

## Erhöhte Entzugsleistung von Erdwärmesonden durch Salzstockhochlagen

Jörn Bartels, Joachim Fritz, Doreen Gehrke & Wolfgang Wirth\*

Bartels, J., Fritz, J., Gehrke, D. & Wirth, W. (2010): Erhöhte Entzugsleistung von Erdwärmesonden durch Salzstockhochlagen. [Increased heat extraction capacity of borehole heat exchangers in near-surface salt structures.] – Z. dt. Ges. Geowiss., 161: 401–409, Stuttgart.

**Kurzfassung:** Die in Norddeutschland häufigen Salzstrukturen weisen typischerweise positive Temperaturanomalien in ihrem oberen Bereich und in den Sedimenten der Überdeckung auf. Darüber hinaus besitzt Salz, verglichen mit dem umgebenden Gestein, eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Wenn es sich um Salzstockhochlagen handelt, könnten dort mit vertretbarem Aufwand flache und mitteltiefe Erdwärmesonden im Salz errichtet werden, die dann als Quelle für Wärmepumpen dienen.

Durch eine numerische Simulationsstudie wurde untersucht, welche energetischen Effizienzvorteile sich daraus gegenüber Erdwärmesonden ohne Salzstrukturen ergeben. Die Entzugsleistung erreicht ab 400 m Sondenlänge, je nach Abdeckungsmächtigkeit und Sondereintrittstemperatur, den zwei- bis dreifachen Wert von Erdwärmesonden außerhalb von Salzstrukturen. Daraus ergibt sich ein interessantes Potenzial für die geothermische Energiegewinnung.

**Abstract:** Salt structures occurring in North Germany quite often show typical positive temperature anomalies in their upper sections and overburden. In addition, salt is characterised by high thermal conductivity compared to the surrounding rock. In the case of near-surface salt structures, shallow to medium depth borehole heat exchangers (BHE) can be installed, utilising the heat content of the salt as an energy source to the heat pumps. A numerical simulation study was performed to compare the energetic efficiency of BHEs installed in salt structures with BHEs in other formations. At borehole depths deeper than 400 m, the heat extraction capacity is, depending on the thickness of the cover and the BHE inlet temperature, 2 to 3 times higher in salt structures compared to other formations. This suggests an interesting potential for the recovery of geothermal energy in salt structures.

**Schlüsselwörter:** Geothermische Energie, Wärmepumpen, Salzdomen, Wärmeleitfähigkeit

**Keywords:** geothermal energy, heat pumps, salt domes, thermal conductivity

### 1. Einleitung

Salzstrukturen sind charakteristischer Bestandteil der norddeutschen Geologie (Reinhold et al. 2008). Wesentlich sind dabei vor allem Strukturen, die sich aus marinen Evaporitablagerungen des Zechstein gebildet haben. Eine typische Erscheinungsform ist der Salzstock, eine rundliche oder elliptische Salzstruktur, die pilzartig in das nichtsalinare Deckgebirge aufgestiegen ist und dieses dabei durchbrochen hat. Angetrieben wurde dieser Aufstieg durch die Gravitation und den Dichteunterschied zwischen dem spezifisch leichteren Steinsalz und der spezifisch schwereren Überdeckung. Manche Salzstöcke stehen mit ihrem „Salzhut“ weniger als 200 m unter der Erdoberfläche. In diesem Fall spricht man von einer Salzstockhochlage. Allein in Niedersachsen sind mehr als 80 solcher Salzstockhochlagen bekannt.

Es stellt sich deshalb die Frage, ob durch die, verglichen mit anderen Sedimentgesteinen, sehr hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes ein besonderes Potenzial zur geothermischen Nutzung besteht. Eine direkte hydrogeothermale Nutzung ist im Salz aufgrund der fehlenden Wasserführung nicht möglich. Im Umfeld von Salzstrukturen treten aber typischerweise Temperaturanomalien auf, die auf den hohen Wärmeleitfähigkeitskontrast zwischen Salz und umgebenden Sedimenten und den dadurch verursachten „Kamin“-Effekt zurückzuführen sind (Giesel & Holz 1970). Über und im oberen Bereich der Struktur ist die Temperatur höher, unter und im unteren Bereich der Struktur dagegen niedriger als in vergleichbaren Tiefen ohne Salzstrukturen (Fromme et al. 2010). Deshalb erschien für die geothermische Energiegewinnung besonders die Kombination von oberflächennahen (bis 400 m Tiefe) und mitteltiefen (bis 1000 m Tiefe) Erd-

\*Anschriften der Autoren:

Dr. Jörn Bartels, Doreen Gehrke (gtn@gtn-online.de), Geothermie Neubrandenburg GmbH, Seestraße 7a, D-17033 Neubrandenburg; Joachim Fritz, Dr. Wolfgang Wirth (Wolfgang.Wirth@lbeg.niedersachsen.de), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Stilleweg 2, D-30655 Hannover.

wärmesonden mit einer Salzstockhochlage interessant. Es wurde untersucht, wie die thermische Leistung von Erdwärmesonden durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes und die typische Temperaturanomalie einer Salzstruktur beeinflusst wird. Dazu wurden zwei numerische Modelle von Koaxialsonden in Salzstöcken mit 100 bzw. 200 m Überdeckung und zum Vergleich ein Modell ohne Salzstruktur entwickelt und mit ihnen der Betrieb unterschiedlicher Sondenkonfigurationen als Energiequelle für eine Wärmepumpenanlage simuliert. Für die Simulationen wurden angepasste, realistische Sondenkonfigurationen in mehreren Teufenstufen verwendet, um den Einfluss der Sondentiefe systematisch zu untersuchen. Insgesamt wurden so 226 unterschiedliche Szenarien simuliert.

Die initialen Temperaturfelder für die Simulation des Betriebs der Erdwärmesonden wurden vorab mit einem kalibrierten dreidimensionalen Wärmetransportmodell berechnet. Für dessen Kalibrierung wurden grobe Strukturdaten und Temperaturmessungen aus einem realen Salzstock verwendet und im numerischen Modell über die Variation (i) der Wärmestromdichte am unteren Rand und (ii) der Wärmeleitfähigkeit der Salzstockabdeckung angepasst. Das Temperaturfeld wurde dann für zwei Salzstockmodelle mit verschiedener Überdeckung und das Referenzmodell ohne Salzstock bis 4000 m Tiefe berechnet. Diese Modelle sind strukturell bewusst einfach gehalten. Sie decken nicht das gesamte Spektrum der möglichen Strukturen in den Salzstockhochlagen Norddeutschlands ab. Sie sollen für die eigentlichen zylindersymmetrischen Sondensimulationen ein realistisches initiales Temperaturprofil in einem solchen Salzstock vor allem in Abhängigkeit von der Überdeckungsmächtigkeit bereitstellen. Der benötigte Teufenbereich des

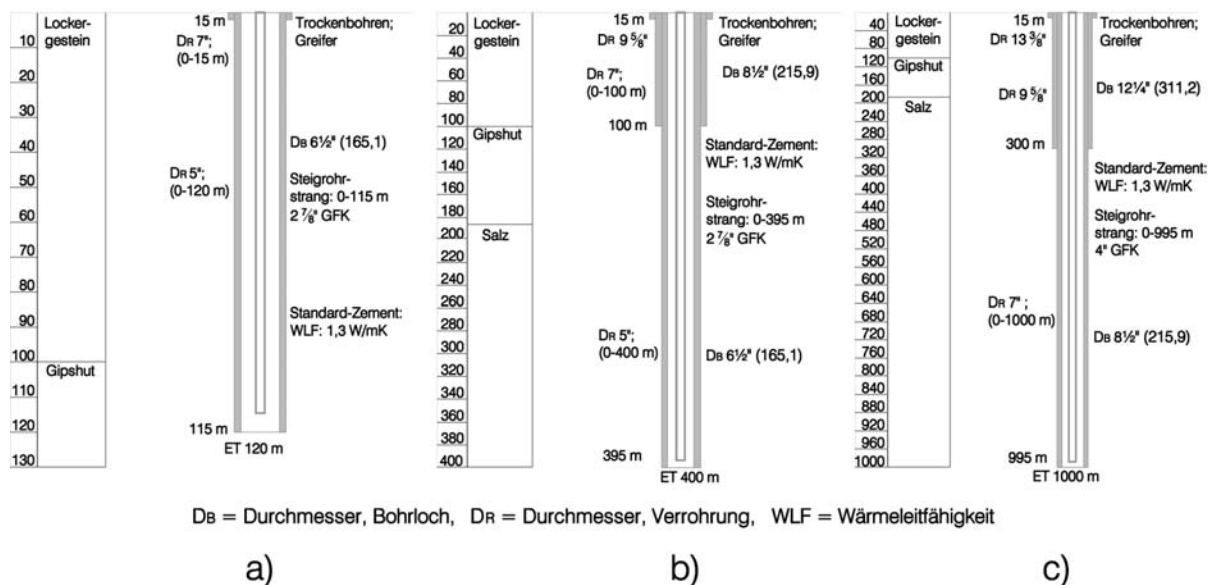
Temperaturprofils reicht damit maximal bis 1000 m. Die horizontale Ausdehnung des thermisch beeinflussten Bereiches soll sich auf den Salzstock beschränken. Das trifft zu, wenn die Sonde ausreichend weit vom Rand errichtet wird. Das stellt einerseits eine Maximalabschätzung der salzbedingten Steigerung der Entzugsleistung dar und ermöglicht es andererseits, für die Sondenbetriebsimulation ein zylindersymmetrisches Modell zu verwenden.

Weiter wurde die Frage untersucht, wodurch die beobachtete energetische Effizienzsteigerung hauptsächlich bewirkt wird – durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes oder die salzbedingte positive Temperaturanomalie?

Die Simulationsrechnungen sind Bestandteil einer umfangreicher angelegten Untersuchung, bei der Bohrkonzepte und -kosten, Wärmepumpeneffizienz und -kosten, optimale Zirkulationsraten und die Wirtschaftlichkeit insgesamt betrachtet wurden (GTN 2009).

## 2. Sondaufbau und -betrieb

Geometrie und Materialparameter für die Erdwärmesonden in den Simulationsmodellen basieren auf einer an die Geologie angepassten Bohrungsplanung für Koaxialsonden unterschiedlicher Länge (100, 200, 300, 400, 600, 800 und 1000 m). Die Bohrungsplanung entsprechend API-Standard war Bestandteil der oben genannten umfangreicheren Studie (GTN 2009). Je nach Sondenlänge wurden drei unterschiedliche Bohrlochkonstruktionen verwendet. Diese sind für die Variante mit 100 m Abdeckung mit den wichtigsten Kenngrößen in Abbildung 1 dargestellt. Entscheidend für die Effizienz der Sonde ist eine gute Wärmeisolation des Steig-



**Abb. 1:** Bohrlochkonstruktionen für die Sonden bis (a) 200 m Länge, (b) bis 400 m Länge und (c) bis 1000 m Länge für die Variante mit 100 m Salzstockabdeckung.

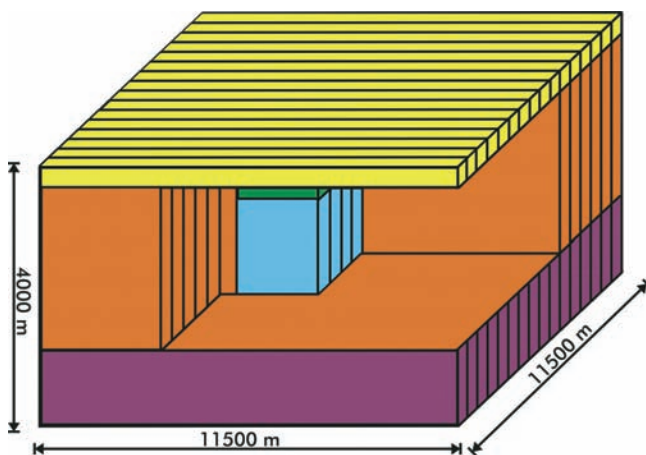
**Fig. 1:** Well completion of the BHEs with a length of (a) up to 200 m, (b) 400 m and (c) 1000 m for the case of 100 m sediment cover.

rohres. Hierfür werden glasfaserverstärkte Kunstharzrohre, sogenannte GFK-Tubinge, verwendet. Standrohr, Anker- und Produktionsrohrtour bestehen aus Stahl. Alle Rohrtouren werden über die gesamte Länge zementiert. Das Wärmeträgerfluid ist Wasser, bei den Varianten mit einer Sonden-eintrittstemperatur von 0 °C unter Zusatz von Ethylenglykol als Frostschutzmittel.

Es wurden Varianten mit Umwälzmengen von 4, 6 und 8 l/s und Volllaststunden von 2000 und 8000 h/a gerechnet, um den Einfluss dieser Betriebsparameter zu untersuchen. Die Wiedereintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids beträgt bei Sonden bis 300 m Länge 0 °C. Für die tieferen Sonden wurden zwei für einen Wärmepumpenbetrieb typische Varianten mit 0 °C und 10 °C Wiedereintrittstemperatur simuliert. Beide Varianten unterscheiden sich in der erreichbaren Leistungszahl der Wärmepumpe, der erreichbaren Entzugsleistung und, wegen der unterschiedlichen Sondenbefüllung (mit und ohne Ethylenglykol), hinsichtlich der Kosten und führen so zu unterschiedlicher Wirtschaftlichkeit.

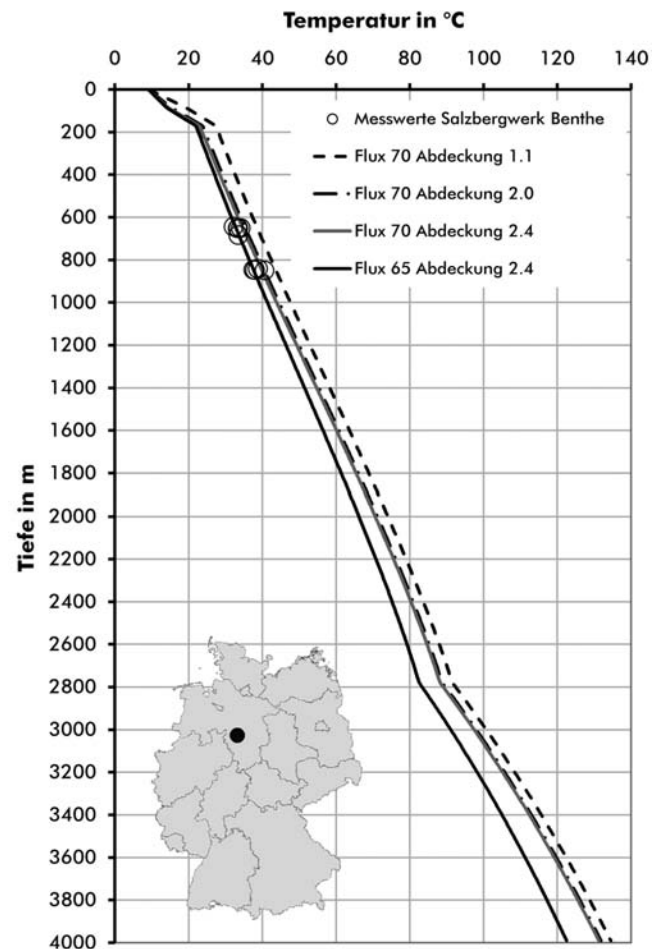
### 3. Simulation der initialen Temperaturprofile

Lerche & Peterson (1995), Lotz (2004) und eigene Modellrechnungen zeigen, dass das Temperaturfeld innerhalb und in der Umgebung einer Salzstruktur durch den Wärmetransport in jede der drei Raumrichtungen beeinflusst ist. Deshalb musste das initiale Temperaturprofil für die Entzugsleistungsberechnung vorab mit einem dreidimensionalen numerischen Modell berechnet werden. Auf Basis des Simulators FEFLOW von DHI-WASY (Version 5.3) wurden dazu



**Abb. 2:** Schematischer Aufbau des dreidimensionalen Modells (aufgeschnitten): 17 Vertikalschichten, mit känozoischen Sedimenten (gelb), mesozoischen Sedimenten (orange), permokarbonischem Gestein (violett), Gipshut (grün), Zechstein (Salzstock, blau).

**Fig. 2:** Schematic structure of the 3D model (cut-open): 17 vertical layers with Cenozoic sediments (yellow), Mesozoic sediments (orange), Permo-Carboniferous rocks (purple), cap rock (green), Zechstein salt (salt dome, blue).



**Abb. 3:** Temperatur-Tiefen-Profil als Ergebnis der Kalibrierung (i) der unteren Randbedingung vertikale Wärmestromdichte („Flux“ in  $\text{mW/m}^2$ ) und (ii) der Wärmeleitfähigkeit der känozoischen Sedimente („Abdeckung“ in  $\text{W/m/K}$ ); Inset: Lage des Salzstocks Benthe (schwarzer Kreis).

**Fig. 3:** Temperature/depth profiles resulting from the calibration of (i) lower boundary condition vertical heat flux density („Flux“ in  $\text{mW/m}^2$ ) and (ii) thermal conductivity of Cenozoic sediments („Abdeckung“ in  $\text{W/m/K}$ ); inset: position of the salt structure Benthe (black circle).

drei verschiedene Modelle erstellt: zwei Modellsalzstöcke mit 100 m bzw. 200 m Überdeckung sowie ein Modell ohne Salzstock. Damit konnten die Temperaturverteilung in den Modellsalzstöcken und deren Umgebung und die Unterschiede zur Temperaturverteilung ohne Salzstockeinfluss ermittelt werden.

Die Modelle bestehen aus 17 Schichten. Diese wurden vertikal angeordnet (Abb. 2), weil sich dadurch im Simulator FEFLOW Temperatur-Tiefen-Profilen technisch bedingt einfacher generieren lassen. Die horizontale Modellausdehnung wurde mit 11 500 m ausreichend groß gewählt, um sicher zu stellen, dass der seitliche Modellrand nicht mehr im vom Salzstock thermisch beeinflussten Bereich liegt. Der berechnete Isothermenverlauf in Abbildung 4

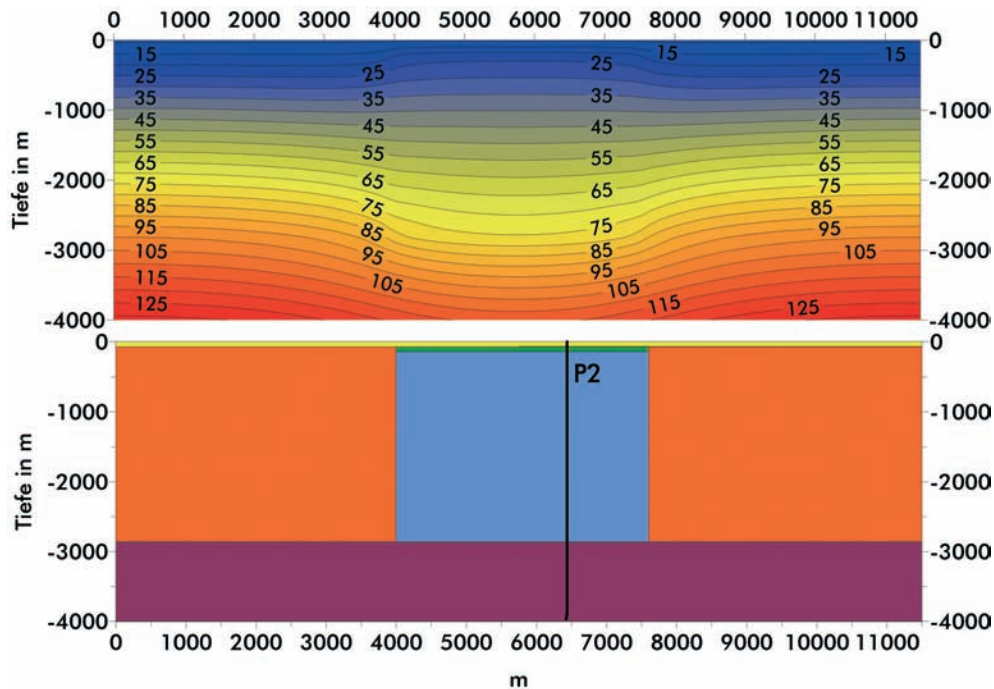
**Tab. 1:** Verwendete Wärmeleitfähigkeiten aus Voigt & Häfner (1985)<sub>1</sub>, Clauser (2006)<sub>2</sub>, Norden & Förster (2006)<sub>3</sub>, und dort diskutierte Zitate, Salzstock Benthe (Creutzburg 1963)<sub>4</sub>, Lotz (2004)<sub>5</sub>.

**Tab. 1:** Thermal conductivity values as applied in the simulation model.

	Modellparameter „Wärmeleitfähigkeit Gesteinsmatrix“ in W/(m*K)	Effektive Wärmeleitfähigkeit des fluidgesättigten Gesteins im Modell in W/(m*K) mit Quellenangabe
Känozoikum	2,4 (Kalibrierungsergebnis)	2,1
verfestigte mesozoische Sandsteine	2,2	1,9 <sub>1,5</sub>
Gipshut	1,3	1,3 <sub>2</sub>
Zechsteinsalz	5,7	5,7 <sub>2,4</sub>
Permokarbon	2,7	2,4 <sub>3</sub>

oben zeigt, dass das der Fall ist. Bei beiden Modellsalzstöcken wird unterhalb einer 100 bzw. 200 m mächtigen känozoischen Deckschicht, die das ganze Modellgebiet überdeckt, ein 85 m mächtiger Gipshut über dem Salzstock angenommen. Der Salzstock selbst erstreckt sich mit einem quadratischen Grundriss von 3500 m Seitenlänge bis zu einer Teufe von 2800 m (mittlerer Wert nach Baldschuhn et al. 1996) und liegt im Zentrum des Modellgebietes. Unter dem Salzstock liegen permokarbonische Gesteine, die sich wieder horizontal über das gesamte Modellgebiet erstre-

cken (Abb. 2 und Abb. 4 unten). Obwohl das Temperaturfeld für die Sondensimulationen nur bis zu einer Teufe von 1000 m benötigt wird, liegt der untere Modellrand bei 4000 m und damit weit unterhalb der Salzstruktur. Dadurch wird verhindert, dass die notwendige Modellapproximation eines konstanten, ausschließlich vertikalen Wärmestroms am unteren Rand die Temperaturen im weiterverwendeten oberen Viertel des Modellgebietes beeinflusst. Die radio-gene Wärmeproduktion oberhalb 4000 m wurde vernachlässigt, was mit den Werten von Lotz (2004: Tab. 3.9)



**Abb. 4:** Schnitt durch das Zentrum des simulierten 3D-Temperaturmodells des Salzstocks Benthe (oben) und Verteilung der Wärmeleitfähigkeit im Modell (unten): känozoische Sedimente (Top, gelb), mesozoische Sedimente (mittlerer Horizont, orange), permokarbonisches Gestein (unterer Horizont, violett), Gipshut (grün), Zechsteinsalz (Salzstock, blau) und Profillinie P2.

**Fig. 4:** Cross-section through the centre of the simulated 3D temperature model of the salt structure Benthe (above) and thermal conductivity zones of the model (below): Cenozoic sediments (top, yellow); middle formation – Mesozoic rocks (orange); lower formation – Permo-Carboniferous rocks (purple), cap rock (green); Zechstein salt (blue) and vertical profile line P2.

einem Beitrag von weniger als  $5 \text{ mW/m}^2$  zur Wärmestromdichte an der Oberfläche entspricht.

Die Modellauflösung beträgt  $680 \text{ m}$  zwischen den vertikalen Modellebenen und  $67\text{--}100 \text{ m}$  in den vertikalen Modellebenen.

Die Zuordnung von Wärmeleitfähigkeiten zu den Struktureinheiten des Modells erfolgte in der Regel auf der Basis von in der Literatur angegebenen Werteintervallen. Dabei wurde beim umgebenden Sedimentgestein jeweils ein Wert am unteren Rand des nach den Literaturangaben möglichen Intervalls gewählt, um durch einen hohen Leitfähigkeitskontrast zum Salz eine Maximalabschätzung des Potenzials zur Effizienzsteigerung zu erhalten. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Dabei muss als Modellparameter in FEFLOW die Leitfähigkeit der Gesteinsmatrix eingegeben werden. Durch porositätsgewichtete arithmetische Mittelung mit der Wärmeleitfähigkeit des Porenfluids (hier  $0,65 \text{ W/m/K}$ ) ergibt sich der für die Simulation effektive Wert. Dieser entspricht den angegebenen Literaturwerten, die für fluidgesättigtes Gestein gelten und, soweit bekannt, Laborwerte sind.

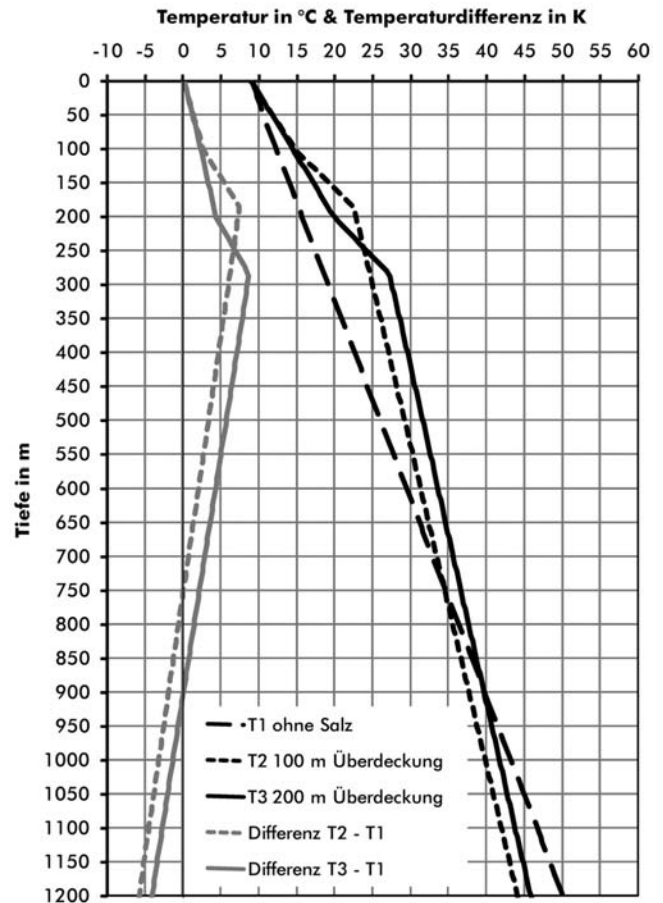
Die mittlere Wärmeleitfähigkeit der heterogenen känozoischen Abdeckung ist einerseits ein unsicherer Parameter, aber andererseits bestimmend für das Temperaturprofil im oberen, gegenüber dem Umfeld erwärmten Bereich der Salzstruktur. Ihr Wert wurde deshalb im Rahmen einer im Folgenden beschriebenen Modellkalibrierung für das Beispiel des Salzstocks Benthe bestimmt.

Die thermische Randbedingung am oberen Rand ist eine konstante Temperatur von  $9 \text{ }^\circ\text{C}$  entsprechend dem langjährigen Temperaturmittel an der Oberfläche (DWD 2010). Am unteren Rand wurde eine konstante vertikale Wärmestromdichte angesetzt, die auch im Zuge der Modellkalibrierung bestimmt wurde.

Zur Kalibrierung wurden unveröffentlichte Gebirgstemperaturmessungen der damaligen Bundesanstalt für Bodenforschung Hannover im Kalisalzbergwerk Ronnenberg aus dem Jahr 1962 herangezogen (Creutzburg 1962; Abb. 3) und das oben beschriebene Salzstockmodell an die Gegebenheiten des dortigen Salzstocks Benthe grob angepasst ( $85 \text{ m}$  Abdeckung,  $85 \text{ m}$  Gipshut; Geologische Karte von Niedersachsen [1934]). Die vertikale Wärmestromdichte am unteren Modellrand und die Wärmeleitfähigkeit der känozoischen Abdeckung wurden variiert bis die beste Anpassung der Modelltemperaturen an die Messwerte erreicht war. Das ist bei  $65\text{--}70 \text{ mW/m}^2$  für die Wärmestromdichte (Vergleich: Hannover:  $70 \text{ mW/m}^2$ , in Beer & Hurtig 1999) und  $2,1 \text{ W/m/K}$  für die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Abdeckung der Fall (Abb. 3).

Abbildung 4 zeigt das damit berechnete Temperaturfeld entlang eines vertikalen Schnittes durch den Modellsalzstock. Die typischen positiven und negativen Wärmeanomalien mit erhöhten Temperaturen im oberen und erniedrigten Temperaturen im unteren Bereich sind deutlich erkennbar.

Die resultierenden Temperaturfelder werden im Folgenden mit Temperaturfeld 1 (T1, ohne Salzstock), Temperaturfeld 2 (T2, Salzstock mit  $100 \text{ m}$  Überdeckung und  $85 \text{ m}$  Gipshut) und Temperaturfeld 3 (T3, Salzstock mit  $200 \text{ m}$  Überdeckung und  $85 \text{ m}$  Gipshut) bezeichnet.



**Abb. 5:** Temperatur-Tiefen-Profile in der Mitte des Salzstocks und Temperaturdifferenz zum simulierten Profil ohne Salzstock entlang den oberen  $1200 \text{ m}$  von Profillinie P2 (Abb. 4).

**Fig. 5:** Temperature/depth profiles and temperature difference to reference profile generated without salt structure along the upper  $1200 \text{ m}$  of profile line P2 (Fig. 4).

Abbildung 5 zeigt das vertikale Temperaturprofil entlang Profillinie 2 aus Abbildung 4 für die drei berechneten Modellvarianten bis  $1200 \text{ m}$  Teufe. Der tatsächlich simulierte Tiefenbereich reicht aber bis  $4000 \text{ m}$  u. GOK. Der Einfluss eines Salzstockes auf die natürliche Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der überdeckenden Schichten ist in Abbildung 5 als Differenz zur Situation ohne Salzstock verdeutlicht. Die maximale Temperaturdifferenz zur Referenzsituation ohne Salzstock (T1) liegt beim Temperaturfeld T2 bei  $7,3 \text{ K}$  in  $184 \text{ m}$  Tiefe und beim Temperaturfeld 3 bei  $8,6 \text{ K}$  in  $288 \text{ m}$ . Die um  $100 \text{ m}$  mächtigere Überdeckung bei T3 bewirkt dabei z. B. in  $1000 \text{ m}$  Tiefe eine um  $1,9 \text{ K}$  höhere Temperatur gegenüber T2. Unterhalb von  $750 \text{ m}$  (T2) bis  $900 \text{ m}$  (T3) ist die Temperaturdifferenz zur Situation ohne Salzstock (T1) negativ, d. h. hier beginnt der Bereich der negativen salzbedingten Temperaturanomalie.

## 4. Energetische Effizienz: Resultate für die Entzugsleistung

Die Simulation des Erdwärmesondenbetriebs zur Untersuchung der Entzugsleistung unter verschiedenen Randbedingungen erfolgte mit dem Simulator SHEMAT (Clauser 2003). Der Aufbau der verschiedenen Koaxialsonden (Abb. 1) kann am besten mit einem zweidimensionalen (Radius, Teufe), zylindersymmetrischen Sondenmodell umgesetzt werden. Der umgebende Gesteinskörper ist folglich auch ein Zylinder. Er hat einen Radius von maximal 880 m. Der modellierte Bereich reicht horizontal nicht über den Salzstockrand hinaus. Die maximale vertikale Erstreckung beträgt 1000 m. Die radiale Modellauflösung reicht von wenigen Millimetern im Bereich der Koaxialsonde bis zu 10 m am äußeren Modellrand. Vertikal ist die Auflösung konstant 10 m. Eine probeweise weitere Verfeinerung änderte die Simulationsergebnisse nicht mehr.

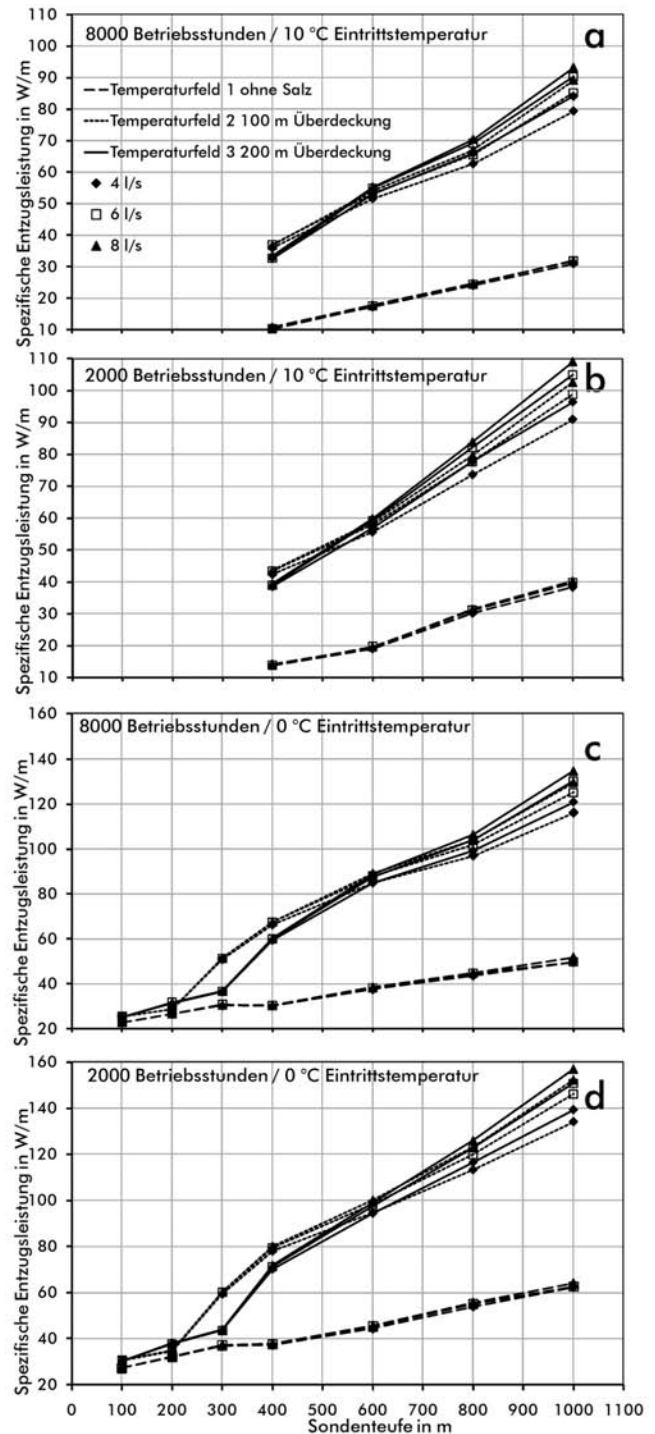
Das mit dem dreidimensionalen FEFLOW-Salzstockmodell berechnete jeweilige initiale Temperaturprofil wurde als Anfangszustand im gesamten Modellgebiet des SHEMAT-Erdwärmesondenmodells vorgegeben. Es repräsentiert einen zentrumsnahen Sondenstandort im Salzstock entsprechend der Profillinie 2 in Abbildung 4. Für die Sondensimulation über 10 Jahre gilt damit die Annahme, dass der radiale thermische Einflussbereich des Sondenbetriebes im Simulationszeitraum klein ist verglichen mit der Salzstockausdehnung. Tatsächlich ergeben sich in den Rechnungen maximal 190 m Radius für den Bereich mit Temperaturänderungen größer 0,5 K nach 10 Jahreszyklen Betrieb. Damit ist der Modellrand auch weit genug entfernt, um einen Einfluss der seitlichen Randbedingungen auf das Ergebnis auszuschließen. Am oberen und unteren Rand wurden mit Ausnahme des Sondenkopfes konstante Temperaturen vorgegeben.

Die Gesteinsparameter entsprechen den Werten des dreidimensionalen Modells.

Durch eine Quellrandbedingung im Ringraum am Kopf der Sonde zirkuliert das Sondenfluid (Wasser oder Wasser mit Ethylenglykol) entsprechend den vorgegebenen Betriebsweisen der Varianten (Rate, Temperatur, Betriebsunterbrechungen im Sommer). Der Temperaturverlauf im Steigraum am Kopf der Bohrung ist das Ergebnis der Simulationen.

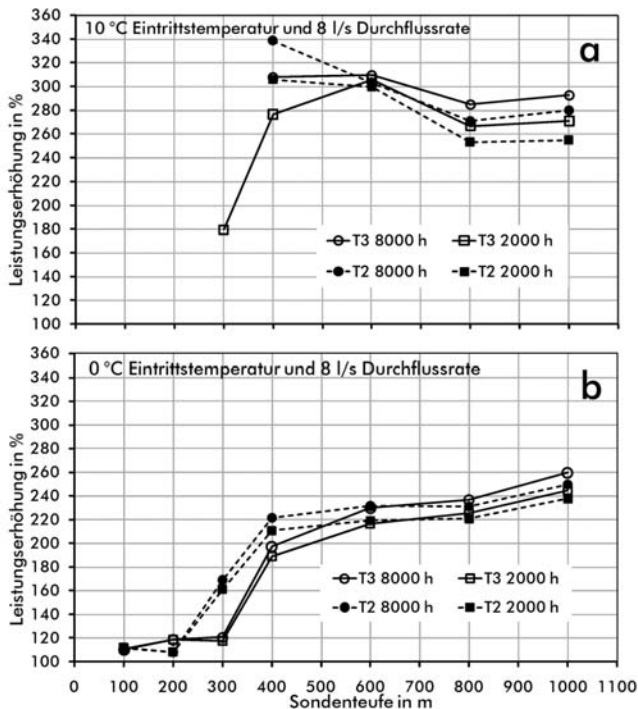
Aus den simulierten Kopftemperaturen kann der Zeitverlauf der Entzugsleistungen berechnet werden. In Abbildung 6 sind die berechneten spezifischen Entzugsleistungen pro Meter Erdwärmesonde nach zehn Jahren Betriebszeit in Abhängigkeit von Salzstockabdeckung, Sondenlänge, Umwälzmenge, Volllaststunden und Sondereintrittstemperatur dargestellt. In Abbildung 7 ist der prozentuale Anstieg gegenüber der Situation ohne Salzstruktur ausgewertet. Betrachtet man anhand dieser Diagramme für die Modelle mit Salzstock die Erhöhung der Entzugsleistung gegenüber einer gleichen Sonde im Temperaturfeld ohne Salzstock als Maß für die Effizienzsteigerung durch die besonderen thermischen Eigenschaften des Salzes, so ergeben sich aus dieser Parameterstudie folgende Abhängigkeiten und Trends:

Die beiden Varianten mit 8000 und 2000 Betriebsstunden pro Jahr stehen jeweils für ein typisches Wärmeabnehmer-



**Abb. 6:** Spezifische Entzugsleistungen nach 10 Betriebsjahren als Funktion der Sondenteufe, Durchflussrate und Überdeckungsmächtigkeit für verschiedene Anzahl der jährlichen Betriebsstunden (2000 h und 8000 h) bei einer Sondereintrittstemperatur von 10 °C (a, b) und 0 °C (c, d).

**Fig. 6:** Specific heat extraction rate in W/m after 10 years of operation vs. BHE depth for different circulation rates and overburden thicknesses; 2000 (b, d) and 8000 (a, c) operation hours per year at a BHE inlet temperature of 10 °C (a, c) and 0 °C (b, d).



**Abb. 7:** Steigerung der spezifischen Entzugsleistung durch den Salzstock als Funktion der Sondentiefe für verschiedene Jahresbetriebsstunden (2000 h, 8000 h) und Überdeckungsmächtigkeiten (T2 = 200 m, T3 = 300 m) bei einer Sondereintrittstemperatur von 10 °C (a) und 0 °C (b); ohne Salzstock = 100 %.

**Fig. 7:** Increase of specific heat extraction rate due to a surrounding salt structure vs. BHE depth for different operation hours per year (2000 h and 8000 h), sediment cover thickness (T2 = 100 m, T3 = 200 m) at a BHE inlet temperature of 10 °C (a) and 0 °C (b); without salt structure = 100 %.

profil mit ganzjährigem oder nur winterlichem Heizbedarf. Erwartungsgemäß sind in allen Simulationen die nach 10 Jahreszyklen und 8000 Betriebsstunden pro Jahr erreichten absoluten Sondenleistungen wegen des größeren Gesamtwärmeentzugs aus dem Salz geringer als die absoluten Sondenleistungen nach 10 Jahren bei 2000 Betriebsstunden pro Jahr.

Bei einer Eintrittstemperatur von 0 °C werden höhere Entzugsleistungen erreicht als bei 10 °C. Die absolut höchsten Entzugsleistungen treten bei den Modellvarianten im Temperaturfeld T3 mit 200 m Abdeckung auf.

Mit einer Erdwärmesonde im Salzstock kann ab 400 m Sondentiefe die 2–3fache spezifische Entzugsleistung gegenüber der gleichen Sonde ohne Salzstruktur erreicht werden (Abb. 7). Das ist im Detail abhängig von Überdeckung, Sondentiefe und Eintrittstemperatur. Die höchsten relativen Steigerungen durch die Salzstockhochlage, um mehr als das 3fache, werden bei der Eintrittstemperatur von 10 °C für Sonden zwischen 400 m und 600 m Länge erreicht.

Da das Temperaturfeld T2 in den oberen hundert Metern wegen der um 100 m geringer mächtigen Abdeckung wär-

mer ist als T3 (Abb. 5), können flache Sonden dort höhere Entzugsleistungen erzielen als im T3 (Abb. 6a und b). Bei etwa 600 m tiefen Sonden kippt dieses Verhältnis, und es werden für Varianten im Temperaturfeld T3 höhere Entzugsleistungen ermittelt. Mit weiterer Zunahme der Sondentiefe ist die Entzugsleistung für Varianten im T3 stets besser als im T2.

Die Leistungserhöhung durch den Salzstock wird deutlich geringer, wenn die Erdwärmesonden flacher als 400 m sind. Bei 100-m- und 200-m-Sonden ist die Leistung nur noch geringfügig höher (Abb. 7).

Bei der Eintrittstemperatur von 10 °C fällt auf, anders als bei einer Eintrittstemperatur von 0 °C, die Verbesserung der spezifischen Entzugsleistung durch den Salzstock nicht mehr monoton mit der Sondentiefe zunimmt. In Abbildung 7a ist zunächst ein Maximum zwischen 400 m und 600 m zu sehen und dann ein wieder einsetzender Anstieg zwischen 800 m und 1000 m.

Insgesamt zeigt sich in diesen Auswertungen das komplexe Wechselspiel zwischen (i) Teufenlage der Salzstockoberkante, (ii) teufenabhängiger Temperaturanomalie im Salzstock und (iii) deutlich verbesserter Wärmeleitfähigkeit im Salz. Die Temperaturanomalie selbst ist dabei auch von der lithologischen Ausprägung der Deckschichten und Form und Volumen des Salzstocks abhängig.

## 5. Ursachen für die Effizienzsteigerung

Welche Rolle einerseits der schnellere Wärmetransport durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes direkt und andererseits die dadurch bedingte Temperaturanomalie bei der Effizienzsteigerung der Sonden in der Salzstockhochlage im Einzelnen spielen und welches der überwiegende Einfluss ist, wurde mit den im Folgenden beschriebenen Modellrechnungen untersucht. Die dafür beispielhaft ausgewählte SHEMAT-Sondenmodellvariante mit hoher spezifischer Entzugsleistung ist die 800 m lange Sonde mit 8 l/s Durchflussrate, einer Eintrittstemperatur von 0 °C und einer Betriebsstundenzahl von 2000 pro Jahr. Für die Untersuchung wurde wieder die spezifische Entzugsleistung der Sonde nach zehn Jahren berechnet.

Dieses SHEMAT-Sondenmodell wurde einmal mit dem Temperaturprofil T3 des FEFLOW-Salzstockmodells und zum Vergleich mit dem FEFLOW-Temperaturprofil T1 (generiert ohne Salzstock) initialisiert (Abb. 5) und berechnet. Bei beiden SHEMAT-Sondenmodellen wurde aber identisch die Wärmeleitfähigkeitsverteilung ohne Salzstock verwendet (Ergebnisse in Zeile 2 in Tabelle 2). Im zweiten Simulationspaar wurde für beide Temperaturprofile, T1 und T3, im SHEMAT-Sondenmodell die Wärmeleitfähigkeitsverteilung eines Salzstockmodells verwendet (Ergebnisse in Zeile 3 in Tabelle 2). Dadurch konnte der Effekt der erhöhten Temperatur im Sondenumfeld mit +36 % für die Modelle ohne Salz und +13 % für die Modelle mit Salz isoliert quantifiziert werden.

Die Leistungssteigerung allein durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Sondenumfeld ergibt sich separat aus dem

**Tab. 2:** Spezifische Entzugsleistungen und ihre Steigerungen für die abgeleiteten vier Modellvarianten aus der Kombination von je zwei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten (WLF) und initialen Temperaturprofilen im Salzstockbereich eines Sondenmodells.

**Tab. 2:** Specific heat extraction rate and its increase for the four model versions derived by combination of two thermal conductivity (WLF) values with two initial temperature profiles in the salt structure zone of a BHE model.

	Temperaturprofil T1 ohne Salzstock	Temperaturprofil T3 mit Salzstock	Temperaturbedingte Steigerung
WLF in Salzstockzone 1,9 W/m/K	56 W/m	76 W/m	+ 36 %
WLF in Salzstockzone 5,7 W/m/K	112 W/m	126 W/m	+ 13 %
WLF-bedingte Steigerung	+ 100 %	+ 66 %	

Vergleich der spezifischen Entzugsleistungen entlang einer Spalte. Beim initialen Temperaturfeld T1 (Spalte 2) ergeben sich 100 %, beim initialen Temperaturfeld T3 66 % Leistungssteigerung (Spalte 3).

Der Effekt durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Bereich des Salzstockes ist für dieses Beispiel einer 800-m-Sonde bei einer Eintrittstemperatur von 0 °C also mehr als doppelt so groß wie der Effekt durch die positive Temperaturanomalie im oberen Teil des Salzstocks.

## 6. Diskussion

Der Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchungen war die numerische Simulation des langfristigen Wärmeentzugs durch eine mitteltiefe Erdwärmesonde in einer Salzstockhochlage, in Abhängigkeit von der Salzstocküberdeckung und den Betriebsparametern, mit einem speziellen Sondenmodell. Das 3D-Salzstockmodell liefert dafür ein plausibles Temperaturprofil in Abhängigkeit von der Überdeckung. Der Einfluss verschiedener Salzstockgeometrien wurde hier nicht untersucht.

Die Untersuchungen zum isolierten Einfluss von erhöhter Wärmeleitfähigkeit im Salzstock einerseits und zu erhöhten Temperaturen im Sondenumfeld andererseits auf die Leistungssteigerung gegenüber Sondenstandorten ohne Salzeinfluss zeigen aber auch, dass der Effekt der Wärmeleitfähigkeit deutlich überwiegt. Dadurch ist auch in Salzstockhochlagen mit geringeren positiven Temperaturanomalien als hier verwendet mit deutlich erhöhten Entzugsleistungen zu rechnen.

Erst ab einer Sondenlänge von mehr als 400 m wird in der Salzstockhochlage für die untersuchten realistischen Konfigurationen und Betriebsweisen die 2-3fache spezifische Entzugsleistung erzielt. Zur optimalen Ausnutzung der hier nachgewiesenen positiven Effekte sollten also entsprechende Sondenlängen geplant werden.

Eine mächtigere Salzstocküberdeckung und damit höhere Temperaturen unterhalb des Gipshutes wirken erst ab einer bestimmten Sondenlänge positiv auf die spezifische Entzugsleistung. In der hier verwendeten Salzstockstruktur ist das ab 600 m der Fall. Ist die Sonde flacher, macht sich die deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit von Überdeckung und Gipshut bemerkbar. Ihr Einfluss nimmt mit dem

prozentualen Anteil dieses Bereiches an der Gesamtlänge der Sonde zu.

An zwei Stellen wurden Annahmen getroffen, die dazu führen, dass die Ergebnisse als Maximalabschätzung für die in Salzstöcken erreichbare Steigerung der Entzugsleistung zu interpretieren sind. Das ist zum einen die Verwendung tendenziell niedriger Wärmeleitfähigkeiten im umgebenden Gestein aus dem möglichen Werteintervall und zum anderen die Verwendung eines Temperaturprofils aus der Mitte des Salzstocks.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Ergebnisse zur energetischen Effizienz von Erdwärmesonden in Salzstockhochlagen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei Erdwärmesonden ab einer Teufe von 400 m ist mindestens von einer Verdoppelung der spezifischen Entzugsleistung auszugehen, wenn sie in einer Salzstockhochlage errichtet werden.
- Bei einer günstigen Kombination von Sondenteufe und Mächtigkeit der Salzstockabdeckung erreicht man mit Sonden im Salzstock eine Verdreifachung der spezifischen Entzugsleistung.
- Bei oberflächennahen Sonden, oberhalb des Salzes oder nur knapp darin, führt die Summe aus dem negativen Einfluss der geringen Wärmeleitfähigkeit des Gipshutes und dem positiven Einfluss der bis an die Oberfläche reichenden Temperaturanomalie zu einer stark teufen- und überdeckungsabhängigen spezifischen Leistung der Sonde. Generell überwiegt der positive Effekt mit etwa 10 % Leistungssteigerung nur geringfügig.
- Für eine untersuchte Beispielkonfiguration mit 800 m Sondenlänge resultiert der Hauptbeitrag (etwa 2/3) zum Leistungsgewinn aus der erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Salzes. Ein weiterer Beitrag (etwa 1/3) kommt aus der deutlich wärmeren Gesteinsumgebung.

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass sich in Salzstockhochlagen für mitteltiefe Sonden energetisch äußerst günstige Konstellationen ergeben können. Salzstockhochlagen als typischer Bestandteil der norddeutschen Geologie könnten sich

somit als interessante geothermische Ressource erweisen. Dieser Erkenntnis sollten deshalb weitergehende Überlegungen zur technischen Umsetzung der untersuchten Konzepte, zur optimalen Auslegung und zur wirtschaftlichen Optimierung folgen.

## 8. Danksagung

Die Autoren danken Ben Norden und einem weiteren Gutachter für zahlreiche Hinweise und Anregungen, die zu einer deutlichen Verbesserung in der revidierten Version beigetragen haben.

## 9. Schriftenverzeichnis

- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (Hrsg.) (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geol. Jb., A 153: 3–95, Stuttgart (Schweizerbart; in Komm.).
- Beer, H. & Hurtig, E. (1999): Das geothermische Feld in Brandenburg. – Brandenburgische geowiss. Beitr., 6 (1): 57–68, Kleinmachnow (L.-Amt Geowiss. Rohstoffe Brandenburg).
- Clauser, C. (Hrsg.) (2003): Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers, SHEMAT and processing SHEMAT: 332 S., Berlin (Springer).
- Clauser, C. (2006): Geothermal energy. – In: Heinloth, K. (Hrsg.): Numerical data and functional relationships: 480–595, Berlin (Springer).
- Creutzburg, H. (1962): Zwischenbericht über Gebirgstemperaturmessungen im Kalisalzbergwerk Ronnenberg, 4.7.1962. – Archivbericht B.-Anst. Bodenforsch. Hannover (unveröff.).
- Creutzburg, H. (1963): Zwischenbericht über die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten an Salzgesteinen und deren Nebengestein aus dem Kalisalzbergwerk Ronnenberg, 3.5.1963. – Archivbericht B.-Anst. Bodenforsch. Hannover (unveröff.).
- DWD (2010): Deutscher Wetterdienst (www.dwd.de): Oberflächentemperatur Jahresmittelwert 1961–1990, Messstation Hannover-Langenhagen (Flugwewa).
- Fromme, K., Michalzik, D. & Wirth, W. (2010): Das geothermische Potenzial von Salzstrukturen in Norddeutschland. – Z. dt. Ges. Geowiss., 161 (3): 323–334, Stuttgart (Schweizerbart).
- Geologische Karte von Niedersachsen (1934), 1 : 25 000, Blatt 3623 Gehrden; 1. Aufl., Niedersächsisches L.-Amt Bodenforsch., Hannover.
- Giesel, W. & Holz, A. (1970): Das anomale geothermische Feld in Salzstöcken – Quantitative Deutung an einem Beispiel. – Kali Steinsalz, 5 (8): 272–274, Essen (Glückauf).
- GTN (Geothermie Neubrandenburg GmbH) (2009): Effizienzvorteile tiefer Erdwärmesonden in Salzstockhochlagen, Simulationsstudie und Wirtschaftlichkeitsbewertung. – Unveröff. Bericht, Neubrandenburg.
- Lerche, I. & Petersen, K. (1995): Salt and sediment dynamics: 336 S., New York (CRC Press).
- Lotz, B. (2004): Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Nordostdeutschen Becken. – Dissertation, FU Berlin: 226 S., Berlin.
- Norden, B. & Förster, A. (2006): Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin. – American Assoc. Petroleum Geol., Bull., 90 (6): 939–962, Tulsa (AAPG).
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Geologische Karte 1 : 500 000, Salzstrukturen Norddeutschlands, mit Erläuterungen; 1. Aufl. – B.-Anst. Geowiss. Rohstoffe, Hannover.
- Voigt, H.-D. & Häfner, F. (1985): Grundlagen des Stoff- und Wärmetransportes in porösen Schichten. – In: Wissenschaftlich-Technischer Informationsdienst des ZGI (Hrsg.): Geohydrodynamische Erkundung von Erdöl-, Erdgas- und Grundwasserlagerstätten: 186–200, Berlin (Zentrales Geol. Inst.).

Manuskript eingegangen: 13.06.2010

Annahme zur Veröffentlichung: 06.08.2010

