiden (Tab. 2).

Art der Messung / Bestimmung	Anzahl der Bohrungen / Standorte
Temperaturmessungen (unterschiedlicher Art)	104
Wärmeflussdichtebestimmungen	64
Wärmeleitfähigkeitsmessungen	42
Wärmekapazitätsbestimmungen	4
Gesamtzahl von Messpunkten	110

Tab. 1: Umfang der bearbeiteten geothermischen Messdaten.

Teufenbereiche	Anzahl der Bohrungen / Standorte
>1500 m	11
1500 m bis 1000 m	21
1000 m bis 500 m	34
<500 m	44
Bemerkung: einschließlich der erfassten Mineral- und Thermalwasservorkommen	

Tab. 2: Teufenbereiche der bearbeiteten geothermisch relevanten Aufschlüsse.

Die Aufschlusstiefe erreicht im Freistaat Sachsen und seiner Umgebung maximal 2000 m. Die tiefste Temperaturmessung erfolgte im ehemaligen Bergwerk Alberoda in ca. 1700 m Tiefe.

Die geothermischen Messpunkte verteilen sich zudem sehr ungleich. So häufen sich Messpunkte in denjenigen Regionen, in denen Rohstofferkundungen vorgenommen wurden. In grossen Flächenanteilen Sachsens, insbesondere im Norden und Osten, fehlen geothermische Messdaten dagegen gänzlich. Dies betrifft nicht nur die Regionen, sondern auch ganze Gesteinsgruppen (z. B. den Lausitzer Granodiorit). Dieser aber stand in Hinblick auf geothermische Untersuchungen kaum im Blickpunkt wirtschaftlicher und geologischer Interessen.

Die Datenerfassung erfolgte in einer zur zentralen Aufschlussdatenbank des Umweltinformationssystems des Freistaates Sachsen kompatiblen Personal Geodatabase (Boeck et al. 2004). Durch die Anbindung an die ESRI GIS-Oberfläche wird eine hohe Funktionalität (z. B. Verschneidung von Punkt-, Raster- und Vektordatenformaten, geostatistische Prognoseverfahren) und Effektivität (z. B. Rechercheabfragen, Berechnungen) gewährleistet (Fig. 1). Alle Daten wurden an die Datenbankinfrastruktur des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie sachgerecht übergeben.

4. Modellkonzept

In Abstimmung mit der Landesbehörde wurde entschieden, dass die Temperaturfeldprognose für die Gesamtfläche des Freistaats Sachsen vorgenommen wird, eine Interpolation zwischen den Messpunkten jedoch keinen Erkenntnisgewinn gegenüber früheren Arbeiten bringen kann.

Als Konsequenz aus der oben beschriebenen Datenlage wurde daher entschieden, ein Modell zu entwickeln, welches sowohl die geologische als auch die geophysikalische Expertise einbezieht. Die Temperaturfeldprognose basiert somit auf einem dreidimensionalen, geologischen Krustenmodell.

Als Basis für das geologische Modell wurde eine Rasterung von 1 × 1 km gewählt. Für die Fläche der geologischen Karte Sachsens einschliesslich seiner Randgebiete resultieren daraus ca. 31000 Rasterpunkte. Durch das gewählte Raster werden kleinräumige Struk-

turen, wie z. B. tektonische Störungen, nicht abgebildet. Dabei wird der stoffgebundene Wärmetransport durch Zirkulation entlang von Störungssystemen vernachlässigt.
Eine weitere modelltechnische Vereinfachung innerhalb des Modells stellt die Generalisierung des krustalen Aufbaus auf sechs Gesteinsgruppen dar. Diese Generalisierung ist in Tab. 3 dargestellt.

In den ersten beiden Gruppen sind viele petrographisch und stratigraphisch unterschiedliche Gesteine zusammengefasst. Diese Vereinfachung erscheint jedoch zulässig, da im überwiegenden Flächenanteil des Freistaats und bereits in geringen Tiefen kristalline Gesteine vorherrschen.
Unter Zuhilfenahme von geologischen und geophysikalischen Kenntnissen wurden

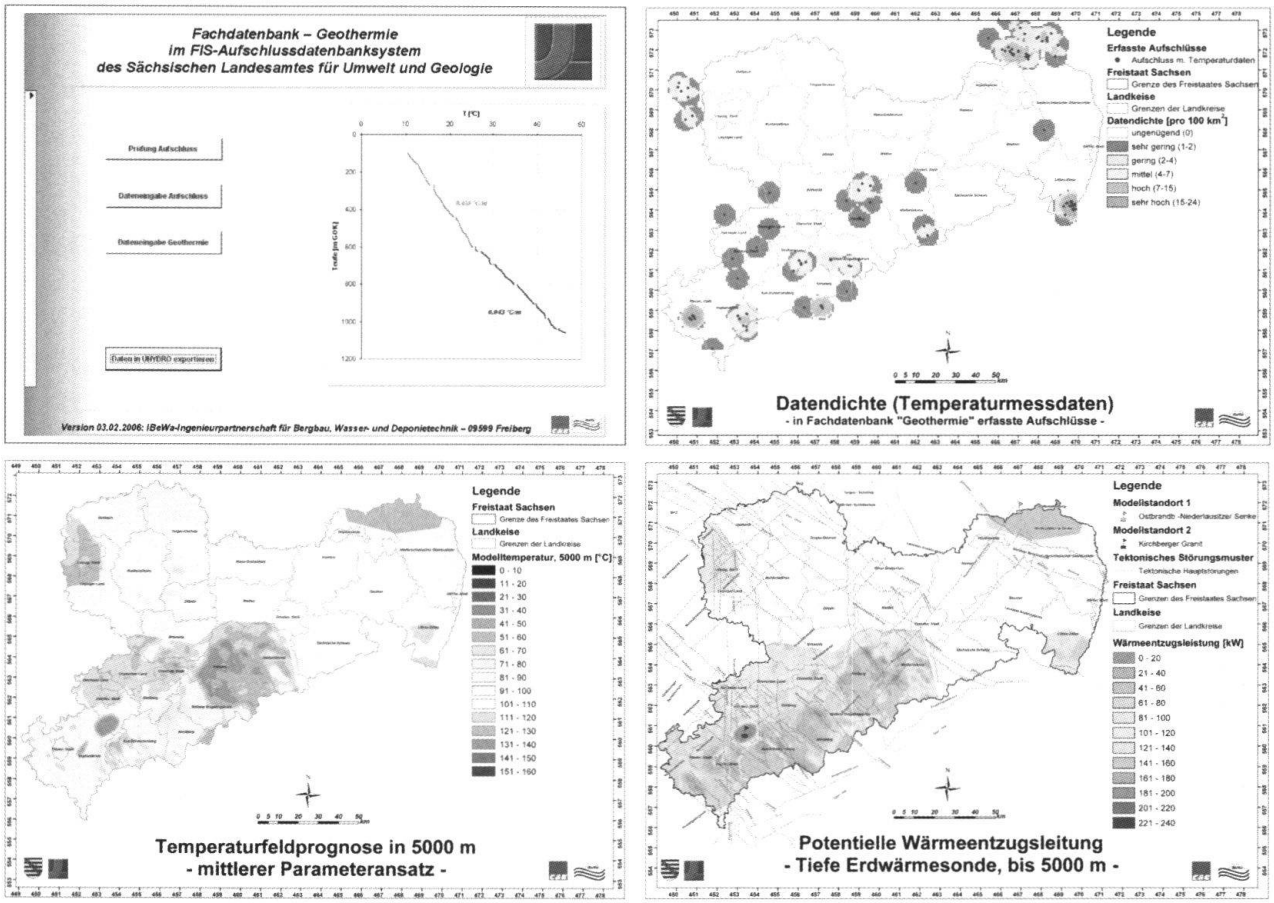

Fig. 1: Projektdatenbank in Form einer «ESRI Personal Geodatabase» (Eingabe von geothermischen Messdaten, deren Visualisierung, Auswertung und Verschneidung zu modellgestützten Potenzialanalysen).

Modellschicht	zusammengefasste Gesteinsgruppen
1	«sedimentäre Lockergesteine» (Tertiär, Quartär)
2	«gering permeable Sedimentite und Metamorphite» (pretertiäre Sedimentite und niedrigmetamorphe Schiefer)
3	Granodiorit
4	Gneise und Granulite
5	ältere bzw. undifferenzierte Granite und deren Ergussäquivalente
6	jüngere bzw. hochdifferenzierte Granite und deren Ergussäquivalente

Tab. 3: Generalisierung der Geologie in sechs Modellschichten.

dann, ausgehend von der digitalen geologischen Karte der Oberfläche, sieben Kartenschnitte bis in 5000 m Tiefe als Grundlage des geologischen Basismodells erzeugt (Fig. 2).

5. Temperaturfeldprognose

Mit dem Ziel der Modellparametrisierung wurden für die geothermisch relevanten Gesteinsgruppen aus den recherchierten Daten korrelativ tiefenabhängige Parametersätze (Gesteinsdichte, Wärmeleitfähigkeit, radiogene Wärmeproduktion, Wärmekapazität) abgeleitet.
Zusätzlich wurden Startwerte definiert (terrestrische Wärmeflussdichte, Oberflächentemperatur). Während die Jahresmitteltemperaturen an der Oberfläche flächendeckend digital verfügbar sind (Datenquelle: DWD), fehlt es im Gegensatz dazu an einer belastbaren, flächendeckenden Datenbasis für die terrestrische Wärmeflussdichte. Folglich wurde dieser Startwert durch Korrelation der vorhandenen Messwerte und unter Einbeziehung der sechs definierten Gesteinsgruppen bestimmt.
Durch iterative Variation der Modellparameter wurde eine Anpassung der berechneten Temperaturfeldverteilung an die gemessenen Temperaturen durchgeführt (Modellkalibrierung). Dabei wurde ein mittlerer Fehler ≤ 5 K in 1000 m Tiefe erreicht (Boeck et al. 2005).
Anschliessend wurde mit dem angepassten (wahrscheinlichen) Parameteransatz das Temperaturfeld bis in 5000 m Tiefe prognostiziert (Fig. 3). Die Berechnung der Temperaturen erfolgte punktweise, eindimensional und ausschliesslich unter Anwendung der Wärmeleitungsgleichung für die sieben oberflächenparallelen Modellebenen. Die Ergebnisse wurden an das Sächsische Landesamt für

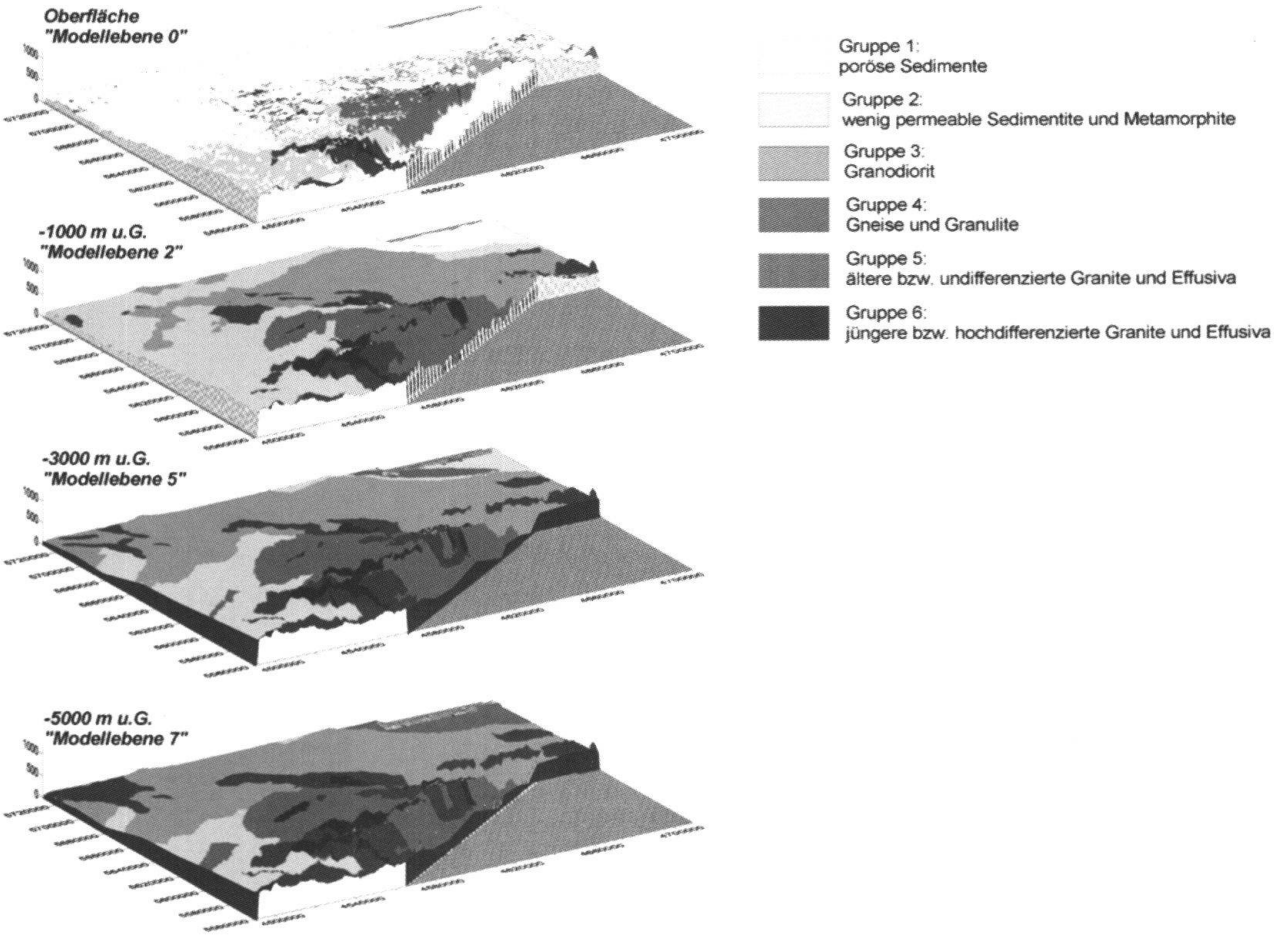

Fig. 2: Ausgewählte Schnittebenen des geologischen Modells (Boeck et al. 2005).

Umwelt und Geologie in Form von Sachdatentabellen und digitalen Karten übergeben. Das so berechnete Temperaturniveau stimmt mit den Resultaten früherer Studien gut überein. Aufgrund der relativ genauen Einbeziehung der Geologie sind die berechneten Temperaturkarten erheblich detaillierter als bisherige Modelle.

Je nach Parameterwahl wurden in 5000 m unter Terrain im Mittel Temperaturen zwi-

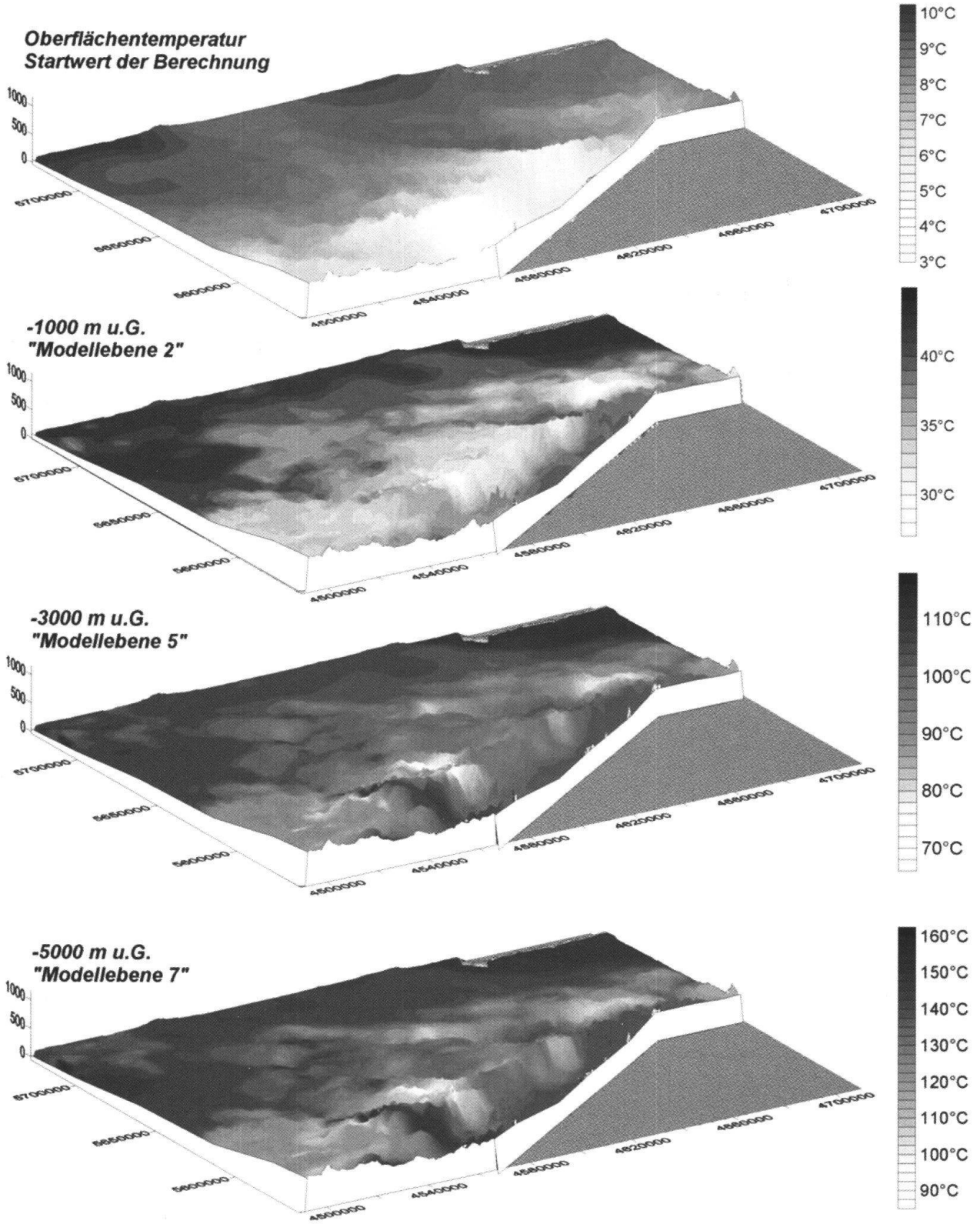

Fig. 3: Auf Basis des geologischen Modells berechnete Temperaturen in verschiedenen Tiefen für den angepassten Parameteransatz (Boeck et al. 2005).

schen 110°C und 130°C mit starken regionalen Differenzierungen errechnet. Dieses vergleichsweise niedrige Temperaturniveau (mittlerer Temperaturgradient 24 K/km) entspricht den Erwartungen innerhalb eines Komplexes überwiegend paläozoischer (z. T. auch mit präkambrischen Anteilen) Kristallingesteine.

Lokale Temperaturmaxima werden insbesondere in den Granitregionen erreicht, jedoch zeigt die Modellierung, dass dazu bestimmte Voraussetzungen gegeben sein müssen. Um dies näher zu untersuchen und um die zu erwartenden Fehler der Temperaturmodellierung einzuschätzen, wurden neben der Berechnung mit dem angepassten Parameteransatz weitere Berechnungen mittels «optimistischer» und «pessimistischer» Parameterannahmen durchgeführt. Dazu wurden, innerhalb der Wertebereiche der vorliegenden Messdaten, die Parameteransätze variiert.

Dabei wurde die Sensitivität der Parameter geprüft. Relativ geringe Parameteränderungen haben grosse Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Untergrund (z. B. bei einer Variation der Wärmeleitfähigkeit der Granite von 3,2 W/(m·K) auf 3,6 W/(m·K) entstehen in 5000 m Tiefe lokal Temperaturunterschiede bis zu 70°C, siehe Fig. 4).

Gegenüber dem oben aufgeführten mittleren Niveau deutlich erhöhte Temperaturen sind insbesondere dort zu erwarten, wo wärmeproduzierende (hochdifferenzierte, radionuklidreiche) Granite von schlechter wärmeleitenden Gesteinen überdeckt sind. Insofern erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt insbesondere die Region des Osterzgebirges und der Freiberger Gneiskuppel hinsichtlich des tiefengeothermischen Potenzials Erfolg versprechend, während die westerzgebirgischen Granitregionen hinsichtlich der Tem-

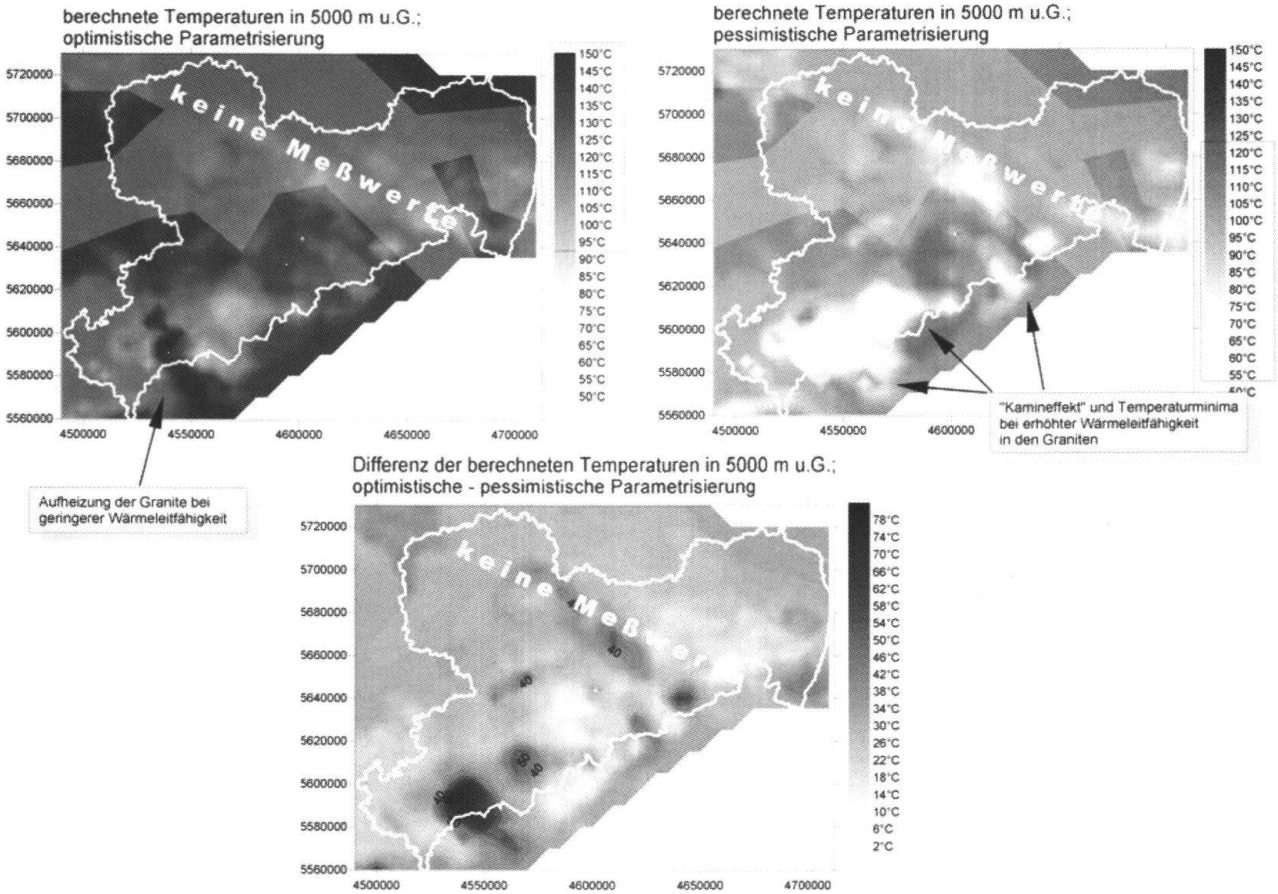

Fig. 4: Vergleich der berechneten Temperaturen in 5000 m Tiefe bei unterschiedlichem Parameteransatz (links oben: «optimistischer», rechts oben: «pessimistischer» Parameteransatz, unten: Temperaturdifferenz beider Modelle).

peraturänderungen in grösserer Tiefe noch weiter untersucht werden müssen. Eine Entscheidung darüber, welche Annahmen hier zutreffen, ist aufgrund der bestehenden Datenlage noch nicht möglich.
Neben einer weiteren Verdichtung der Datenbasis in der Fläche des Freistaats insgesamt ist besonders eine Verbesserung des Kenntnisstandes über die regionalen Differenzierungen der Wärmeflussdichte wünschenswert. Da dieser Parameter neben der Oberflächentemperatur als Startwert unmittelbar in die Berechnung eingeht, bewirken Lücken im Kenntnisstand dieses Wertes auch in den Ergebnissen der Temperaturextrapolation besonders grosse Unschärfen.

Aus den oben genannten Betrachtungen lassen sich folgende Punkte ableiten:

- Die geothermischen Temperaturen in 5000 m Tiefe liegen im Freistaat Sachsen im Bereich zwischen 110°C und 130°C.
- Der Wärmefluss in dem ökonomischen Zielbereich zwischen 5000 m und der Erdoberfläche wird vorwiegend durch die radiogene Wärmeproduktion der Gesteine gespeist.
- Hochdifferenzierte, radionuklidreiche, saure Magmatite (z. B. Granite) sind verantwortlich für deutliche Temperaturerhöhungen in der Oberkruste.
- Diese Temperaturerhöhungen treten als deutliche Temperaturanomalien in Erscheinung, wobei deren Amplitude sich erhöht, wenn die Wärmequellen (Granite) durch schlechter wärmeleitende Gesteine überdeckt werden (storage effect).
- Zur Verbesserung der Aussagenschärfe ist neben einer Erhöhung der lateralen und vertikalen Datendichte an Temperaturdaten (Modellkalibrierung) auch eine Verdichtung des Bohrungsnetzes mit Wärmeleitfähigkeitsmessungen zur Bestimmung der terrestrischen Wärmeflussdichte (Anfangsbedingung) und somit eine geothermische Exploration erforderlich.

6. Geothermisches Potenzial

Das geothermische Potenzial unterteilt sich nach Kaltschmitt & Schröder 2002 in:

- theoretisches Potenzial,
- technisches Potenzial und
- ökonomisches Potenzial.

Um das geothermische Potenzial der wirtschaftlichen Nutzung tiefengeothermischer Ressourcen im Freistaat Sachsen zu beurteilen, ist es notwendig, ein konkretes technologisches Verfahren des Wärmeentzuges und die ökonomische Durchsetzbarkeit dieses Verfahrens bei der geothermischen Energiegewinnung (Wirtschaftlichkeit) zu betrachten. Dies erfordert eine Analyse der geothermischen «Lagerstätte» hinsichtlich seiner Einstufung als Ressource oder als Reserve. Mit anderen Worten ausgedrückt: Das theoretische Potenzial im Freistaat Sachsen ist gewaltig und nahezu unerschöpflich. Es ist jedoch zwingend notwendig, sowohl das technische als auch das wirtschaftliche Potenzial zu beurteilen.
Hierbei gilt es, die drei technologischen Hauptgruppen des Wärmeentzuges zu betrachten:

- offene hydrothermale Systeme (Thermalwassernutzung)
- offene petrothermale Systeme (HDR/HWR/HFR/EGS)
- geschlossene Systeme (tiefe Erdwärmesonden - BHE im Zirkulations- oder im Direktverdampfungsverfahren)

6.1 Das technische Potenzial

Wie oben erwähnt hängt das technische Potenzial entscheidend von der Technologie des Wärmeentzuges ab. Die Simulation des Wärmeentzuges unter Kenntnis der technologischen und geologischen Eingangsgrössen ist die Voraussetzung der Beurteilung des technischen Potenzials. Aufgrund des Fehlens dieser wichtigen Informationen kann das technische Potenzial für den Einsatz offener, petrothermaler Systeme nicht beurteilt werden.

Im Gegensatz dazu ist es möglich, das technische Potenzial geschlossener Systeme wie z. B. tiefer Erdwärmesonden zu beurteilen. Hierzu stehen Simulationsprogramme (z. B. ModAMO, ModEW, EED) zur Verfügung. Zu diesem Zweck wurde der Wärmeentzug an zwei Modellstandorten im Freistaat Sachsen in Form einer Leistungsprognose simuliert. Es wurden geologische Eingangsgrössen (Bohrungsdaten bzw. Modelldaten) verwendet. Die Simulation wurde für das Direktverdampfungs- (Ammoniak - NH_3 und Propan - C_3H_8) und das Zirkulationsverfahren (Wasser - H_2O) durchgeführt.

Der Modellstandort 1 liegt in der Niederlausitzer-Ostbrandenburgischen Senke. Hier sind durch Explorationsbohrungen überwiegend postvariszische Sedimentgesteine aufgeschlossen. Es liegen neben der genauen Kenntnis der geologischen Verhältnisse (bis ca. 1700 m Tiefe) auch geothermische Messdaten (T, λ, C_p, ρ und n) vor. Dort, wo keine Daten vorlagen, wurde auf Modelldaten zurückgegriffen bzw. plausible Annahmen aus der Geologie des Schichtenverzeichnisses abgeleitet.

Der Modellstandort 2 befindet sich im Verbreitungsgebiet des Kirchberger Granits (westerzgebirgische Granite), welcher bis in Tiefen von 5000 m reicht. Am Modellstandort 2 wurde vollständig auf Modelldaten zurückgegriffen.

Die Leistungsprognose mit der Simulationssoftware ModAMO (Häfner et al. 2003) wurde an beiden Modellstandorten für tiefe Erdwärmesonden (Länge von 5000 m, Systemtemperatur von 61 °C, Betriebszeitraum von 20 Jahren, Volllast) durchgeführt. Als Leistungsziel wurde 1 MW geothermische Wärmeleistung vorgegeben. Die gewinnbare elektrische Leistung wurde nur für die nach dem Direktverdampfungsverfahren arbeitenden Sonden unter Annahme eines Carnot-Prozesses (idealtypischer, reversibler Kreisprozess für Wärmekraftmaschinen. Der Carnot-Prozess ist ein wichtiger Grundpro-

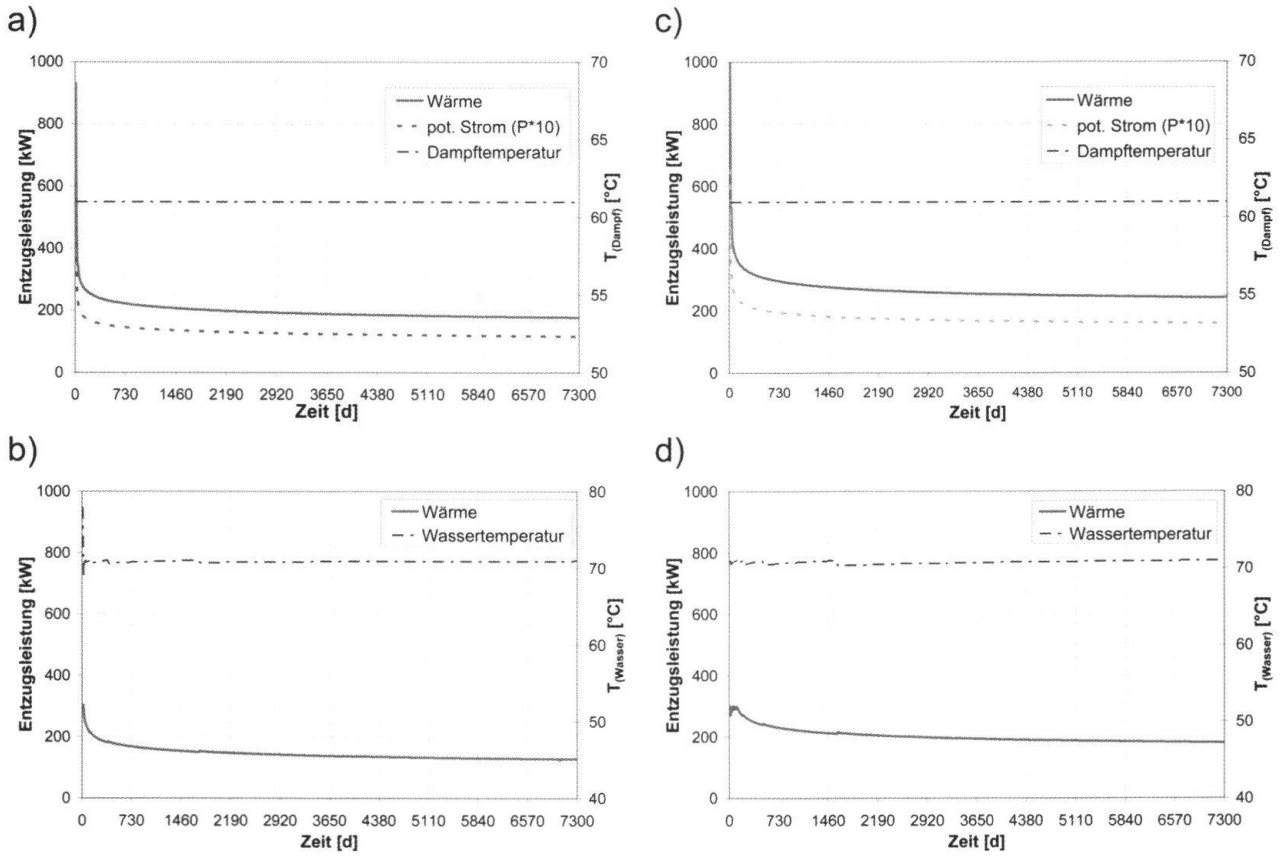

Fig. 5: Leistungsprognose für tiefe Erdwärmesonden an zwei Modellstandorten im Freistaat Sachsen (Modellstandort 1: a) NH_3 und b) H_2O sowie Modellstandort 2: c) NH_3 und d) H_2O). [5000 m Sondenlänge, 0,17 m Sondendurchmesser, 61°C Systemtemperatur und 20 Jahre Volllastbetriebsdauer].

zess der Thermodynamik; er wird als idealer theoretischer Vergleichsprozess verwendet, um reale Prozesse zu untersuchen. Praktisch kann der Carnot-Prozess nicht verwirklicht werden) prognostiziert. Die Ergebnisse für beide Modellstandorte sind in der Fig. 5 zusammengefasst.
Der Betrieb der Sonde mit C_3H_8 ist aufgrund der besonderen thermodynamischen Eigenschaften des Propans nicht möglich. Sowohl die dauerhaft verfügbaren geothermischen Wärmeleistungen als auch die korrespondierenden Carnot'schen Leistungen (NH_3) unterscheiden sich an beiden Modellstandorten (Tab. 4).

Modellstandort	Technologie	Wärme [kW]	Carnot [kW]
Nordsudetische-Ostbrandenburgische Senke	Direktverdampfung (NH_3)	ca. 180	ca. 12
	Zirkulation (H_2O)	ca. 130	-
Kirchberger Granit	Direktverdampfung (NH_3)	ca. 240	ca. 16
	Zirkulation (H_2O)	ca. 180	-

Tab. 4: Leistungen der simulierten Tiefen-Erdwärmesonden.

Einschätzend lässt sich sagen, dass das technische Potenzial bei einer Nutzung tiefer Erdwärmesonden im Allgemeinen klein ist. Es liegt je nach Art des Wärmeaustauschmediums und den gegebenen Standortbedingungen zwischen 240 kW und 130 kW dauerhaft verfügbare, geothermische Wärmeentzugsleistung. Die gewinnbare elektrische Leistung wird sich bei NH_3-betriebenen Erdwärmesonden im Bereich < 10 kW bewegen (Carnot'sche Leistung zwischen 12 kW und 16 kW). Die angestrebte Wärmeentzugsleistung von 1 MW war nur über einen geringen Zeitraum verfügbar.

6.2 Das ökonomische Potenzial

Mit Blick auf die Ergebnisse der Leistungsprognose für tiefe Erdwärmesonden ist einzuschätzen, dass es für tiefe Erdwärmesonden bis 5000 m Länge kein ökonomisches Potenzial gibt. Die Stromgewinnung aus geothermischer Energie mittels dieser Technologie ist aufgrund eines geringen geothermischen Wärmeentzuges und somit auch geringer elektrischer Leistungen unökonomisch. Die Investitionskosten für eine tiefe Erdwärmesonde im Bereich von ca. 6 Millionen Euro stehen in keinem ökonomischen Verhältnis zu Wärmeentzugsleistungen von 200-300 kW bzw. zu elektrischen Leistungen von < 10 kW.
Betrachtet man das Verhältnis von Investitionskosten zu den gewinnbaren elektrischen Leistungen ist festzustellen, dass sehr hohe Investitionsleistungen pro kWh getätigt werden müssen. Selbst wenn man die Einspeisungsvergütungen des novellierten EEG (das Erneuerbare-Energien-Gesetz in der novellierten Fassung vom 21. Juli 2004 [BGBl. I S. 1918] ist am 1. August 2004 in Kraft getreten) heranzieht, ergeben sich Amortisationszeiten von über 100 Jahren.

Das ökonomische Potenzial offener petrothermaler Systeme kann nicht eingeschätzt werden, da keine belastbare Aussage zu dem technischen Potenzial dieser Systeme getroffen werden kann. Erst wenn eine belastbare Aussage zur Grösse des nachhaltig verfügbaren Wärmeentzuges durch diese Systeme (z. B. durch Prognose, Feldtest oder Pilotanlage) zur Verfügung steht, kann ein Kosten-Nutzen-Verhältnis (z. B. Vollkostenrechnung, Gestehungskosten, Amortisationszeit) betrachtet werden.
Theoretisch sollte das technische Potenzial solcher HDR/HWR-Anlagen sehr gross sein (MW-Bereich). Dieses grosse geothermische Potenzial gilt es in der Zukunft zu erschliessen. Zu diesem Zweck ist mehr Forschungsarbeit erforderlich. So stellt die kontrollierte

Erzeugung eines offenen Wärmetauschers zwischen einer Anzahl von Bohrungen (z. B. Dubletten- oder Triplettenverfahren) im Kristallin in grossen Tiefen (5000 m), welche eine ausreichend grosse und dauerhaft verfügbare, hydraulische Permeabilität garantiert, das wesentliche Problem dar, welches es zu lösen gilt. Aus diesem Grund hat die Rheologie (z. B. Spannungszustand, hydraulisch initiiertes Bruchverhalten) kristalliner Gesteine in Tiefen von 5000 m einen entscheidenden Einfluss auf die Anwendbarkeit und das Gelingen des Verfahrens und muss genauer erforscht werden. Wie die Erfahrungen (z. B. Soultz-sous-Forêts, Bad Urach) der letzten beiden Jahrzehnte gezeigt hat, befindet sich die HDR/HWR-Technologie noch im Forschungsstadium, in welchem weitere Untersuchungen und Entwicklungsarbeit erforderlich sind. Sollte die HDR/HWR-Technologie in Zukunft sich zu einem ökonomisch einsatzfähigen Verfahren entwickeln, würden sich neue und weitreichende Perspektiven für die geothermale Stromerzeugung nicht nur im Freistaat Sachsen, sondern in der gesamten Welt eröffnen.

Offene hydrothermale Systeme fordern hingegen sehr gut durchlässige, sedimentäre Gesteinsschichten oder Anisotropiezonen im kristallinen Festgestein (z. B. Störungszonen) in grosser Tiefe und scheiden aufgrund der geologischen Verhältnisse für weite Teile des Freistaates von vornherein aus. Die Erkundung von tiefreichenden, hydraulisch sehr aktiven Störungszonen dürfte jedoch wahrscheinlich in demselben finanziellen Rahmen liegen, wie für die Exploration von Erdgas/Erdöl-Lagerstätten. Solch hohe Investitionskosten würden sich aus heutiger Sicht nicht durch die potenziell mögliche Stromgewinnung in ökonomischen Zeiträumen amortisieren lassen.

6.3 Perspektiven der geothermischen Nutzung im Freistaat Sachsen

Der Freistaat Sachsen hat derzeit technologiebedingt kein ökonomisches Potenzial der Nutzung tiefengeothermischer Ressourcen. Aus diesem Grund muss es mittel- bis langfristig die Aufgabe von staatlichen Forschungseinrichtungen, Behörden und der Industrie sein, die technologische Weiterentwicklung der HDR/HWR-Technologie voranzutreiben.

Im Gegensatz dazu besitzt der Freistaat Sachsen schon jetzt ein sehr gutes ökonomisches Potenzial der geothermischen Wärmeerzeugung. So stellen oberflächennah (< 400 m), zur dezentralen Wärme- und Kälteversorgung eingesetzte Erdwärmesonden, insbesondere Systeme mit Direktverdampfer, eine ökonomisch reizvolle, nahezu standortunabhängige, technologisch relativ einfache und in der Praxis bewährte Technologie dar. Diese Systeme helfen Primärenergie (z. B. Gas, Heizöl) zu sparen und entlasten die Umwelt durch Verringerung des CO_2-Ausstosses. Die Verbesserung der dazu eingesetzten Wärmepumpentechnik (z. B. Gasantrieb, Einsatz von BHKWs) lassen diese Systeme in Verbindung mit der geothermischen Erzeugung von Klimakälte nicht nur gegenüber konventionellen Heizungsanlagen bestehen, sondern weisen schon heute geringere Gestehungskosten auf.

Hieraus lassen sich die beiden Schlussfolgerungen für die geothermische Nutzung im Freistaat Sachsen ableiten (Grafe 2006):

- Weiteres und grösseres Engagement bei der HDR/HWR-Forschung (Erforschung von Spannungszuständen und hydraulisch initiierten Bruchverhalten von Gesteinen unter den Bedingungen in 5000 m Tiefe, flächendeckende Untersuchungen der Wärmeflussdichte).
- Ein umweltpolitisches Umdenken hin zur Unterstützung und Förderung von Projekten der geothermischen Wärmeversorgung (Verbesserung der Effizienz des

Wärmeentzuges durch Einsatz und technologische Weiterentwicklung des Direktverdampferverfahrens, Erforschung der Prozesssteuerung von Erdwärmesondenanlagen, Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie). [Initiative der Bundesregierung Deutschland zur Förderung der Erneuerbaren Energien im Wärmemarkt vom Juni 2006 (Konsultationspapier unter http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/37197/)].

Abkürzungen und Formeln

BHE: borehole heat exchanger (Erdwärmesonde); BHKW: Blockheizkraftwerk; C_3H_8: Propan; c_p: spezifische Wärmekapazität; DWD: Deutscher Wetterdienst; EED: EarthEnergyDesigner (Simulationsprogramm, Dr. G. Hellström u.a., Lund University, Schweden); EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz (Bundesrepublik Deutschland); EGS: enhanced geothermal systems; ESRI: Environmental Systems Research Institute (Softwarehersteller von Geoinformationssystemen); FuE: Forschung und Entwicklung; HDR: hot dry rock; HFR: hot fractured rock; HWR: hot wet rock; ModAMO: Modell-Ammoniak (Simulationsprogramm, Prof. F. Häfner, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland); ModEW: ModellErdwärme (Simulationsprogramm, Prof. F. Häfner, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland); n: Porosität; NH_3: Ammoniak; T: Temperatur; λ: Wärmeleitfähigkeit; ρ: Dichte.

Literatur

Boeck, H.-J, Grafe, F., Lange, Th., Schneider, P., Tunger, B. & Wilsnack, Th. 2005: Bestandsaufnahme und nutzungsorientierte Analyse des tiefengeothermischen Potenzials des Freistaats Sachsen und seiner unmittelbaren Randgebiete. Unpubl. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (AZ 40410229), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Deutschland, 138 S., 29 Karten.

Boeck, H.-J, Grafe, F., Lange, Th., Schneider, P., Tunger, B. & Wilsnack, Th. 2004: Bestandsaufnahme und nutzungsorientierte Analyse des tiefengeothermischen Potenzials des Freistaats Sachsen und seiner unmittelbaren Randgebiete. Unpubl. Sachstandsbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Deutschland, 104 S.

Förster, A. & Förster, H.-J. (2000): Crustal composition and mantle heat flow: Implications from surface heat flow radiogenic heat production in the Variscian Erzgebirge (Germany). Journal of Geophysical Research. 105, B12, 917-937.

Förster, A., Förster, H.-J. & Stromeyer, D. (2003): An internally consistent present-day thermopetrological model of the Erzgebirge crust. Journal of the Czech Geological Society, 48(1), 49-50.

Grafe, F. 2006: Perspektiven der geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung in Sachsen (Deutschland). Geothermische Energie. 50, 28-31.

Häfner, F., Wagner, S., Wilsnack, Th., & Boy, S. 2003: Modellierung des Stoff- und Energietransportes für die Tiefe Erdwärmesonde Bremerhaven im Ammoniak-Zirkulationsverfahren. Unpubl. Forschungsbericht, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland, 31 S.

Hurter, S. & Haenel, R. (eds.) 2002: Atlas of geothermal resources in Europe. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 93 S., 98 Karten.

Kaltschmitt, M. & Schröder, G. 2002: Energiewirtschaftliche Einordnung, Konkurrenzsituation, FuE-Bedarf, Handlungsoptionen und Zeitachse. Gutachten im Auftrag des TAB, IfE Leipzig.

Katzung, G, Diener, I., Kühn, P., Oelsner, Ch., Gläser, S., Hurtig, E., Schneider, D. & Zschernig, J. (1984): Geothermieatlas der DDR. Zentrales Geologisches Institut, Berlin.

Oelsner, Ch. (1982): Das Erdkrustentemperaturfeld der DDR und seine Interpretation bezüglich geothermischer Ressourcen. Freiberger Forschungshefte, C378, 9-27.