

3D-Modellierung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen – Eingangsdaten und Potenzialausweisung

Kristian Bär, Dirk Arndt, Johann-Gerhard Fritsche, Annette E. Götz, Matthias Kracht, Andreas Hoppe & Ingo Sass*

Bär, K., Arndt, D., Fritsche, J.-G., Götz, A.E., Kracht, M., Hoppe, A. & Sass, I. (2011): 3D-Modellierung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen – Eingangsdaten und Potenzialausweisung. [3D modelling of the deep geothermal potential of the Federal State of Hesse (Germany) – input data and identification of potential.] – Z. dt. Ges. Geowiss., 162: 371–388, Stuttgart.

Kurzfassung: Im Rahmen des Forschungsprojektes „3D-Modellierung der Geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen“ wird für ganz Hessen das tiefengeothermische Potenzial quantifiziert und qualitativ beurteilt. Die Quantifizierung der im Untergrund gespeicherten Wärme und die qualitative Beurteilung des Potenzials basieren auf einem geologisch-geothermischen 3D-Modell (vgl. Arndt et al. 2011) und erfolgt für verschiedene tiefengeothermische Nutzungssysteme. Im Sinne eines Multikriterienansatzes werden die für die Tiefengeothermie als relevant eingestuften thermophysikalischen, hydraulischen und tektonischen Parameter entsprechend einer nutzungsartabhängigen Wichtung zur qualitativen Potenzialausweisung berücksichtigt. Als Grundlage dazu dienen für jeden Parameter definierte Grenzwerte. Diese legen fest, ob für den vorliegenden Wertebereich ein sehr hohes, hohes, mittleres, geringes oder sehr geringes Potenzial vorliegt. Aus dem attribuierten geologischen 3D-Modell können auf infrage kommende Zielhorizonte und Standorte alle relevanten Parameter abgefragt und zur Berechnung des lokalen geothermischen Potenzials herangezogen werden. Abschließend können in einem weiteren Schritt die lokalen Ergebnisse für jede potenziell geeignete Formation und Nutzungsart in die Fläche interpoliert und in Karten oder Schnitten dargestellt werden.

Abstract: Within the scope of the research project “3D-modelling of the deep geothermal potentials of Hesse” the deep geothermal potential of the Federal State of Hesse was quantified and assessed in a qualitative analysis. The quantification of the heat stored under ground and the qualitative analysis was done for different geothermal systems. These are hydrothermal and petrothermal systems, as well as fault zones and deep borehole heat exchangers.

For the assessment of the deep geothermal potential, knowledge of the geological structure and the geothermal properties of the potential reservoir rocks are indispensable. Therefore, a 3D model of the deep geothermal potential of the Federal State of Hesse (Germany) has been developed (cf. Arndt et al. 2011). Systematic measurements of thermophysical and hydraulic rock properties such as thermal conductivity, heat capacity and permeability of relevant geologic formations have been combined with in-situ temperature measurements, hydrothermal upwelling zones, characteristics of geological faults and were added to the 3D geological structural model. Using a multiple criteria approach, the various rock and reservoir properties were assessed incorporating their relevance for the different geothermal systems to allow the qualitative analysis. Therefore, threshold values for each parameter were defined specifying whether the potential is very high, high, medium, low or very low. This method was tested for the one-dimensional case (virtual drilling) and the two-dimensional case (geological-geothermal cross-sections) before being applied to the 3D model.

The resulting geothermal model, which incorporates the quantification and the qualitative analysis, is an important tool, which can be used at an early stage of the planning phase for the design of geothermal power plants. Furthermore, it allows quantification of the deep geothermal potential and is intended to be an instrument for public information.

Schlüsselwörter: Geothermie, geothermisches Potenzial, thermophysikalische Gesteinseigenschaften, hydraulische Kennwerte, geologisches 3D-Modell, Oberrheingraben, Hessen, Deutschland, GOCAD

Keywords: geothermal energy, geothermal potential, geothermal rock properties, hydraulic properties, 3D geological modeling, Upper Rhine Graben, Hesse, Germany, GOCAD

*Anschriften der Autoren:

Kristian Bär (baer@geo.tu-darmstadt.de), Dirk Arndt (arndt@geo.tu-darmstadt.de), Annette E. Götz (goetz@geo.tu-darmstadt.de), Andreas Hoppe (ahoppe@geo.tu-darmstadt.de), Ingo Sass (sass@geo.tu-darmstadt.de), Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Germany;
Johann-Gerhard Fritsche (Johann-Gerhard.Fritsche@hlug.hessen.de), Matthias Kracht (Matthias.Kracht@hlug.hessen.de), Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustraße 186, Postfach 3209, 65022 Wiesbaden, Germany.

1. Einleitung

Im Rahmen des vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL) finanzierten Forschungsprojektes „3D-Modellierung der Geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen“, das in Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) durchgeführt wird, wird erstmals hessenweit das tiefengeothermische Potenzial für verschiedene offene und geschlossene Systeme quantifiziert und qualitativ beurteilt (Sass & Bär 2008, Buß et al. 2008, Arndt et al. 2010, Bär et al. 2010, Sass et al. 2010).

Als Basis für die standortabhängige Beurteilung des tiefengeothermischen Potenzials dienen in Aufschlussanalogstudien ermittelte thermophysikalische, hydraulische sowie felsmechanische Kennwerte von Gesteinseinheiten, die andernorts in Hessen in Tiefen vorkommen, die für die Nutzung der Tiefen Geothermie grundsätzlich ausreichend sind. Da für Hessen keine ausreichende Anzahl an gekerkerten Tiefbohrungen (größer 1000 m) vorliegt (vgl. Arndt et al. 2011: Fig. 3), an deren Kernproben die benötigten Gesteinseigenschaften bestimmt werden könnten, sind Messungen an einer ausreichend hohen Anzahl von Gesteinsproben, aus Aufschlüssen und flacheren Kernbohrungen, eine ideale Möglichkeit, eine solide geothermische Datenbasis aufzubauen. Die so ermittelten und statistisch abgesicherten Gesteinseigenschaften müssen mithilfe empirisch ermittelter Gleichungen, die in der Kohlenwasserstoffindustrie seit Langem in Gebrauch sind (Abschnitt 4), vor der Potenzialbestimmung auf die Druck- und Temperaturbedingungen des Reservoirs umgerechnet werden.

Gesteinseinheiten mit Temperaturen von mehr als 60 °C können nach dem Stand der Technik zur direkten Wärmenutzung und darüber hinaus bei Temperaturen von über 100 °C prinzipiell und bei Temperaturen von mehr als 120 °C wirtschaftlich zur Stromproduktion genutzt werden. Zur geometrischen Eingrenzung dieser potenziell geeigneten Gesteinseinheiten wurde im Rahmen des Projektes ein dreidimensionales geologisches Strukturmodell bis in eine Tiefe von 6 km von ganz Hessen erstellt (Arndt et al. 2010, 2011). Dieses umfasst die Lage der stratigrafischen Horizonte Grundgebirge, Rotliegend, Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk und, zusammengefasst, das Tertiär und Quartär sowie alle tiefreichenden Störungen.

Hier soll ein Überblick über die Anzahl und Verteilung der im Rahmen des Projektes gemessenen und zusammengetragenen Daten, über das geologische Strukturmodell von Hessen, das Untergrundtemperaturmodell von Hessen sowie vor allem über die Vorgehensweise der geothermischen Potenzialermittlung gegeben werden. Es werden einige beispielhafte Darstellungen der geothermischen Kennwerte einzelner Reservoirseinheiten – wie Buntsandstein und Rotliegend oder des Grundgebirges – sowie über das tiefengeothermische Potenzial von Hessen vorgestellt. Für einen detaillierten Gesamtüberblick zu den Messwerten und Potenzialen sei auf den Projektabschlussbericht verwiesen (Sass & Hoppe 2011), der auf den Internetseiten des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie zur Verfügung gestellt wird.

Anhand der im Rahmen des Projektes zusammengetragenen und ermittelten Daten kann erstmals eine flächendeckende Darstellung des tiefengeothermischen Potenzials von Hessen erfolgen. Diese Darstellung der Potenzialverteilung kann als Ergänzung und Erweiterung des Geothermischen Informationssystems für Deutschland (GeotIS; Schulz et al. 2007, Pester et al. 2010) genutzt werden und schließt bestehende Wissenslücken. Die Ergebnisse der 3D-Modellierung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen werden zur Qualitätsverbesserung von Vorstudien dienen und die Grundlage lokaler Machbarkeitsstudien konkreter tiefengeothermischer Projekte bilden. Sie erlauben eine Auswahl von Gebieten, in denen die wirtschaftliche Nutzung der Tiefen Geothermie sinnvoll scheint. Darüber hinaus sollen die Daten der Information politischer Entscheidungsträger dienen und sowohl Projektplanern als auch der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen.

2. Eingangsdaten

Zur Beurteilung des geothermischen Potenzials sind Kenntnisse der geothermischen Kennwerte der potenziellen Reservoirgesteine erforderlich. Hierbei sind neben den hydraulischen besonders die thermischen Eigenschaften von Bedeutung. Dementsprechend finden die **thermophysikalischen Gesteinskennwerte** Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifische Wärmekapazität (c_p) und Gesteinsdichte (ρ) sowie die **hydraulischen Kennwerte** Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) bzw. Permeabilität (K) und Transmissivität (T_k) bzw. Transmissibilität (T_k) sowie die effektive Porosität (n_e) und die Untergrundtemperatur (T) Eingang in die Potenzialbestimmung. Insbesondere bei den hydraulischen Kennwerten Durchlässigkeit und Permeabilität ist für die weitere Betrachtung zwischen überwiegend im Labor bestimmten Gesteins- oder Matrixkennwerten und in-situ bestimmten Gebirgskennwerten zu unterscheiden.

Neben diesen Eingangsdaten, die zur Potenzialbestimmung mithilfe des 3D-Modells genutzt werden, wurden ergänzende Daten, die lokal die Interpretation der Ergebnisse des Potenzialmodells erleichtern und verbessern können, durch Literaturstudien zusammengetragen. Diese umfassten insbesondere Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit, Dichte und Porosität von Gesteinen in Hessen und angrenzenden Gebieten sowie felsmechanische Kennwerte, wie die einaxiale Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul. Insbesondere Literaturdaten zur Tektonik und des aus der World Stress Map (Heidbach et al. 2010) für Hessen vereinfacht abgeleiteten Spannungsfeldes, der vorherrschenden petrografischen Eigenschaften und über die einaxiale Druckfestigkeit zur Felsmechanik und zum Bruchverhalten liefern gemeinsam mit der Reservoirgeometrie bzw. den potenziellen Wärmetauscherflächen aus dem 3D-Modell wichtige Informationen über die **Reservoirigenschaften**. Unter Berücksichtigung der Reservoirigenschaften kann die tatsächliche tiefengeothermische Nutzbarkeit der Reservoirhorizonte, die durch die Potenzialermittlung anhand ihrer Temperatur sowie der thermophysikalischen und hydraulischen Eigen-

schaften als geeignet identifiziert wurden, besser beurteilt werden.

2.1 Thermophysikalische Gesteinskennwerte

Thermophysikalische und hydraulische Gesteinseigenschaften wurden punktuell an mehr als 600 Gesteinsproben aus Bohrungen und Aufschlüssen in Hessen und angrenzenden Gebieten bestimmt (Abb. 1a). Zur statistischen Absicherung der Messwerte fanden pro Probe zwischen 10 und 30 Einzelmessungen der jeweiligen Kennwerte statt, sodass mehr als 8500 punktuelle Messwertepaare oder -tripel zusammengetragen wurden (Tab. 1).

Die Proben wurden vor den Messungen zunächst bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Exsikkator vollständig abgekühlt. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit erfolgte an ofentrockenen Gesteinsproben mit dem optischen Thermoscanner (Fa. Lippmann und Rauen GbR.; Lippmann & Rauen 2005). Dessen Messprinzip basiert auf dem kontaktlosen Temperaturmessverfahren durch Infrarot-Thermosensoren, das von Popov et al. (1999) entwickelt wurde. Die Messgenauigkeit des optischen Scanners wird vom Hersteller mit 3 % angegeben. Die Bestimmung der Roh- und Korndichte sowie der Porosität erfolgten durch die Messung des Rein- und Rohvolumens der Proben mit einem Heliumpyknometer (AccuPyc 1330 von Micromeritics GmbH) und einem Pulver-Pyknometer (Geopyc 1360 von Micromeritics GmbH). Die spezi-

fische Wärmekapazität c_p wurde rechnerisch anhand der gemessenen Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und Temperaturleitfähigkeit α bestimmt:

$$c_p = \frac{\lambda}{\rho \cdot \alpha}$$

Für die Bestimmung der Gesteinspermeabilität (Matrixpermeabilität) kam ein kombiniertes Säulen- und Mini-Gaspermeameter zum Einsatz, mit dem gemäß der bei Jaritz (1999) sowie Hornung & Aigner (2004) beschriebenen Messmethode entweder die scheinbare Gaspermeabilität gemessen und in Permeabilität umgerechnet oder direkt die intrinsische Gaspermeabilität gemessen werden kann. Die Basisformel für das Gaspermeameter bildet das Darcy-Gesetz, welches um die Kompressibilität und Viskosität von Gasen ergänzt wurde (Hornung & Aigner 2004). Die Messgenauigkeit der Methode sowie eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Messparameter wurde in einer separaten Studie untersucht (Bär 2008). Der maximale Fehler kann demnach in Abhängigkeit der Messeinstellungen bis zu 10 % betragen, während der minimale Fehler bei ca. 1 % liegt. Weitere Daten zur Gesteinspermeabilität und -porosität entstammen der Kohlenwasserstoff-Datenbank (KW-DB) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover. Da in dieser Datenbank die digital erfassten Werte an Proben aus Tiefen von 1 bis 3 km bestimmt wurden und somit der Ziel-tiefe tiefeingeothermischer Erschließung am nächsten kommen, sind sie eine wertvolle Ergänzung und Prüfmöglichkeit der eigenen Messwerte (Abb. 1a).

Tab. 1: Mittelwerte, Standardabweichungen und Messwertanzahl der physikalischen Gesteinseigenschaften Wärmeleitfähigkeit, Spezifische Wärmekapazität und Gesteinspermeabilität aller untersuchten Gesteinsarten der Einheiten des geologisch-geothermischen 3D Modells.

Table 1: Arithmetic mean, standard deviation and number of measurements of the physical rock properties thermal conductivity, specific heat capacity and rock permeability of all sampled rock types of the different units of the geologic 3D model.

Modelleinheiten	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	n	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	n	Gesteinspermeabilität log [m²]	n
Tertiär (Basalte)	1,81 ± 0,25	353	678 ± 99	403	-16,0 ± 1,0	390
Muschelkalk	2,01 ± 0,39	313	672 ± 87	125	-16,1 ± 0,8	309
Buntsandstein	2,51 ± 0,46	2618	635 ± 120	1705	-13,6 ± 1,1	2685
Zechstein	2,26 ± 1,15	970	855 ± 267	654	-15,1 ± 1,2	958
Rotliegend	2,26 ± 0,51	863	625 ± 90	254	-13,9 ± 1,4	683
Renoherzyinkum und Nördliche Phyllitzzone	2,74 ± 1,10	2103	650 ± 147	1495	-16,0 ± 1,3	1620
Mitteldeutsche Kristallinschwelle	2,38 ± 0,40	1127	756 ± 75	989	-16,4 ± 0,9	954
GESAMT		8347		5625		7599

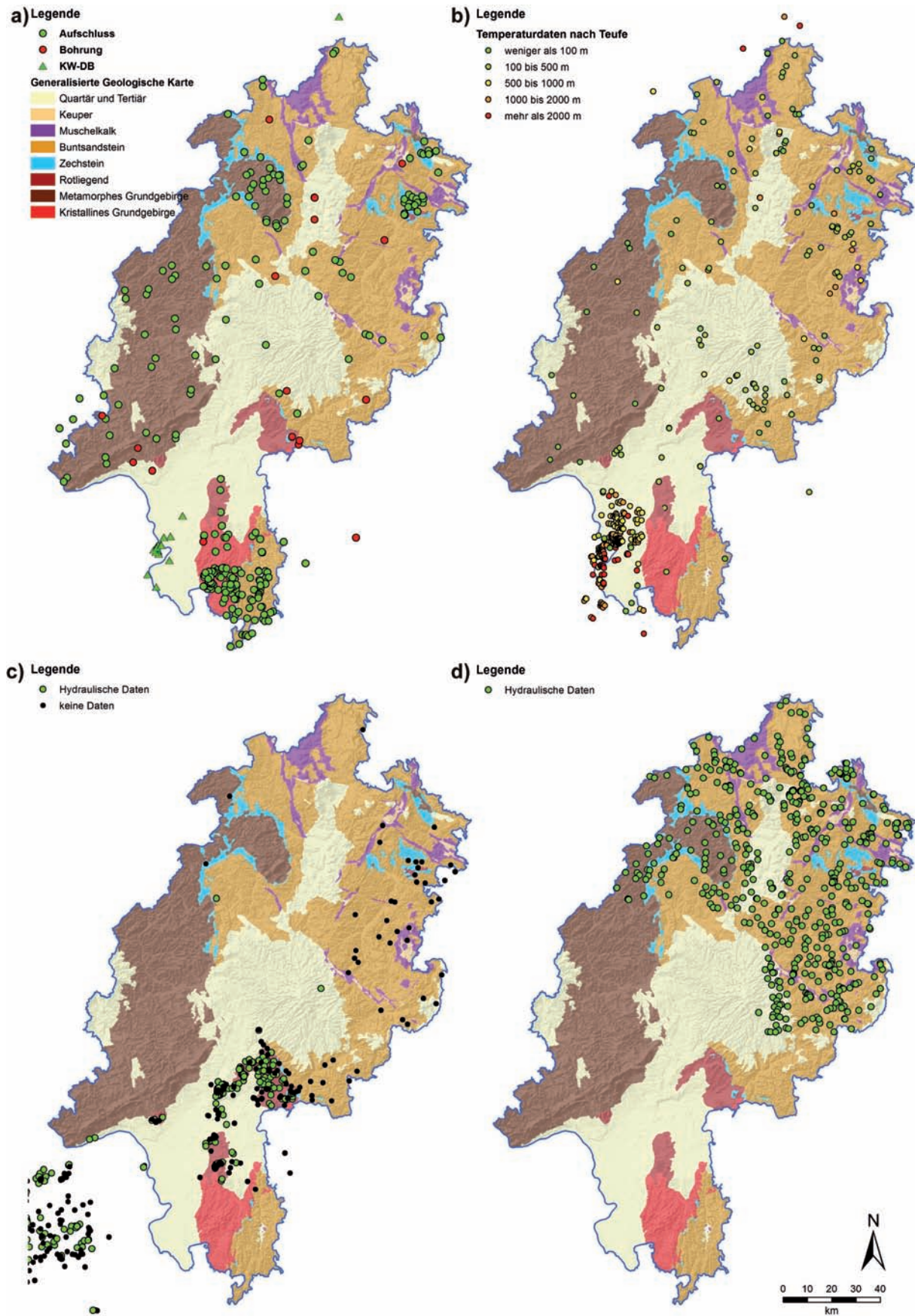


Abb. 1: Eingangsdaten für das geothermische Modell. (a) Lage der Aufschlüsse und Bohrungen, in denen Proben für Labormessungen entnommen wurden, und Lage der in der Kohlenwasserstoff-Datenbank enthaltenen Messdaten. (b) Lage der für Hessen vorhandenen Untergrundtemperaturmessungen. Lage der Bohrungen im Rotliegend (c) und im Buntsandstein (d), die auf hydraulische Testdaten gesichtet wurden.

Fig. 1: Input data for the geothermal model. (a) Location of outcrops and boreholes, which were sampled for laboratory measurements and location of the data stored in the KW-DB (database of the hydrocarbon industry). (b) Location of the subsurface temperature measurements. Location of wells in the Rotliegend (c) and Buntsandstein (d) with available hydraulic test data.

2.2 Hydraulische Kennwerte

Hydraulische Gebirgskennwerte wurden durch die Auswertung der Daten von mehr als 900 Pumpversuchen und anderen hydraulischen Tests bestimmt, die in den Bohrchiven des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und dem Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz, gesichtet und zusammengetragen wurden (Abb. 1c und 1d). Hierbei wurde die Datenauswahl auf Bohrungen mit einer Endteufe von mehr als 50 m beschränkt, um zu stark oberflächennah aufgelockerte Bereiche von der Auswertung auszuschließen. Der Tiefenbereich der hydraulischen Tests liegt dabei im Mittel zwischen 100 und 150 m, wobei einzelne Bohrungen Endteufen von mehr als 1000 m aufweisen. Gleichwohl können diese Daten nur unter Vorbehalten auf die Verhältnisse in großen Tiefen übertragen werden. Sie sind jedoch sehr wichtig, um das Verhältnis zwischen Gesteinseigenschaften (Labordaten) und Gebirgseigenschaften (Feldversuche) zu ermitteln. Den Schwerpunkt dieses Datensatzes bilden Trink- und Mineral-, aber auch Thermalwassererschließungen; Forschungs- und Erkundungsbohrungen wurden berücksichtigt. Bei einem großen Anteil der Daten handelt es sich nur um Angaben von Entnahmeraten und zugehörigen Absenkungen, aus denen keine exakten Durchlässigkeiten ermittelt, sondern nur qualitative Angaben über die Durchlässigkeit getroffen werden können (Stober & Jodocy 2009). Durchlässigkeiten konnten jedoch an den ebenfalls zahlreich vorhandenen umfangreichen Daten hydraulischer Tests ermittelt werden.

An dieser Stelle sind einige Definitionen einzuführen, welche die weitere Betrachtung der hydraulischen Kennwerte erleichtern. Anstelle der Gesteins- oder Gebirgsdurchlässigkeit sowie des Durchlässigkeitsbeiwertes wird im Folgenden die von den Fluideigenschaften unabhängige Permeabilität verwendet. Alle im Labor oder Feld bestimmten hydraulischen Kennwerte wurden dementsprechend zur vereinfachten Auswertung unter Berücksichtigung der bei den Messungen herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen in Permeabilität umgerechnet. Hierbei ist abhängig von der Bestimmungsmethode und des damit einhergehenden Betrachtungsmaßstabes zwischen Gesteins- oder Matrixpermeabili-

tät (K_m ; im Folgenden **Gesteinspermeabilität** genannt), die nur die Permeabilität der ungestörten, ungeklüfteten Gesteinsmatrix bezeichnet, und der **Gebirgspermeabilität** (K_G), bei der auch das vorliegende Trennflächengefüge, Karsthohlräume und Ähnliches berücksichtigt sind, zu unterscheiden.

Diese Unterscheidung ist für die Geothermie in Deutschland von Bedeutung, da die als hydrothermale Reservoir identifizierten Gesteinseinheiten (Rotliegend, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper, Malm) durchgehend als Kluft- oder Karstgrundwasserleiter zu klassifizieren sind. Daher kann vor allem bei den verkarsteten und geklüfteten Kalksteingrundwasserleitern die Gesteinspermeabilität für die Reservoirbetrachtung nahezu vernachlässigt werden. Auch bei Sandsteinkluftgrundwasserleitern ist die Gesteinspermeabilität bei den in der Regel in Deutschland vorkommenden niedrigen Werten (u. a. Legarth et al. 2003, Orzol et al. 2005, Stober & Jodocy 2009, Sulzbacher & Jung 2010, Jodocy & Stober 2011, Stober 2011, Bär et al. 2011) für die Ermittlung der hydraulischen Ergiebigkeit von untergeordneter Bedeutung und eher für die Abschätzung der Wärmetransportprozesse im Gestein (Kluftkörper) selbst von Belang. Bei der geothermischen Nutzung der in Reservoirtiefe in der Regel dichten Sedimentgesteine erfolgt der Wassertransport hauptsächlich entlang natürlicher hydraulischer Fließwege wie Klüften, Schichtflächen und Störungen oder es ist erforderlich, künstlich Risse und Brüche durch hydraulisches Fracen zu erzeugen (Wasserfrac). Dementsprechend wird die zur Abschätzung der Ergiebigkeit entscheidende Transmissibilität (auf den Begriff Transmissivität wird im Folgenden gemäß der vorhergehenden Erläuterungen verzichtet) des betrachteten Reservoirgesteins nur anhand der ermittelten Gebirgspermeabilitäten und der lokalen Reservoirmächtigkeit berechnet.

2.3 3D-geologisches Strukturmodell

Das dreidimensionale geologische Strukturmodell von Hessen, das als Teil des Projektes mit der Modellierungssoftware GOCAD erstellt wurde (Arndt et al. 2011), liefert die räumlichen Geometrien stratigrafischer Einheiten und ausgewählter Störungen. Eingangsdaten für das geologische 3D-Modell sind Bohrdaten, geologische Karten, geologische Profilschnitte, geologische Isolinien- und Isopachenpläne, bestehende seismische Erkundungen und weitere Informationen aus der geologischen Fachliteratur. Um das Arbeiten mit den großen Datenmengen zu ermöglichen, wurde das gesamte Arbeitsgebiet in zunächst 6 Submodelle untergliedert. Diese orientieren sich an tief reichenden, in die Modelleinheit des Grundgebirges reichende Störungen, welche die einzelnen Gebiete voneinander trennen (Arndt et al. 2010). Das Modell umfasst die nach stratigrafischer Einteilung gewählten Modellflächen Oberkante des Grundgebirges, unterteilt in Rhenoharzynikum & Nördliche Phyllitzone (überwiegend metamorphes Grundgebirge) und Mitteldeutsche Kristallinschwelle (überwiegend kristallines Grundgebirge), die Oberkanten des Rotliegend, des Zechsteins, des Buntsandsteins, des Muschelkalks sowie, zusammengefasst, des Tertiärs und Quartärs (Abb. 2).

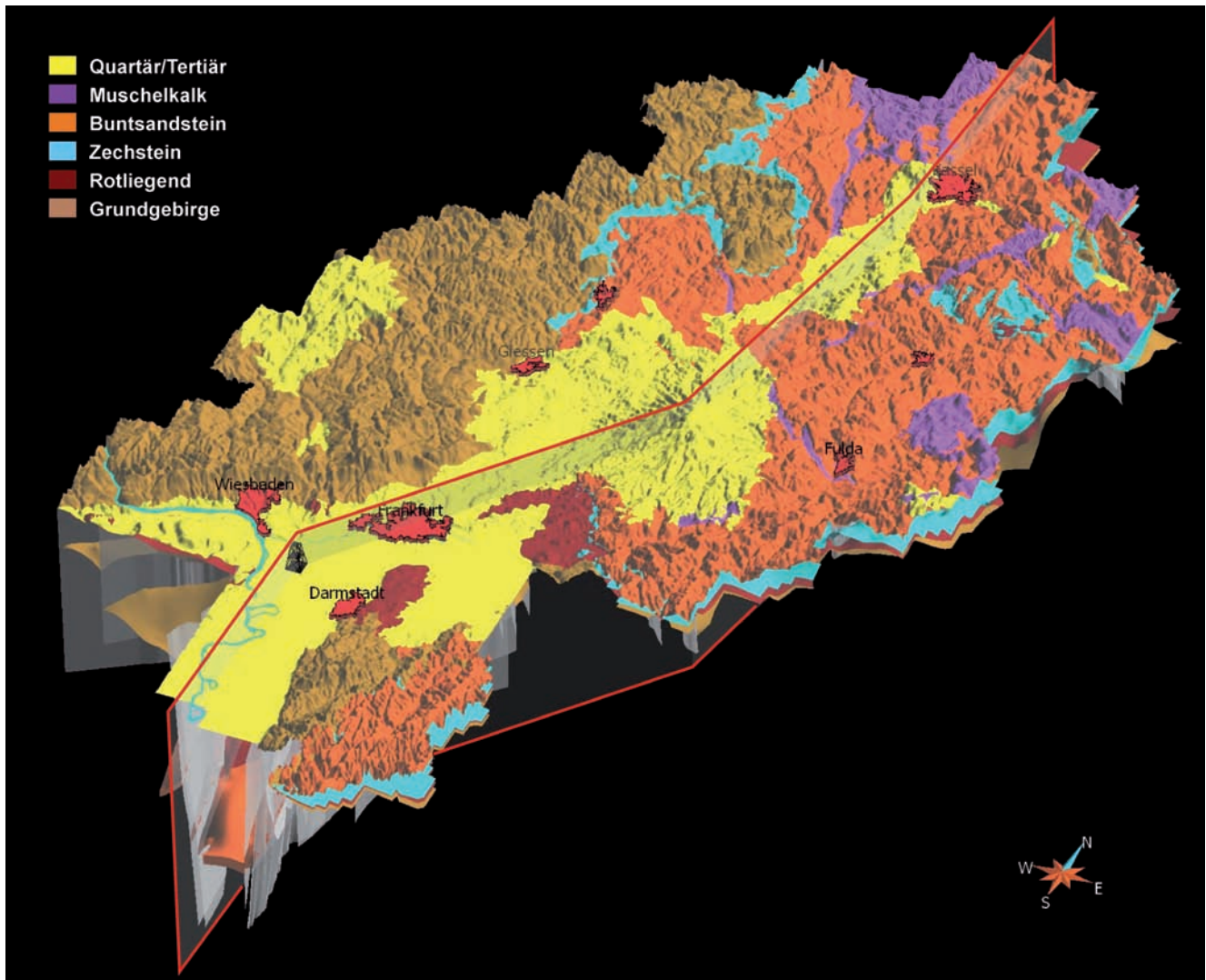


Abb. 2: Geologisches 3D-Modell von Hessen (10-fach überhöht; Arndt et al. 2011). Blick von Südosten in den nördlichen Oberrheingraben auf die in Abb. 5 dargestellte Bohrung (Bohransatzpunkt als schwarzer Bohrturm) und den in Abb. 6 dargestellten geologisch-geothermischen Schnitt (graue transparente Fläche mit rotem Rand).

Fig. 2: Geologic 3D model of Hesse (10 times vertically exaggerated; Arndt et al. 2011). View from southeast into the northern Upper Rhine Graben on the schematic drilling shown in Fig. 5 (drilling derrick in black) and the schematic geological-geothermal cross-section shown in Fig. 6 (grey transparent surface with red border).

2.4 Untergrundtemperatur

Für die in das Modell eingehenden Temperaturdaten wurde das Fachinformationssystem (FIS) Geophysik, das vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in Hannover betrieben wird (Kühne et al. 2003), herangezogen. In diesem ist ein Großteil der in hessischen Bohrungen durchgeführten Temperaturmessungen erfasst. Des Weiteren wurden alle für Hessen in den Datenbanken der Kohlenwasserstoffindustrie (KW-Datenbank) hinterlegten sowie alle in den Archiven des HUG vorhandenen Temperaturmessungen in Bohrungen mit Endteufen von mehr als 150 m zusammengetragen (Abb. 1b). Diese verschiedenen Datensätze wurden miteinander abgeglichen, Dopplungen entfernt und

in eine auf der Struktur der Temperaturdatensammlung des FIS Geophysik basierenden Datenbank zusammengeführt. Zur Berechnung der Untergrundtemperaturverteilung wurden die Daten je nach Art der Temperaturmessung mit einem Qualitätsindex gemäß der bei Clauser et al. (2002) vorgestellten Modellierungsmethode versehen. Neben der Datenbasis aus Untergrundtemperaturdaten wird zur Berechnung der Untergrundtemperaturverteilung auch die Temperaturverteilung an der Erdoberfläche benötigt. Hierzu wurden aus dem Klimarasterdatensatz von Deutschland des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2006) die Lufttemperaturdaten herangezogen. Aus den Temperaturreihen der Wetterstationen des DWD liegt ein durchschnittlicher Jahresmittelwert für den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 vor, der nach Auskunft des

DWD eine gute Näherung der Bodentemperaturen in der neutralen Zone angibt. In dieser Tiefe ist die Bodentemperatur frei von jahreszeitlichen Schwankungen und kann somit zur Erstellung eines 3D-Temperaturmodells herangezogen werden.

Die detaillierte Vorgehensweise zur Erstellung des zur Potenzialbestimmung genutzten Temperaturmodells von Hessen ist von Arndt et al. (2011) beschrieben.

Bei der Beurteilung des Temperaturmodells ist zu berücksichtigen, dass die Eingangsdaten für die modellierte Untergrundtemperaturverteilung in Hessen sehr ungleich verteilt sind und somit auch die Sicherheit, mit der die Tiefenlage der Isothermenflächen angegeben werden kann, regional stark variiert. Für den Oberrheingraben liegt aufgrund zahlreicher Explorationsbohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie auch in Tiefen von mehr als 2 km noch eine relativ gute Datendichte vor (Abb. 1b), und die modellierte Temperaturverteilung kann zumindest bis ca. 2,5 km Tiefe als vergleichsweise genau angesehen werden. Als problematisch ist hier jedoch die komplexe Bruchschollentektonik des Oberrheingrabens mit einer Vielzahl von Abschiebungen, Aufschiebungen, Blattverschiebungen sowie rotierten Blöcken und Störungssystemen zu sehen. Insbesondere in den Schichtfolgen der tertiären Grabenfüllung können Störungen je nach Lage zum rezenten Spannungsfeld und der von ihnen durchschlagenen Gesteinseinheit kleinräumige Wechsel von hochpermeablen zu impermeablen Abschnitten zeigen. Diese komplexe tektonische Situation, aufgrund derer die Dominanz von konduktivem oder konvektivem Wärmetransport ebenfalls kleinräumig wechseln kann, führt zur Ausbildung lokaler Wärmeanomalien (Werner & Doebl 1974, Teichmüller & Teichmüller 1979, Clauser & Villingner 1990). In den übrigen Regionen von Hessen ist die Datendichte in größerer Tiefe so gering, dass die modellierten Isothermenflächen in der Tiefe stärker von der tatsächlichen Situation abweichen können.

Letztlich ist die Datendichte zu gering um flächendeckend (raumfüllend) Temperaturen zu interpolieren (Arndt et al. 2011). Eine zumindest überschlägige Quantifizierung der Untergrundtemperaturen für Gesamthessen ist aber für das Projekt nötig um die geothermischen Potenziale abschätzen zu können. Diese sich aus der Eingangsdatendichte ergebenden Probleme zur Genauigkeit des Temperaturmodells können mit dem derzeitigen Datenstand nur kontrolliert werden, indem überprüft wird, ob die aus dem Modell abgeleiteten geothermischen Gradienten in realistischen Wertebereichen zwischen 20 und 60 K/km liegen. Insbesondere in solchen Gebieten geringer Datendichte, aber auch bei Gebieten mit besserer Datengrundlage ist zu betonen, dass es sich bei den Ergebnissen des Projektes um eine Übersichtsdarstellung handelt und vor einer tatsächlichen Erschließung tiefeingeothermischer Potenziale projektbezogene Explorationsstätigkeiten unerlässlich sind.

3. Auswertung und Darstellung der geothermischen Gesteinskennwerte

Die oben beschriebenen Eingangsdaten sind die Grundlage für die Attributierung der geologischen Einheiten des 3D-Modells mit geothermischen Gesteinseigenschaften. Zur Beschreibung der untersuchten lithostratigraphischen Einheiten wurden für jede betrachtete Gesteinseigenschaft statistische Kenngrößen (Minimalwert, Maximalwert, 1. und 3. Quartil, arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung) ermittelt. Insbesondere die Daten zur Gebirgslässigkeit sowie weitere Daten aus Literaturauswertungen – wie Porosität, einaxiale Druckfestigkeit oder Elastizitätsmodul – waren bereits in den herangezogenen Quellen auf einzelne statistische Kenngrößen zusammengefasst. Diese Kenngrößen mussten ohne die Möglichkeit einer weiteren Kontrolle miteinander abgeglichen oder bei fehlenden Vergleichswerten unverändert übernommen werden (vgl. Jodocy & Stober 2011). Die Einzelwerte der gemessenen Gesteinspermeabilitäten und der aus Pumpversuchen bestimmten Gebirgspermeabilitäten wurden für die statistische Bearbeitung zunächst logarithmiert. Diese logarithmierten Werte wurden zur Bestimmung der oben beschriebenen statistischen Kenngrößen herangezogen.

Zur Darstellung der geothermischen Gesteins- und Gebirgskennwerte wird auf die kombinierte Abbildung von Box-Whisker-Plots und Histogrammen zurückgegriffen. Dies gewährleistet die Vergleichbarkeit mit Werten anderer geothermischer Untersuchungen, wie z. B. GeotIS (Schulz et al. 2007, Schulz 2009) oder im speziellen mit dem Projekt GeoTool (Jodocy & Stober 2011), das derzeit vom Regierungspräsidium Freiburg bearbeitet wird und im Oberrheingraben zumindest mit dem Buntsandstein den gleichen Reservoirhorizont untersucht. Grundsätzlich handelt es sich im mittleren und südlichen Oberrheingraben um die Reservoirhorizonte Buntsandstein und Muschelkalk.

Die Histogrammdarstellung ermöglicht weiterhin eine schnelle Einschätzung, ob die untersuchten Gesteinseigenschaften normalverteilt sind oder ob multimodale Verteilungen vorliegen. Außerdem wird die Identifikation von Ausreißern erleichtert.

Die Box-Whisker-Plots hingegen ermöglichen eine einfache Veranschaulichung der Daten in Bezug auf die angeordneten Größenordnungen und die Werteverteilung unter Verwendung robuster Streuungs- und Lagemaße (Jodocy & Stober 2011) als auch den übersichtlichen Vergleich der Daten verschiedener Gesteinseinheiten oder verschiedener Probenahmegebiete im Hinblick auf regionale Unterschiede: „Durch die Lage des Medians innerhalb der Box lässt sich, in Ergänzung der Histogrammdarstellung, die Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung ermitteln. Die Länge der Whisker basiert auf dem Ansatz von Tukey (1977) und beträgt maximal das 1,5-fache [...] des Interquartilsabstands. Punktwerte stellen Ausreißer innerhalb der Datenreihe dar, die noch außerhalb der Fühlerlänge angesiedelt sind. Als Stern markierte Einzelwerte sind extreme Ausreißer in einer Datenreihe“ (Jodocy & Stober 2011).

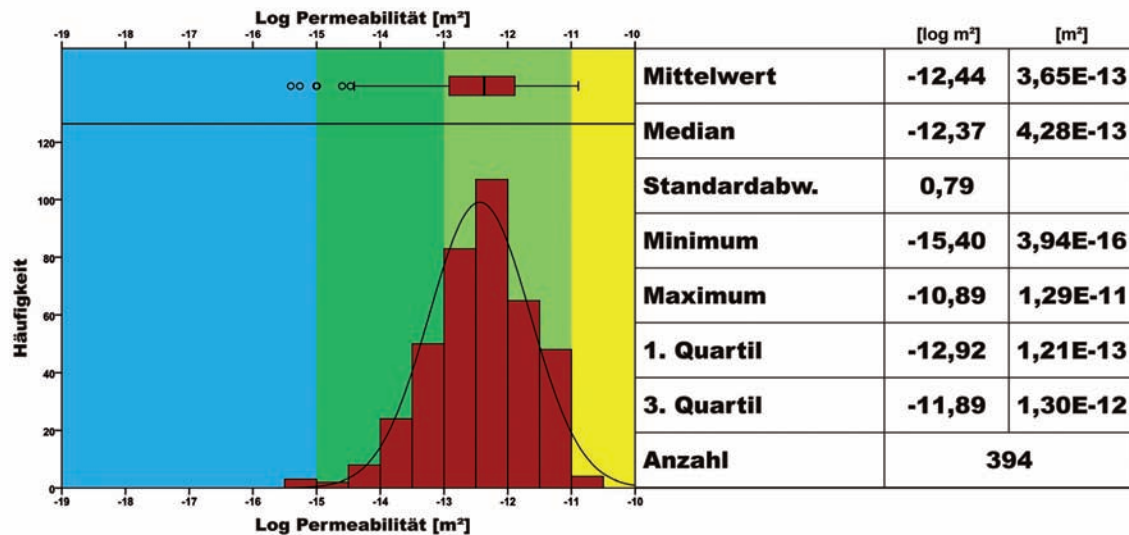


Abb. 3: Beispiel für ein Datenblatt geothermischer Kennwerte als Ergebnis der statistischen Datenauswertung für die Gebirgspermeabilität des Rotliegendes. Die Farbcodierung der Wertebereiche entspricht den in Tab. 4 vorgestellten Potenzialstufen.

Fig. 3: Example for the data sheet of geothermal parameters as result of the statistical analysis. Given is the rock mass (bulk) permeability of the Rotliegendes. The colour code of the permeability domain depicts the potential categories introduced in table 4.

Tab. 2: Bewertungsschema zur Gewichtung von thermophysikalischen, hydraulischen und Reservoireigenschaften für die tiefergeothermische Potenzialausweisung in Hessen für verschiedene geothermische Nutzungssysteme; verändert nach PK Tiefe Geothermie (2008) und Stober et al. (2009).

Bewertungsgrundlage: 1 = sehr wichtig, 2 = relevant, 3 = geringe Bedeutung, - = keine Bedeutung; EWS = tiefe Erdwärmesonde.

Table 2: Rating scheme for the importance of the different thermophysical, hydraulic and reservoir properties for the assessment of deep geothermal potentials in Hesse for different geothermal systems; modified after PK Tiefe Geothermie (2008) and Stober et al. (2009).

1 = very important, 2 = relevant, 3 = low importance, - = not important; EWS = deep borehole heat exchanger.

		Hydrothermal	Petrothermal	EWS	Störungsbasiert
Thermophysikalische Eigenschaften	Wärmeleitfähigkeit	3	2	1	-
	Gesteinsdichte	3	2	1	-
	Wärmekapazität	3	2	1	-
	Temperatur	1	1	1	1
Hydraulische Eigenschaften	Permeabilität / Durchlässigkeit	1	2	3	-
	Transmissibilität / -missivität	1	3	3	-
	Porosität	1	3	3	-
	Produktivitätsindex	1	3	-	-
	Daten hydraulischer Tests	1	1	-	1
Reservoir-Eigenschaften	Tektonik/ Spannungsfeld	2	1	3	1
	Petrografie / Felsmechanik	1	1	2	1
	Geometrie des Reservoirs / Wärmetauscherfläche	1	1	-	1

Als Ergebnis der Datenauswertung wird für jede untersuchte Gesteinseinheit eine Tabelle der statistischen Kenngrößen, die für die weitere Potenzialbestimmung genutzt werden sowie das Histogramm und der zugehörige Box-Whisker-Plot zur Visualisierung in Form eines geothermischen Datenblattes zur Verfügung gestellt (Beispiel siehe Abb. 3).

4. Geothermisches Potenzial

Die zusammengetragenen und aufbereiteten thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerte, das geologische Strukturmodell und die Untergrundtemperatur bilden die Basis für die Beurteilung des tiefeingeothermischen Potenzials von Hessen. Da sowohl die thermophysikalischen Gesteinseigenschaften als auch die Permeabilität von den In-situ-Bedingungen der Reservoirgesteine abhängig sind, müssen die im Labor oder durch Auswertung von Felddaten ermittelten Kennwerte bei der Attributierung der Zellen (S-GRIDS) des 3D-Modells (vgl. Arndt et al. 2011) unter Berücksichtigung der Druck-, Temperatur- und Tiefenabhängigkeit korrigiert werden. Hierzu wurden die an trockenen Gesteinsproben bestimmten Wärmeleitfähigkeiten, Temperaturleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten zunächst nach dem theoretischen Modell von Lichtenecker mithilfe des geometrischen Mittels aus Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix und des porenfüllenden Fluids, das auch von zahlreichen anderen Autoren vorgeschlagen wird (Clauser & Huenges 1995, Pribnow & Sass 1995, Williams et al. 1995, Schoen 1996, Popov et al. 2003, Hartmann et al. 2005 u. a.), auf wassergesättigte Bedingungen umgerechnet. Anschließend wird die berechnete wassergesättigte Wärmeleitfähigkeit mit den Formeln nach Somerton (1992) und Vosteen & Schellschmidt (2003) als temperaturabhängige Variable zur Attributierung des 3D-Modells herangezogen. Die Druckabhängigkeit der thermophysikalischen Eigenschaften wurde dabei vernachlässigt, da sie einen sehr viel geringeren Einfluss im Vergleich zur Temperaturabhängigkeit aufweist (Somerton 1992, Vosteen & Schellschmidt 2003). Für die Integration der Tiefenabhängigkeit der Gesteins- und Gebirgsporeabilität wurden, sofern eine ausreichend gute Datenbasis zur Verfügung stand, eigene Gleichungen, entsprechend der von Stober & Bucher (2007) sowie Manning & Ingebritsen (1999) vorgestellten Ansätze, empirisch ermittelt oder diese direkt verwendet. Für eine detailliertere Darstellung der Modellattributierung sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht (Sass & Hoppe 2011) verwiesen.

Die modellbasierte Quantifizierung und qualitative Beurteilung des tiefeingeothermischen Potenzials beschränkt sich nicht nur auf hydrothermale Systeme, sondern erfolgt für alle in Hessen möglichen tiefeingeothermischen Nutzungssysteme. Gemäß der in den Arbeitshilfen der Staatlichen Geologischen Dienste (PK Tiefe Geothermie 2007, 2008) vorgestellten und bei Stober et al. (2009) und Schulz (2009) verwendeten Gliederung werden hier die direkten Nutzungsarten, bei denen die im Untergrund gespeicherte Wärme über das Wärmeträgerfluid Wasser dem Untergrund direkt entzo-

gen wird, in hydrothermale, petrothermale sowie störungsbezogene Nutzung unterteilt. Die hydrothermale Geothermie nutzt Heißwasser-Vorkommen aus in der Regel sedimentären Reservoirgesteinen mit ausreichend hoher natürlicher Permeabilität. Werden natürliche Heißwasservorkommen permeabler Störungszonen erschlossen, spricht man von störungsbezogener Nutzung. Bei petrothormaler Nutzung (auch als EGS, Enhanced oder Engineered Geothermal System bezeichnet; Huenges 2010) wird in heißen, trockenen Gesteinen über Wassereinpressung durch Bohrungen ein unterirdischer Wärmetauscher über die Schaffung künstlicher Rissysteme hergestellt. Des Weiteren werden geschlossene Systeme betrachtet, bei denen die Wärme dem Untergrund durch einen geschlossenen Wärmeträgermittelkreislauf entzogen werden soll, hier repräsentiert durch tiefe Erdwärmesonden. Aufgrund der Unterschiede der einzelnen Nutzungssysteme haben die bei der Potenzialermittlung betrachteten Parameter jeweils unterschiedliche Bedeutung, die gemäß der Bewertung durch den PK Tiefe Geothermie (2008) und Stober et al. (2009) vereinfacht in Tab. 2 wiedergegeben ist. Auf eine Abtrennung der sogenannten mitteltiefen Geothermie oder eine Klassifizierung nach Mittelenthalpie- oder Niedrigenthalpievorkommen kann somit hier verzichtet werden.

Vor der Beurteilung des Potenzials wird zunächst über die Untergrundtemperaturverteilung definiert, ab welcher Tiefe welche Anwendungsarten der Tiefen Geothermie möglich sind. Hier wurden als Grenzwerte 60 °C für die Heizwärmegewinnung, 100 °C für die technische Grenze bzw. 120 °C für die wirtschaftlich-technische Grenze der geothermischen Stromerzeugung festgelegt (Tab. 4, Abb. 4). Weiterhin wird ab einer Temperatur von 150 °C die Abgrenzung zum sehr hohen Potenzial für die geothermische Stromerzeugung gezogen. Diese definierten Temperaturen werden als Isothermenflächen aus dem Temperaturmodell in das geologische Modell integriert und geben somit für ganz Hessen die Mindesttiefe wieder, bis zu der gebohrt werden muss, um die Geothermie für die Heizwärmegewinnung bzw. Stromerzeugung nutzen zu können.

4.1 Quantifizierung des Potenzials

Die Quantifizierung des tiefeingeothermischen Potenzials erfolgt gemäß der bei Muffler & Cataldi (1978) als Volumenmethode bezeichneten Vorgehensweise, die 2003 in der Studie des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB; Paschen et al. 2003) bei den Berechnungen der tiefeingeothermischen Potenziale von Deutschland von Jung et al. (2002) verwendet wurde. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Untergliederung des geologischen Modells in die verschiedenen Modelleinheiten und die verschiedenen Submodelle bei der Berechnung beibehalten werden können und das Potenzial demzufolge differenziert zu quantifizieren ist. Somit kann zunächst für jede geologische Modelleinheit, die aufgrund ihrer Tiefenlage und dem Erreichen der Mindestemperatur von 60 °C als tiefeingeothermischer Nutzhorizont infrage kommt, regi-

onal der Wärmeinhalt, „Heat in Place“, mit folgender Formel berechnet werden:

$$E_{th} = c_G \cdot \rho_G \cdot V \cdot (T_G - T_S)$$

E_{th}	Wärmeinhalt [J]
c_G	spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]
ρ_G	Dichte des Gesteins [kg/m³]
V	Gesteinsvolumen [m³]
T_G	Temperatur des Gesteins [°C]
T_S	Temperatur an der Erdoberfläche [°C]

Diese Methode nimmt die Temperatur in einem definierten Volumen als identisch an; dies ist für infinitesimal kleine Körper gegeben. Somit ist diese Methode sehr gut für Grid-basierte Modelle geeignet, da diese ebenfalls einen Wert pro Zelle speichern. Je kleiner dann das Zellvolumen ist, desto differenzierter kann damit das Potenzial quantifiziert werden.

Gemäß Muffler & Cataldi (1978) kann hierbei die Porosität und somit die in den Porenfluiden gespeicherte Wärmeenergie vernachlässigt werden, sofern die Porosität der betrachteten Gesteine weniger als 20 % beträgt. Die Unterschiede zwischen ausführlicher Betrachtung und vereinfachter Betrachtung gemäß der von Jung et al. (2002) verwendeten Formel liegen je nach Porosität zwischen 5 und maximal 10 % (vgl. Muffler & Cataldi 1978). Da die gemessenen Porositäten aller im Rahmen des Projektes untersuchten Gesteinseinheiten im Mittel unter 15 % liegen, kann die Verwendung der vereinfachten Formel als konservativer Ansatz gesehen und eine Überschätzung des Potenzials vermieden werden.

Anhand dieses Wärmeinhaltes kann unter Berücksichtigung der entsprechenden Gewinnungsfaktoren sowie der

Einbeziehung technischer Wirkungsgrade einer geplanten Kraftwerksanlage das Heizwärmegewinnungs- bzw. Stromerzeugungspotenzial mit und ohne Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) quantifiziert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Gewinnungsfaktor nach Muffler & Cataldi (1978) je nach Produktionsplanung, geothermischem System, Temperatur, effektiver Porosität und Tiefe variiert und somit für jeden Standort direkt zu bestimmen ist. Da sich dieses Problem unter der Einbeziehung technischer Wirkungsgrade, die wiederum stark von der geplanten Kraftwerksanlage abhängig sind, verstärkt, kann das Heizwärmegewinnungs- bzw. Stromerzeugungspotenzial im Rahmen des Projektes nur sehr grob mit den von Jung et al. (2002) angesetzten Werten abgeschätzt werden. Für die Planung konkreter Kraftwerksprojekte ist immer eine Detailuntersuchung notwendig.

Bei hydrothermalen Systemen ist bei der Quantifizierung, soweit dieses differenziert werden kann, die tatsächlich genutzte Mächtigkeit der wasserleitenden Schichten (Nettomächtigkeit) und nicht die Gesamtmächtigkeit der betrachteten Modelleinheit anzusetzen, um eine Überschätzung des nutzbaren Wärmeinhaltes zu vermeiden. Im konkreten Fall des tiefeingeothermischen Modells von Hessen wurde aufgrund der Auflösung des geologischen Strukturmodells, der fehlenden Kenntnis fazieller Wechsel in großer Tiefenlage und der lateralen Ausdehnung der Grundwasserhorizonte, im Gegensatz zu den Berechnungen von Jung et al (2002), stets auf die vereinfachte Betrachtung der gesamten Modelleinheit und somit der Bruttomächtigkeit zurückgegriffen.

Weiterhin ist nach Jung et al. (2002) zu berücksichtigen, dass es sich bei dem nach diesen Ansätzen quantifizierten

Tab. 3: Beispielhafte summarische Darstellung des technischen Potenzials der hydrothermalen Reservoirs im nördlichen Oberrheingraben zur Stromerzeugung. Für die Gewinnungsfaktoren und Wirkungsgrade wurden zur besseren Vergleichbarkeit die gleichen Werte wie bei Jung et al (2002) für den Oberrheingraben (ORG) angesetzt.

Table 3: Example for the summarised technical potential of the hydrothermal reservoirs of the northern Upper Rhine Graben for electricity production. The same recovery factors and degrees of efficiency were used as by Jung et al (2002) for the Upper Rhine Graben (ORG) to facilitate reproducibility.

Reservoir-formation	Temperatur-klassen [°C]	Volumen [m³]	Therm. Energie [EJ]	Verstrom-barer Anteil [EJ]	Stromerzeugungspotenzial unter Einbeziehung technischer Wirkungsgrade [EJ]
Bunt-	110	1,16 E+09	0,26	0,036	0,004
sand-	140	2,14 E+09	0,61	0,103	0,012
stein	170	3,69 E+10	13,05	2,740	0,342
Σ			13,91	2,879	0,358
Rot-	110	1,47 E+11	32,41	4,537	0,454
liegend	135	2,94 E+11	79,78	13,563	1,560
	163	5,36 E+10	17,86	3,572	0,447
Σ			198,19	21,673	2,460
Muschelkalk ORG (Jung et al. 2002)			12	2,1	0,24
Buntsandstein ORG(Jung et al. 2002)			87	16	1,8

Potenzial nur um das technische Potenzial handelt. Unter Nachhaltigkeitsaspekten sollte und kann dieses technische Potenzial – auch vor dem Hintergrund seiner gewaltigen Dimensionen – nur innerhalb eines sehr langen Zeitraums erschlossen werden, da eine Regeneration der geothermischen Ressourcen infolge des natürlichen Wärmestroms über kürzere Zeiträume nicht möglich ist. Gründe hierfür liegen nach Jung et al. (2002) in der relativ geringen radioaktiven Wärmeerzeugung des tieferen Untergrunds, dem damit verbundenen relativ niedrigen Wärmestrom aus dem Erdinneren und der vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen. Eine einmal vollständig abgekühlte Gesteinsformation benötigt demzufolge einige Jahrhunderte oder länger, um wieder die ursprüngliche Temperatur zu erreichen. Muffler & Cataldi (1978) geben an, dass für den Zeitraum einer geothermischen Nutzung eines Reservoirs von mehreren Jahrzehnten der berechnete Wärmeinhalt um maximal 10 bis 20 % höher liegt, wenn man die nachströmende Wärme aus dem Untergrund mit berücksichtigt. Die nachströmende Wärme aus dem Untergrund wurde daher bei der Quantifizierung nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Quantifizierung sind neben der summarischen Darstellung für einzelne Modelleinheiten (Tab. 3) im Abschlussbericht, ähnlich den Kartendarstellungen von Haenel & Staroste (1988 und 2002) separat für jede Modelleinheit in Karten dargestellt.

Wie die in Tab. 3 dargestellten Ergebnisse der Quantifizierung der hydrothermalen Potenziale im nördlichen Oberrheingraben und angrenzender Regionen zeigen, sind im Vergleich zu den Zahlen von Jung et al. (2002) ähnlich hohe Potenziale wie im restlichen Oberrheingraben zu erwarten. Berücksichtigt man die Flächennutzung sowie die Ausdehnung der Einflussbereiche der einzelnen Kraftwerke im Untergrund, sollte, bei aufeinander abgestimmter Planung und dem derzeitigen Stand der Technik (ca. 5 MW_{el} und 25 MW_{th}), der gleichzeitige Betrieb von ca. 10 bis 15 Geothermiekraftwerken im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens möglich sein.

4.2 Qualitative Potenzialbestimmung

Für die qualitative Bestimmung des tiefeingeothermischen Potenzials werden im Sinne der bei Arndt et al. (2011) vorgestellten Methodik zur Potenzialausweisung mit Hilfe von 3D-Modellen, in Anlehnung an den „Analytic Hierarchy Process“ (AHP) nach Saaty (1980), die verschiedenen betrachteten Parameter entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet zur Potenzialberechnung berücksichtigt. Dies erfolgt zellbasiert für jede Zelle der S-GRIDs, die aus den Einheiten des geologischen 3D-Modells gebildet wurden und mit den thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerten attribuiert sind.

Da das Potenzial für vier unterschiedliche tiefeingeothermische Nutzungssysteme ausgewiesen wird, müssen für jedes Nutzungssystem die zur Potenzialermittlung relevanten Eigenschaften identifiziert und festgelegt werden. Grundlage für die Festlegung ist das in Tab. 2 dargestellte Bewertungsschema sowie die Verfügbarkeit der zur Potenzialermittlung vorliegenden Kennwerte. Die im Bewertungsschema benutzten drei Bedeutungsklassen müssen für die Übertragung auf die bei Arndt et al. (2011) beschriebene Methodik durch Paarvergleiche weiter differenziert werden, sodass eine Bewertungsskala mit mehreren Zwischenschritten erreicht wird. Dies wird für jedes Nutzungssystem (hydrothermale, petrothermale, störungsbezogene und geschlossene Systeme) durchgeführt, sodass jeweils eine eigene Bewertungsmatrix entsteht, in der die jeweiligen Bedeutungsunterschiede der einzelnen Kennwerte festgelegt sind. Hierbei wird für jedes tiefeingeothermische Nutzungssystem jeweils die Temperatur als wichtigster Kennwert vor jenen gewählt, die den konduktiven und konvektiven Wärmetransport bestimmen. Die in Tab. 2 als Reservoirseigenschaften bezeichneten Parameter sind lokal variabel und können in der Regel nicht überregional betrachtet werden. Diese Kennwerte, die vor der Erschließung durch Detailuntersuchungen wie 3D-Seismik, Bohrkernuntersuchungen und In-situ-Spannungsmessungen genauer zu ermitteln sind, konnten im Rahmen der hier beschriebenen qualitativen Potenzialausweisung

Tab. 4: Grenzwerte der thermophysikalischen und hydraulischen Kennwerte, die für die qualitative Potenzialausweisung herangezogen werden. Jede Potenzialstufe erhält für die vereinfachte weitere Darstellung eine Farbcodierung.

Table 4: Threshold values for the potential categories of the distinct geothermal parameters, which are used for the qualitative assessment of the deep geothermal potential of Hesse. Each category is encoded in a certain colour to facilitate recognition.

Potenzial	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	< 1,25	> 1,25	> 2,0	> 3,0	> 5,0
Reservoirtemperatur [°C]	< 60	> 60	> 100	> 120	> 150
Geothermischer Grad. [K/km]	< 20	> 20	> 30	> 40	> 50
Permeabilität [m ²]	< 1·10 ⁻¹⁵	> 1·10 ⁻¹⁵	> 1·10 ⁻¹³	> 1·10 ⁻¹¹	> 1·10 ⁻⁹
Durchlässigkeit [m/s]	< 1·10 ⁻⁸	> 1·10 ⁻⁸	> 1·10 ⁻⁶	> 1·10 ⁻⁴	> 1·10 ⁻²
Transmissibilität [m ²]	< 5·10 ⁻¹⁴	> 5·10 ⁻¹⁴	> 5·10 ⁻¹²	> 5·10 ⁻¹⁰	> 5·10 ⁻⁸
Transmissivität [m ² /s]	< 5·10 ⁻⁷	> 5·10 ⁻⁷	> 5·10 ⁻⁵	> 5·10 ⁻³	> 5·10 ⁻¹

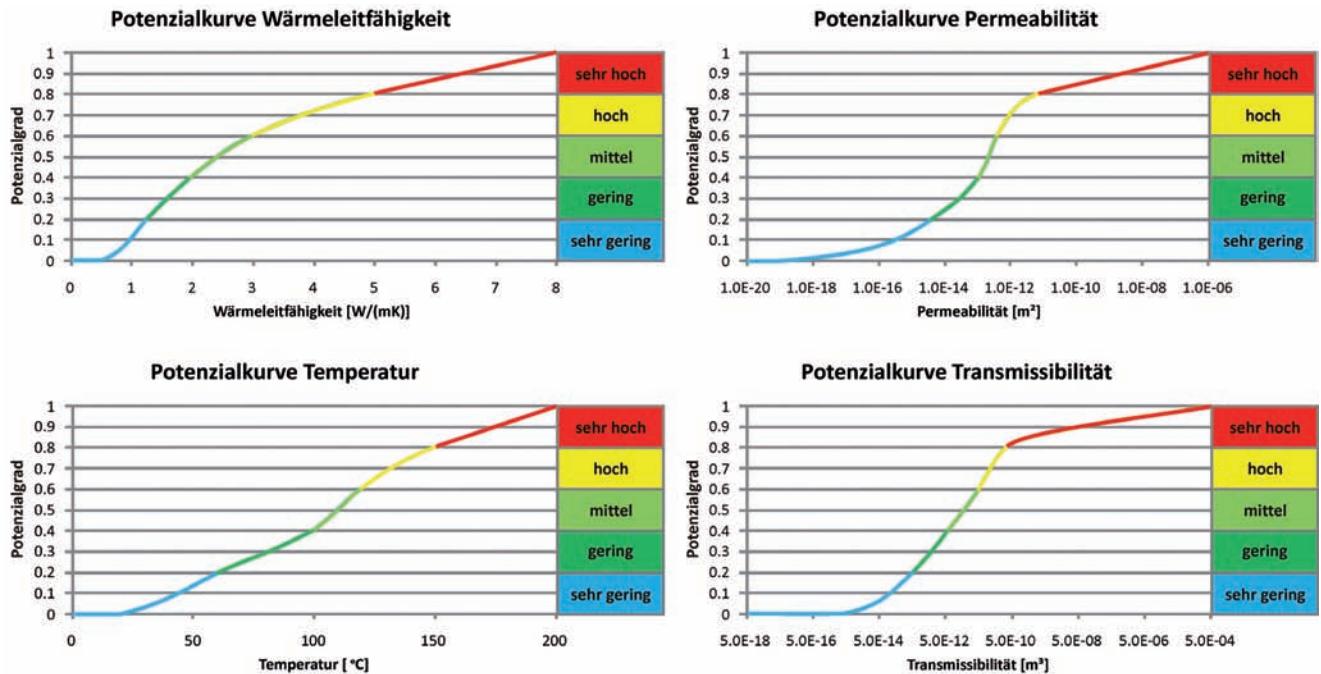


Abb. 4: Beispieldarstellung der Potenzialkurven für Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität, Temperatur und Transmissibilität.

Fig. 4: Examples for potential curves of thermal conductivity, permeability, temperature and transmissibility.

noch nicht dargestellt werden und werden erst zur anschließenden Interpretation der Ergebnisse des Potenzialmodells berücksichtigt.

Für die thermophysikalischen und hydraulischen Parameter, die anhand eigener Messungen oder umfangreicher Literaturdaten besser quantifiziert werden konnten, sind vor der Verwendung des beschriebenen Ansatzes Grenzwerte festgelegt worden. Diese Grenzwerte definieren Wertebereiche, für die ein sehr hohes, hohes, mittleres, geringes oder sehr geringes Potenzial vorliegt (Tab. 4). Diese Wertebereiche entsprechen bestimmten, von Arndt et al. (2011) vorgestellten Potenzialgraden zwischen 0 und 1, die zur tatsächlichen Berechnung mit der angepassten „Analytic Hierarchy Process“-Methode verwendet werden. Somit ergibt sich für jeden Parameter eine Potenzialkurve, die das Verhältnis von Potenzialgrad zu den durch die Grenzwerte definierten Wertebereichen darstellt (Abb. 4). Jeder dieser mit Hilfe von Erfahrungswerten festgelegte Wertebereich zur Potenzialbeschreibung erhält unabhängig vom betrachteten Parameter eine Farbcodierung. Anhand dieser Farbcodierung kann durch den Nutzer sowohl für jeden einzelnen Parameter als auch für das Gesamtpotenzial bestimmter Modelleinheiten oder Regionen das Potenzial schnell und einfach visualisiert werden.

Um das natürliche Potenzial nicht zu überschätzen, kann eine bei der Potenzialausweisung betrachtete Modelleinheit keine höhere Potenzialeinstufung erhalten als die Einzelpotenzialeinstufung eines Kennwertes, wie z. B. Temperatur oder Transmissibilität, der als **sehr wichtig** eingestuft wurde. So kann z. B. das Potenzial eines hydrothermalen Reservoirhorizontes nicht als hoch oder sehr hoch eingestuft werden,

wenn die hydraulischen Eigenschaften nur einem mittleren Potenzial entsprechen.

Da für das Erreichen der zur Stromerzeugung benötigten Mindestförderrate von 50 m³/h nicht die Gebirgspermeabilität, sondern die aus Gebirgspermeabilität und Formationsmächtigkeit zu errechnende Transmissibilität entscheidend ist, wurde bei den hydraulischen Kennwerten eine solche Grenzwertfestlegung für die Transmissibilität getroffen. Bei ausreichend hohen Formationsmächtigkeiten können auch bei geringeren Gesteinspermeabilitäten als den hier als Grenzwert festgelegten, die benötigte Transmissibilität und somit die Mindestförderrate erreicht werden. Wird die aus Mächtigkeit und Gebirgspermeabilität berechnete Mindesttransmissibilität nicht erreicht, liegt kein hydrothermales Potenzial vor und es müssen Stimulationsmaßnahmen eingesetzt werden, sodass nur petrothermale oder Erschließungskonzepte über geschlossene Systeme sinnvoll sind.

Im Rahmen des Projektes werden natürliche Systeme betrachtet. Daher können Gesteinseinheiten, für die sich nach der hier getroffenen Potenzialausweisung aufgrund geringer Gebirgspermeabilitäten für hydrothermale Nutzungssysteme ein geringes bis sehr geringes Potenzial ergibt, nur durch den Einsatz von Stimulationsmaßnahmen zu lohnenden Zielen für die geothermische Erschließung werden. Als Grenze zwischen hydrothermalen und petrothermalen Potenzialen wurde die von Jung et al. (2002), Stober et al. (2009) und Schulz (2009) angegebene Mindesttransmissibilität von $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$ angesetzt, die nach der Potenzialeinstufung zwischen geringem und mittlerem Potenzial liegt (Tab. 4). Ab der Einstufung mittleres hydrothermales Potenzial sind demnach, je nach Druckabsenkung bei der Förderung (entspricht

bei der tiefen Geothermie oftmals einem Absenkungsbetrag von mehr als 500 m) und den von der chemischen Beschaffenheit und der Temperatur abhängigen Fluideigenschaften, Förderaten von ca. 50 m³/h zu erwarten (Jung et al. 2002).

Für jede Zelle ergibt sich aus dem für die betrachtete Einheit festgelegten Kennwert und den jeweiligen Potenzialkurven für jeden berücksichtigten geothermischen Kennwert ein Potenzialvektor. Über die Verrechnung der für die einzelnen Kennwerte getroffenen Potenzialeinstufungen und der in den Bewertungsmatrizen mit allen relevanten Kennwerten festgelegten Wichtungen ergibt sich dann die qualitative Potenzialeinstufung für das jeweilige Nutzungssystem und die jeweils betrachtete Formation. Konkret wird hierbei aus dem Skalarprodukt der Potenzialvektoren und dem normierten Eigenvektor für die berücksichtigten geothermischen Kennwerte der Bewertungsmatrix das Gesamtpotenzial der betrachteten Zelle berechnet (Arndt et al. 2011). Das Gesamtpotenzial kann dann entweder für bestimmte Tiefenschnitte oder für eine bestimmte Modelleinheit oder -region aus den Werten der Einzelzellen berechnet werden. Dabei werden die beschriebenen Knock-out-Kriterien für Mindesttemperatur und Mindesttransmissibilität mitberücksichtigt. Zusätzlich möglich ist die Betrachtung des minimalen Potenzials unter Annahme des ersten Quartils oder Minimalwertes, des mittleren Potenzials unter Annahme des Mittelwertes bzw. des Medians und des maximalen Potenzials unter Annahme des 3. Quartils oder Maximalwertes der jeweiligen Kennwerte. Somit können neben der aus den Mittelwerten be-

stimmten qualitativen Potenzialverteilung auch „worst case“- bzw. „best case“-Szenarien dargestellt werden.

4.3 Beispiele für die qualitative Potenzialbestimmung

Zur Bewertung der Funktionalität des vorgestellten Konzeptes zur qualitativen Potenzialausweisung wurden vor der Anwendung auf den dreidimensionalen Fall mehrere Testreihen durchgeführt. Diese Tests dienen weiterhin zur Festlegung der Grenzwerte sowie der Kalibration der Gewichtung der einzelnen Parameter des Konzeptes vor der Übertragung auf den dreidimensionalen Fall. Sie wurden zunächst exemplarisch an mehreren Standorten für den eindimensionalen Fall einer virtuellen Bohrung (Abb. 5) und für den zweidimensionalen Fall an mehreren geologisch-geothermischen Profilschnitten, von denen hier einer vorgestellt wird (Abb. 6), durchgeführt.

Die stratigrafische Abfolge, sowie im zweidimensionalen Fall die Temperatur, wurde dabei bereits aus dem dreidimensionalen geologischen Modell und dem Temperaturmodell entnommen. Für den eindimensionalen Fall wurde das stratigrafische Profil ebenfalls aus dem geologischen Modell übernommen, jedoch für die Funktionalitätstests zur genaueren Betrachtung mit regionalgeologischen Normalprofilen weiter untergliedert. Das Temperaturprofil der virtuellen Bohrung wurde entsprechend der in Abb. 5 angegebenen

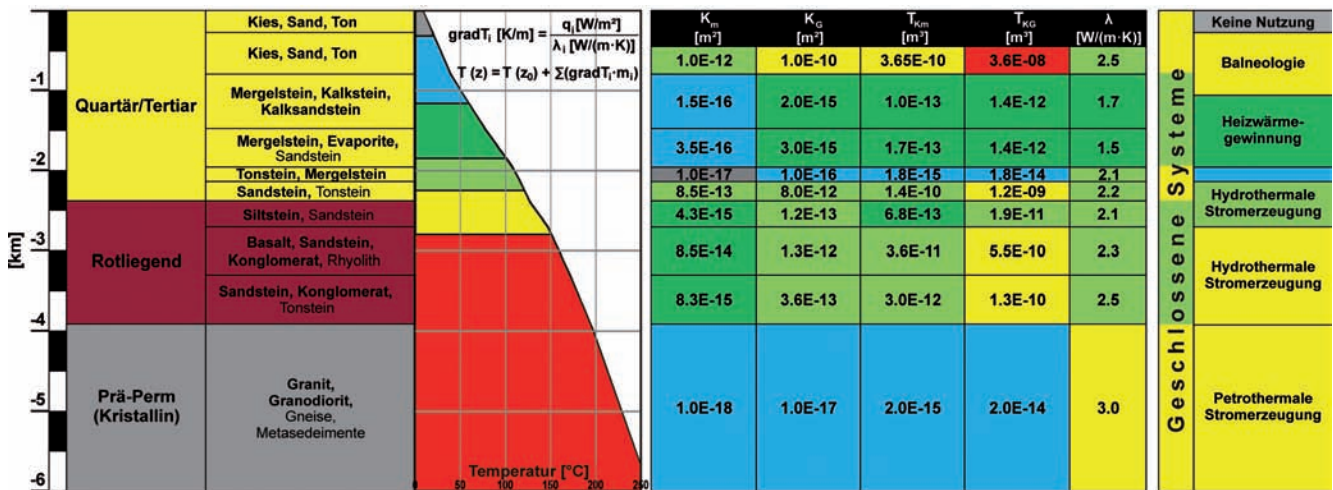


Abb. 5: Vereinfachte Anwendung des qualitativen Potenzialausweisungskonzeptes für den eindimensionalen Fall am Beispiel eines prognostizierten Bohrprofils mit zugehörigem berechnetem Temperaturprofil für eine gedachte Bohrung im Umfeld von Groß-Gerau (siehe Abb. 2). Die einzelnen Parameter Temperatur, Gesteins- und Gebirgsspermeabilität, Gesteins- und Gebirgstransmissibilität und Wärmeleitfähigkeit sind entsprechend ihrer Potenzialbewertung farbcodiert (Farbcode siehe Tab. 4). Über die Verrechnung der Potenzialbewertung der einzelnen Parameter unter Berücksichtigung ihrer Wichtungen ergibt sich das tiefenbezogene geothermische Potenzial für geschlossene und offene Nutzungssysteme der vorgestellten Bohrung (verändert nach Bär et al. 2010).

Fig. 5: Simplified example for the application of the method developed to assess the deep geothermal potential for a one-dimensional case. Given is a prognosis of a drilling profile with attached calculated temperature profile for the region of Groß-Gerau (see Fig. 2). The potential of the different geothermal parameters like temperature, rock and rock mass (bulk) permeability, rock and rock mass (bulk) transmissibility and thermal conductivity are coloured according to the colour scheme given in table 4. By summarising the classification of the different parameters including their relevance, the depth related potential for deep geothermal systems can be attributed to the virtual drilling (modified after Bär et al. 2010).

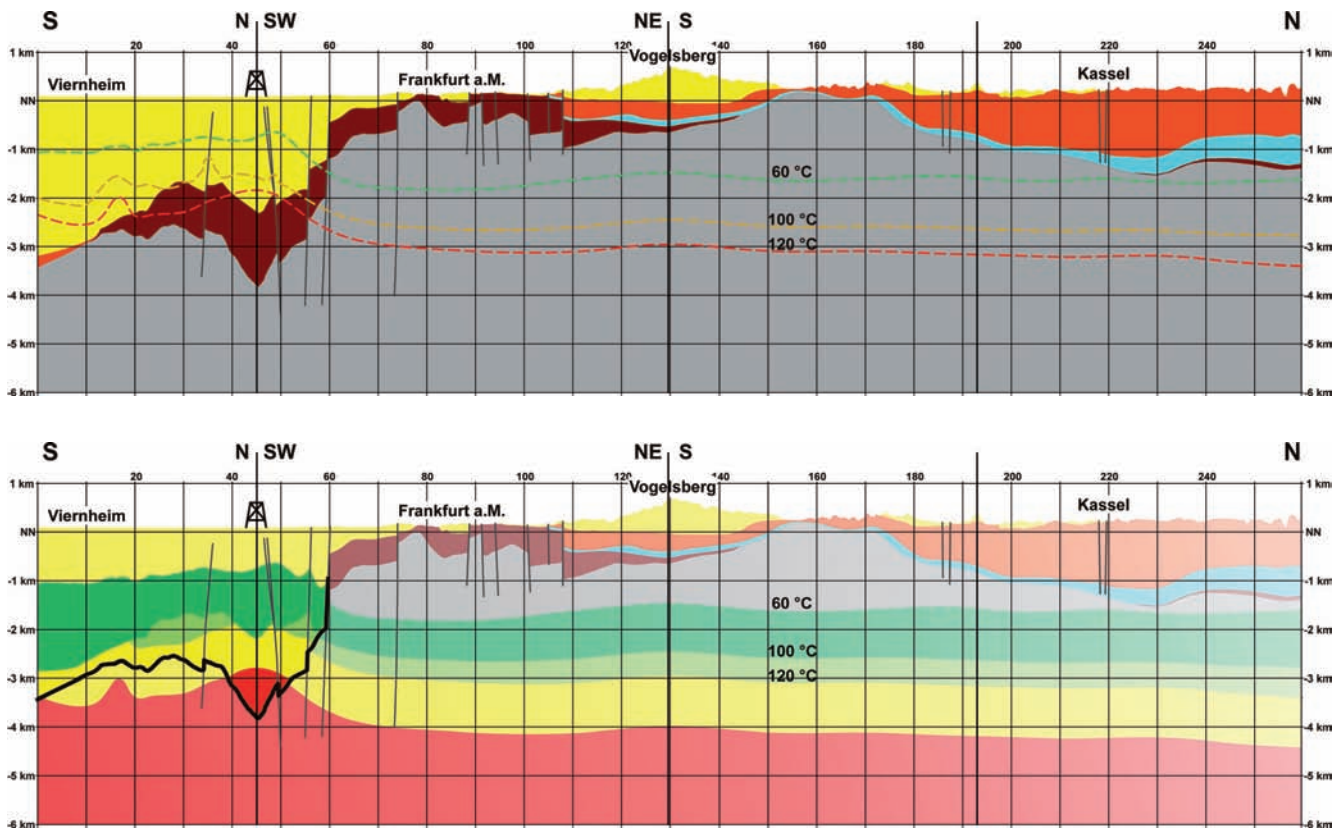


Abb. 6: Oben: Geologischer Schnitt durch den nördlichen Oberrheingraben von Viernheim im Süden über Mittel- und Nordhessen bis etwa Trendelburg im Norden, mit ausgewählten Isothermen aus dem Temperaturmodell (gestrichelte Linien). Die in Abb. 5 vorgestellte Bohrung liegt in etwa am Profilknickpunkt zwischen Viernheim und Frankfurt a. M. (schwarzer Bohrturm). **Unten:** Ergebnis der tiefengeothermischen Potenzialbewertung für den gleichen Profilschnitt, hier exemplarisch für die hydrothermale Nutzung im Oberrheingraben und petrothermale Nutzung in Resthessen (halbtransparent). Potenziale für geschlossene oder störungsbezogene Systeme sind nicht dargestellt.

Fig. 6: Top: Geologic cross-section through the northern Upper Rhine Graben from Viernheim in the south through middle and northern Hesse to Trendelburg in the north, including the isotherms of the interpolated temperature model (red, yellow and green dashed lines). The virtual drilling given in Fig. 5 is located at the inflection point of the cross-section between Viernheim and Frankfurt (black well derrick). **Bottom:** Result of the assessment of the deep geothermal potential for hydrothermal systems of the Upper Rhine Graben and petrothermal systems for the rest of Hesse (semi-transparent) for the same cross-section. Closed loop or fault-associated systems are not considered in the given section.

vereinfachten Gleichung auf Grundlage des Fourier'schen Gesetzes für den konduktiven Wärmetransport aus den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der durchteuften Schichtenfolge und einer für eine Beispielregion angenommene mittlere Wärmestromdichte berechnet. Für das in Abb. 5 dargestellte Beispiel einer virtuellen Bohrung im nördlichen Oberrheingraben, welche die Schichten des Quartärs, Tertiärs, des Rotliegend und des kristallinen Grundgebirges durchteuft, wurde eine Wärmestromdichte von 95 mW/m^2 angesetzt.

Die Anwendung des beschriebenen Konzeptes zur Ausweisung des tiefeingeothermischen Potenzials für den eindimensionalen Fall ist in Abb. 5 dargestellt. So kann für das Rotliegend im nördlichen Oberrheingraben aufgrund der Reservoirtemperatur, der Gesteins- und Gebirgspermeabilität, der Wärmeleitfähigkeit und unter Berücksichtigung des zu erwartenden Kluft- und Störungssystems ein mittleres bis

hohes Potenzial für die hydrothermale Stromerzeugung ausgewiesen werden. Für die unterlagernden Granite, Granodiorite und Gneise des kristallinen Grundgebirges ergibt sich aufgrund der hohen Temperaturen von deutlich mehr als 150 °C und den guten Wärmeleitfähigkeiten ein hohes Potenzial für petrothermale Stromerzeugung. Unter Berücksichtigung der starken tektonischen Zerlegung des Untergrundes des nördlichen Oberrheingrabens und der daraus resultierenden Klüftung sind wahrscheinlich sogar höhere Gebirgspermeabilitäten als die hier angesetzt zu erwarten (Stober & Bucher 2007). Weiterhin zeigt sich, dass schon in den Gesteinen der tertiären Grabenfüllung aufgrund der vereinzelt hohen Gebirgspermeabilitäten und der regional erhöhten Untergrundtemperatur geringe bis mittlere Potenziale für die hydrothermale Heizwärmegegewinnung sowie an der Basis des Tertiärs in der Pechelbronn-Formation ein mittleres Potenzial für die hydrothermale Stromerzeugung vor-

liegt. Für die geschlossenen tiefeingeothermischen Systeme ergibt sich aufgrund des hohen geothermischen Gradienten und der geringen bis hohen Wärmeleitfähigkeiten ein mittleres bis hohes Potenzial.

Neben der Ausweisung für den eindimensionalen Fall kann auch im zweidimensionalen Fall anhand der Tiefenlage der Isothermen und der für jede Einheit aus den eigenen Untersuchungen bekannten thermophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften, entsprechend dem vorgestellten Bewertungsschema, das tiefeingeothermische Potenzial ausgewiesen werden (Abb. 6).

Hier ist zu erwähnen, dass in der berechneten Untergrundtemperaturverteilung die Geologie und, vor allem wenn keine regionalen Eingangsdaten vorhanden sind, potenzielle Heißwasseraufstiegswege, wie Störungen, nicht berücksichtigt werden. Zum Teil sind bekannte Konvektionszellen jedoch an Stellen ausreichender Datendichte durch die Verwendung aller verfügbaren Temperaturdaten schon im Modell implementiert und insbesondere im Bereich des Oberrheingrabens in den Isothermen deutlich sichtbar (Abb.

6). Annahmen über die Ausdehnung von unbekannten Konvektionszellen, die durch Heißwasseraufstiege an bekannten Störungssystemen belegt sind, können nicht getroffen werden, wenn in deren Einflussgebiet keine tief reichenden Temperaturmessungen vorliegen. Somit können vermutete Konvektionszellen auch bei bekannten an der Oberfläche austretenden Thermalquellen aufgrund der hohen Unsicherheiten nicht im Temperaturmodell berücksichtigt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass an größeren Störungen, die parallel oder mit flachem Winkel zur Hauptspannungsrichtung orientiert sind, und insbesondere an Kreuzungspunkten großer Störungen, der Aufstieg von heißen Wässern möglich ist. Beispiele in Hessen sind die Thermalquellen von Wiesbaden, Bad Nauheim oder Bad Salzhausen. Eine geothermische Erschließung dieser potenziell gut geeigneten Gebiete steht jedoch in der Regel in Konflikt mit den Grundsätzen des Heilquellenschutzes.

In Abb. 6 ist exemplarisch die Ausweisung des hydrothermalen Potenzials für den nördlichen Oberrheingraben, die Wetterau, den Vogelsberg und die Niederhessische Senke

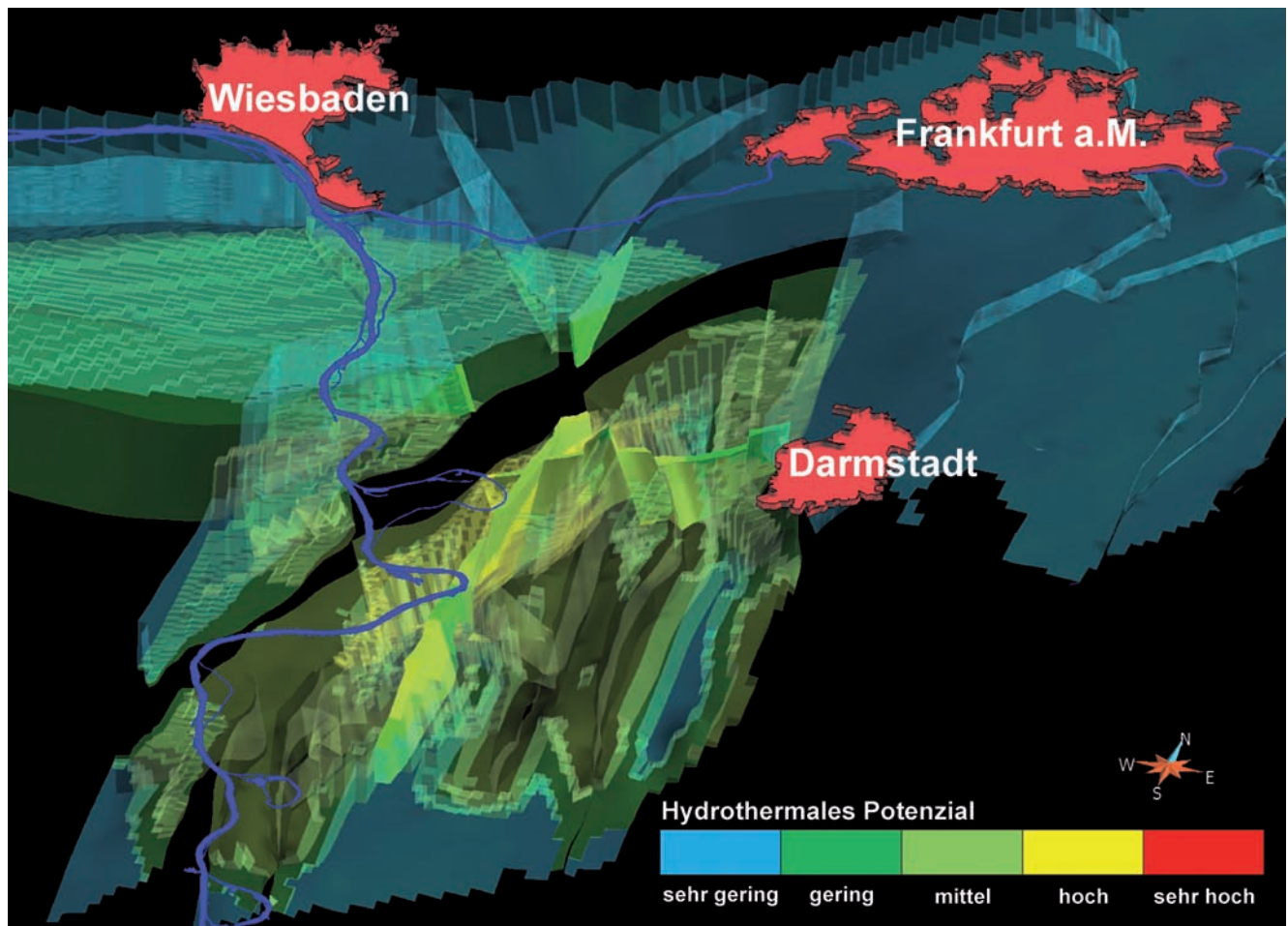


Abb. 7: Darstellung des hydrothermalen Potenzials des Rotliegend im nördlichen Oberrheingraben im geologisch-geothermischen 3D-Modell von Hessen (fünffach überhöht). Zur Orientierung sind einige Städte sowie die Flussläufe von Rhein und Main dargestellt.

Fig. 7: View of the hydrothermal potential of the Rotliegend in the northern Upper Rhine Graben in the geological-geothermal 3D model of Hesse (five times vertically exaggerated). For orientation purposes major cities as well as the rivers Rhine and Main are shown.

dargestellt. Wie sich schon aus dem Verlauf der 60 °C und 100 °C Isothermen zeigt, liegen in Hessen die sedimentären Einheiten des Deckgebirges nördlich des Oberrheingrabens in zu geringer Tiefe für die Nutzung der Tiefen Geothermie. Hier wird wie für das eindimensionale Beispiel deutlich, dass das Rotliegend im nördlichen Oberrheingraben als Reservoirhorizont mit mittlerem bis hohem Potenzial für die hydrothermale Stromerzeugung einzustufen ist. Für die Regionen nördlich des Oberrheingrabens kommen hingegen als direkte Systeme nur störungsbezogene oder petrothermale Nutzungen infrage, da alle sedimentären Einheiten, die aufgrund ihrer thermophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften als hydrothermale Reservoirhorizonte infrage kommen würden, in zu geringer Tiefe liegen. Weiterhin zeigt sich, dass die bisher im Modell erfolgte Untergliederung des Grundgebirges nicht ausreichend für eine detaillierte Beschreibung des petrothermalen Potenzials ist. Hier können nur zukünftige Explorationstätigkeiten, die genauere Einblicke in den strukturellen Aufbau zulassen und genauere Prognosen über die zu erwartenden Gesteinsarten ermöglichen, zur Verbesserung der Potenzialabschätzung beitragen. Diese Kenntnisse können, in Kombination mit den im Rahmen des Projektes ermittelten umfangreichen Daten zu thermophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften der Gesteine des metamorphen und kristallinen Grundgebirges, zur genaueren qualitativen Ausweisung der petrothermalen Potenziale Hessens dienen.

5. Fazit

Für die Geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen wurde eine umfangreiche Datenbasis thermophysikalischer Gesteinskennwerte wie Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie hydraulischer Kennwerte wie Gesteinspermeabilität, Gebirgspermeabilität und Transmissibilität ermittelt. Diese Datenbasis wird durch Porositätsdaten, Gesteinsdichten und felsmechanische Kennwerte ergänzt und bildet gemeinsam mit dem dreidimensionalen geologischen Strukturmodell von Hessen und dem Modell der Untergrundtemperaturverteilung die Grundlage für die Beurteilung der tiefeingeothermischen Potenziale von Hessen.

Die präsentierten Beispiele des Konzeptes zur Ausweisung des tiefeingeothermischen Potenzials von Hessen zeigen für den eindimensionalen (Bohrung) und zweidimensionalen (geologisch-geothermische Profile) Fall, dass die Anwendung des Potenzialausweisungskonzeptes funktioniert und im Rahmen der Modellauflösung zufriedenstellende, nachvollziehbare Prognosen zum standortbezogenen geothermischen Potenzial liefern kann. Neu ist hierbei, dass neben den hydrothermalen Potenzialen gleichzeitig auch die Potenziale petrothermalen, störungsbezogener und geschlossener tiefeingeothermischer Systeme berücksichtigt werden.

Damit steht eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, um das tiefeingeothermische Potenzial für ganz Hessen mit dem hier vorgestellten Konzept dreidimensional qualitativ ausweisen (Abb. 7) und quantifizieren zu können. Zusätz-

lich sind die geothermischen Gesteinskennwerte der einzelnen Modelleinheiten für weitere Berechnungen oder numerische Modellierungen konkreter geothermischer Projekte nutzbar. Mit Veröffentlichung der Projektergebnisse in Form des Abschlussberichtes u. a. auf den Internetseiten des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie steht eine umfangreiche Planungsgrundlage für die zukünftige Nutzung der Tiefen Geothermie in Hessen zur Verfügung, die eine Qualitätsverbesserung bei der Projektierung geothermischer Anlagen leisten kann.

6. Ausblick

Generell ist die Datenlage zur geothermischen Bewertung des kristallinen und metamorphen Grundgebirges als potenziell petrothermale Nutzhorizont noch unbefriedigend. Insbesondere zum strukturellen Aufbau, der Temperatur und Wärmestromdichte aus Bohrungen und dem lokalen Spannungsfeld in größeren Teufen besteht weiterer Forschungsbedarf. Gegenstand künftiger Untersuchungen sollte außerdem das Rotliegend-Reservoirsystem des nördlichen Oberrheingrabens sein. Hier könnte anhand der Altseismik der Kohlenwasserstoff-Exploration sowie neuerer Seismik der Geothermie-Exploration ein detaillierteres geologisches Strukturmodell erstellt werden, das maßgeblich zur genaueren Abschätzung der Nutzbarkeit und der Quantifizierung der geothermischen Ressourcen sowie zum besseren Verständnis des Störungs- und Kluftsystems beitragen könnte. Ein solches Modell kann außerdem den Geologischen Landesdiensten sowie Projektplanern als Grundlage dienen, hydraulische und thermische Wechselwirkungen bestehender und geplanter Kraftwerksprojekte besser vorausszusehen.

7. Danksagung

Die Autoren danken dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Projektes. Weiterhin danken wir dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie für seine fachliche Funktion als Kooperationspartner, die gute, intensive Zusammenarbeit und die fruchtbaren Anregungen und Diskussionen. Für die Möglichkeit der Archivnutzung zu Datenrecherchezwecken gilt unser Dank ebenfalls dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie sowie dem Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz. Nicht zuletzt danken wir allen Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und Tätigkeiten als studentische Hilfskräfte am Fachgebiet Angewandte Geothermie des Instituts für Angewandte Geowissenschaften zur Erweiterung der geothermischen Datenbasis maßgeblich beigetragen haben. Besonders herzlichen Dank den beiden Reviewern Prof. Dr. Ingrid Stober und Dr. Thorsten Agemar für die konstruktiven Anmerkungen und Änderungsvorschläge, die deutlich zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

8. Schriftenverzeichnis

- Arndt, D., Bär, K., Hoppe, A. & Sass, I. (2010): Geologische Strukturmodellierung von Hessen zur Bestimmung des geothermischen Potenzials. – Schriftenr. dt. Ges. Geowiss., 68 (GeoDarmstadt2010): 69–70, Hannover (Dt. Ges. Geowiss.).
- Arndt, D., Bär, K., Fritsche, J.-G., Kracht, M., Sass, I. & Hoppe, A. (2011): 3D structural model of the Federal State of Hesse (Germany) for geo-potential evaluation. – Z. dt. Ges. Geowiss. 162 (4): 353–370 (this issue), Stuttgart (Schweizerbart).
- Bär, K. (2008): 3D-Modellierung des tiefeingeothermischen Potenzials des nördlichen Oberrheingrabens und Untersuchung der geothermischen Eigenschaften des Rotliegend. – Dipl.-Arb., TU Darmstadt: 151 S., Darmstadt (unveröff.).
- Bär, K., Arndt, D., Fritsche, J.-G., Götz, A.E., Heggemann, H., Hoppe, A., Hoselmann, C., Kracht, M., Kött, A., Liedmann, W., Stärk, A. & Sass, I. (2010): Konzept zur Quantifizierung des tiefeingeothermischen Potenzials von Hessen am Beispiel des nördlichen Oberrheingrabens. – Schriftenr. dt. Ges. Geowiss. (GeoDarmstadt2010) 68: 74, Hannover (Dt. Ges. Geowiss.).
- Bär, K., Felder, M., Götz, A.E., Molenaar, N. & Sass, I. (2011): The Rotliegend reservoir system of the northern Upper Rhine Graben (Germany): from pores to production. – Geophys. Res. Abstr., 13: EGU2011-A-1190, Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly, Wien.
- Buß, A., Bär, K. & Sass, I. (2008): Geothermisches 3D-Modell für Hessen – erste Ergebnisse für den Oberrheingraben. – Der Geothermiekongress 2008, Karlsruhe.
- Clauser, C. & Huenges, E. (1995): Thermal conductivity of rocks and minerals. – In: Ahrens, T.J. (Hrsg.): Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants: 105–126, American Geophys. Union.
- Clauser, C. & Villinger, H. (1990): Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben. – Geophys. J. Int., 100: 393–414, Oxford (Blackwell).
- Clauser, C., Deetjen, H., Höhne, F., Rühaak, W., Hartmann, A., Schellschmidt, R., Rath, V. & Zschocke, A., (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe. – Endbericht zum Auftrag 9X0009-8390-0 des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), Applied Geophysics and Geothermal Energy E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen: 159 S., Aachen.
- DWD 2006 (Deutscher Wetterdienst – Abteilung Klima und Umweltberatung) (2006): Klimarasterdaten im 1-km-Raster von Deutschland, Stand 2006.
- Haenel, R. & Staroste, E. (Hrsg.) (1988 und 2002): Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Publ. No. EUR 11026 und 17811 of the European Commission, Office of Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Hartmann, A., Rath, V. & Clauser, C. (2005): Thermal conductivity from core and well log data. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42: 1042–1055, Oxford (Pergamon).
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. & Müller, B. (2010): Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. – Tectonophysics, 482 (1–4): 3–15, Amsterdam (Elsevier).
- Hornung, J. & Aigner, T. (2004): Sedimentäre Architektur und Porperm-Analyse fluviatiler Sandsteine: Fallbeispiel Coburger Sandstein, Franken. – Hallesches Jb. Geowiss., Reihe B, Beih. 18: 121–138, Halle/S. (Univ. Halle-Wittenberg).
- Huenges, E. (2010): Tiefe Geothermie in Deutschland – eine Übersicht. – bbr (Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau), Sonderheft, Tiefe Geothermie: 6–13, Bonn (Wirtschafts- u. Verl.-Ges. Gas u. Wasser).
- Jaritz, R. (1999): Quantifizierung der Heterogenität einer Sandsteinmatrix am Beispiel des Stubensandsteins (Mittlerer Keuper, Württemberg). – Tübinger geowiss. Arb., C 48: 104 S., Tübingen (Inst. Geowiss. Univ. Tübingen).
- Jodocy, M. & Stober, I. (2011): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und im Südwestdeutschen Molassebecken. – Erdöl Erdgas Kohle, 127 (1): 20–27, Hamburg (Urban).
- 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-Wärme-Kopplung (KWK) in Deutschland. – Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (Hannover; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover); Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.
- Kühne, K., Maul, A.-A. & Gorling, L. (2003): Aufbau eines Fachinformationssystems Geophysik. – Z. angew. Geol., 2: 48–53, Stuttgart (Schweizerbart).
- Legarth, B., Tischner, T. & Huenges, E. (2003): Stimulation experiments in sedimentary, low-enthalpy reservoirs for geothermal power generation, Germany. – Geothermics, 32: 487–495, Pisa (Pergamon).
- Lippmann, E. & Rauen, A. (2005): TCS manual / Handbuch zum Thermal Conductivity Scanner.
- Manning, C.E. & Ingebritsen, S.E. (1999): Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems. – Rev. Geophys., 37: 127–150, Washington D. C. (American Geophys. Union).
- Muffler, P. & Cataldi, R. (1978): Methods for regional assessment of geothermal resources. – Geothermics, 7: 53–89, Pisa (Pergamon).
- Orzol, J., Jung, R., Jatho, R., Tischner, T. & Kehler, P. (2005): The GeneSys-Project: extraction of geothermal heat from tight sandstones. – Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24.–29. April 2005.
- Paschen, H., Oertel, D. & Grünwald, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland: 128 S. – Büro für Technologiefolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag. – Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung.
- Pester, S., Agemar, T., Alten, J.-A., Kuder, J., Kuehne, K., Maul, A.-A. & Schulz, R. (2010): GeotIS – the geothermal information system for Germany. – Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25.–29.04.2010.
- PK (Personenkreis) Tiefe Geothermie (2007): Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – Arbeitshilfe für Geologische Dienste. – http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/tiefe_geothermie_arbeitshilfe_08022007.pdf (Stand 2011).
- PK (Personenkreis) Tiefe Geothermie (2008): Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – Geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren. – http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/Parameter_24012008.pdf (Stand 2011).
- Popov, Y.A., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F. & Burkhardt, H. (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high resolution optical scanning. – Geothermics, 28 (2): 253–276, Pisa (Pergamon).

- Popov, Y.A., Tertychnyi, V., Romushkevich, R., Korobkov, D. & Pohl, J. (2003): Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data. – *Pure Appl. Geophys.*, 160: 1137–1161, Basel (Birkhäuser).
- Pribnow, D. & Sass, J. (1995): Determination of thermal conductivity from deep boreholes. – *J. Geophys. Res.*, 100: 9981–9994, Washington D. C. (American Geophys. Union).
- Saaty, T.L. (1980): The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation, XIII: 287 S., New York (McGraw-Hill).
- Sass, I. & Bär, K. (2008): 3D-Modell der geothermischen Tiefenpotenziale in Hessen – erste Ergebnisse. – 3. Tiefengeothermie-Forum 2008 – Nutzung der Erdwärme in Hessen – Von Vision bis Praxis, Darmstadt (Vortrag: <http://www.hessenenergie.de/Downloads/D1-Nach/dln-tgf/tgf-08/tgf-08-pdfs/3-Sass-090908.pdf>).
- Sass, I. & Hoppe, A. (Hrsg.) (2011): Forschungs- und Entwicklungsprojekt 3D-Modell der geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen – Abschlussbericht: 218 S., Darmstadt (TU Darmstadt).
- Sass, I., Bär, K., Arndt, D., Fritsche, J.-G., Götz, A.E., Heggemann, H., Hoppe, A., Hoselmann, C., Kracht, M., Kött, A., Liedmann, W. & Stärk, A. (2010): Stand des 3D-Modells der geothermischen Tiefenpotenziale von Hessen – standortbezogene Potenzialausweisung anhand virtueller Bohrungen und Schnitte. – 5. Tiefengeothermie-Forum 2010 – Standorte, Reservoir und Technologien, 15.09.2010, Darmstadt (Vortrag: <http://www.hessenenergie.de/Downloads/D1-Nach/dln-tgf/tgf-10/tgf-10.shtml>).
- Schulz, R. (Hrsg.) (2009): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland – Endbericht: 114 S., Hannover (Leibniz-Inst. Angew. Geophys.).
- Schulz, R., Agemar, T., Alten, A.-J., Kühne, K., Maul, A.-A., Pester, S. & Wirth, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. – *Erdöl Erdgas Kohle*, 123 (2): 76–81, Hamburg (Urban).
- Schoen, J.H. (1996): Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. – In: *Handbook of geophysical explorations. Section I: Seismic exploration: V.18*, Trowbridge (Redwood).
- Somerton, W.H. (1992): Thermal properties and temperature-related behavior of rock-fluid systems. – *Developm. Petroleum Sci.*, 37: 257 S., Amsterdam (Elsevier).
- Stober, I. (2011): Depth- and pressure-dependent permeability in the upper continental crust: data from the Urach 3 geothermal borehole, southwest Germany. – *Hydrogeol. J.*, 19: 685–699, Berlin (Springer).
- Stober, I. & Bucher, K. (2007): Hydraulic properties of the crystalline basement. – *Hydrogeol. J.*, 15: 213–224, Berlin (Springer).
- Stober, I. & Jodocy, M. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im baden-württembergischen und französischen Teil des Oberrheingrabens. – *Grundwasser*, 14: 127–137, Berlin (Springer).
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K. & Schulz, R. (2009): Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland. – BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): 73 S., Berlin.
- Sulzbacher, H. & Jung, R. (2010): Numerical simulation of geothermal energy production from hydraulic fractures in tight sedimentary rock formations by cyclic-injection-production-schemes. – *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 161 (1): 99–109, Stuttgart (Schweizerbart).
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. (1979): Zur geothermischen Geschichte des Oberrheingrabens. Zusammenfassung und Auswertung eines Symposiums. – *Fortschr. Geol. Rheinland Westfalen*, 27: 109–120, Krefeld (Geol. L.-Amt Nordrhein-Westfalen).
- Tukey, J.W. (1977): *Exploratory data analysis*; 1. Auflage: 688 S., Reading (Addison-Wesley).
- Vosteen, H.D. & Schellschmidt, R. (2003): Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. – *Phys. Chem. Earth*, 28: 499–509, London (Pergamon).
- Werner, D. & Doebl, F. (1974): Geothermal anomalies and consequences for diagenesis and thermal waters – eine geothermische Karte des Rheingrabenuntergrundes. – In: Illies, J.H. & Fuchs, K. (Hrsg.): *Approaches to Taphrogenesis*: 182–191, Stuttgart (Schweizerbart).
- Williams, C.F., Galanis, P.S., Grubb, A.D. & Moses, T.H. (1995): The thermal regime of Santa Maria Province (California). – In: Keller, M.A. (Hrsg.): *Evolution of sedimentary basins/onshore oil and gas investigations, Santa Maria Province, USA*: 25 S. – *U.S. Geol. Survey Bull.*, Washington D. C. (U.S. Gov. Print. Off.).

Manuskript eingegangen: 21.04.2011

Annahme zur Veröffentlichung: 20.09.2011