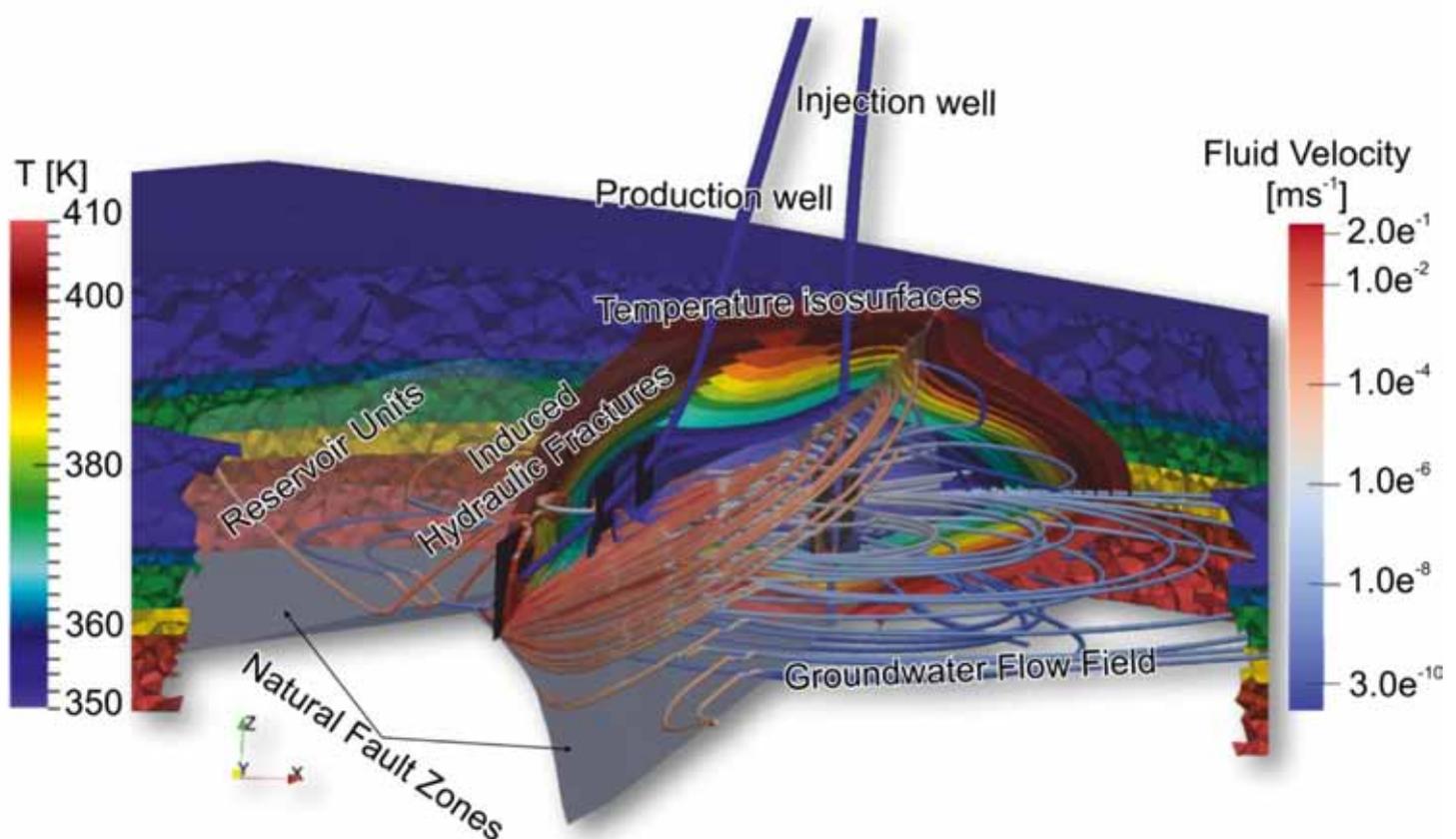


Beckenmodellierung: Temperatur in Sedimentbecken

Mauro Cacace, Magdalena Scheck-Wenderoth, Yvonne Cherubini, Anna Maria Przybycin
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The formation of mineral and energy resources involves the interaction of groundwater flow, mechanical deformation, mass and heat transport processes. Thereby, groundwater flow patterns, temperature field, and fluid-rock interactions are all interdependent. This calls for a unified description linking the coupling between the different scales and related physical phenomena involved. A mathematical formulation of the main driving processes affecting basin fluid and heat transport allows developing numerical models as tools to examine the interactions of simultaneously active processes and variable parameters within the constraints given by physical principles and taking into account proper temporal and three dimensional spatial scales. Therefore, the usage of mathematical models is justified by the help they bring in the understanding and verification of specific mechanisms acting in natural systems. In Section "Basin Analysis" at GFZ German Research Centre for Geosciences mathematical models of increasing degree of complexity are applied to the study of energy and mass transport processes in complex sedimentary basins.



Studien zur Entstehung und Entwicklung von Sedimentbecken sind zum Verständnis der Erdsystemdynamik und der in Sedimentbecken enthaltenen Energie- und Mineralressourcen entscheidend. Insbesondere die Temperaturverteilung der Erdkruste wird von internen und externen Faktoren beeinflusst. Interne Faktoren sind durch Gesteinseigenschaften, wie die thermische Leitfähigkeit oder die radiogene Wärmeproduktion von Gesteinen bestimmt und interagieren mit externen Parametern, wie Oberflächentemperatur, basalem Wärmefluss aus dem Erdmantel und Grundwasserströmung.

Grundlegende Kenntnisse zur Temperaturverteilung in der Erdkruste basieren in erster Linie auf Temperaturmessungen in Bohrungen, deren räumliche Interpolation nicht immer ausreichend ist, um die dreidimensionale Temperaturverteilung im Untergrund zu beschreiben. Gesteinseigenschaften und damit auch die Wärmeleitung variieren räumlich. Zudem kann der Wärmetransport durch weitere Prozesse beeinflusst werden, die im Zusammenhang mit Fluidfluss in der Tiefe stehen. So führt die Kombination verschiedener Wärmetransportmechanismen in unterschiedlichen Gesteinen zu horizontalen und vertikalen Veränderungen des Temperaturgradienten.

Fluide bewegen sich über geologische Zeiträume in Sedimentbecken ebenfalls infolge externer und interner Kräfte, die verschiedene Fließmechanismen bewirken. Dies resultiert in zeitlich veränderlichen Druck- und Temperaturanomalien. Berücksichtigt man schließlich auch die sehr langen zeitlichen (Millionen Jahre) und räumlichen (hunderte Kilometer) Skalen von Sedimentbecken, wird es unmöglich, die Transportprozesse in Sedimentbecken allein mithilfe von Labor- und Geländestudien zu erklären. Großräumige Modelle des zeitlich variablen Fluid- und Wärmetransports in Sedimentbecken sind daher von grundlegender Bedeutung, um die Entwicklung der Becken und der darin enthaltenen Mineral- und Energieresourcen zu verstehen.

Links: Modellierungsergebnis: Isothermenflächen und Grundwasserströmungslinien als Ergebnis einer Simulation des Entwicklungszyklus des geothermisch genutzten Reservoirs Groß Schönebeck (In-situ-Geothermielabor des GFZ) über einen Zeitraum von 30 Jahren

Left: Model result: temperature isosurface and groundwater pathlines after simulating 30 years in the life cycle of the Groß Schönebeck geothermal reservoir (GFZ in situ research lab)



Kontakt: M. Cacace
(cacace@gfz-potsdam.de)

In der Sektion „Sedimentbeckenanalyse“ am Deutschen Geoforschungszentrum GFZ werden mathematische Modelle entwickelt, die Energie- und Massentransportprozesse in komplexen Sedimentbecken beschreiben und demonstrieren, wie eine geeignete Anwendung mathematischer Techniken dazu beitragen kann, unser Verständnis des Systems Erde zu verbessern. Die Ergebnisse dieser Studien stellen neue Informationen zur Dynamik des Wärmeflusses in sedimentären Becken bereit, die im Innern durch lateral variierende Gesteinseigenschaften und Störungszonen beeinflusst werden.

Transienten (zeitlich veränderlicher) Fluidfluss und Wärmetransport in Becken können mit dem sogenannten Kontinuumsansatz modelliert werden. Allerdings weist auch dieser Grenzen in der Darstellung gestörter Gesteine, der Auswirkung von Heterogenitäten und der Verfügbarkeit verlässlicher Daten zur Permeabilität und anderen Gesteinseigenschaften auf. Die Box auf Seite 68 beinhaltet die wichtigsten Grundgleichungen, die zur Modellierung des Grundwasserflusses und des Wärmetransports in Sedimentbecken herangezogen werden. Die Aufstellung gekoppelter Gleichungen in einem stetigen mathematischen Modell beschreibt die relevanten Prozesse, die das Grundwasser, den Druck und das Temperaturfeld beeinflussen. Nach der Definition des mathematischen Problems muss für die Lösung ein konzeptuelles geologisches Modell konstruiert werden, das die physikalischen Eigenschaften und Informationen zu Anfangs- und Randbedingungen integriert und auf welches das mathematische Modell angewendet werden kann. Dies wird schließlich mit Hilfe geeigneter numerischer Verfahren, z. B. der Finite Elemente-Methode umgesetzt.

Wärmeleitung durch Konduktion

Thermische Konduktion ist eine Art der Energieübertragung innerhalb und zwischen Körpern aufgrund eines existierenden Temperaturgradienten. Dabei wirkt Wärmeleitung auf molekularer Ebene mittels Kollision und diffusiver Übertragung von kinetischer, Rotations- und Vibrationsenergie durch feste, flüssige und gasförmige Körper. Unter konduktiven Bedingungen fließt Wärme von einem Körper mit höherer Temperatur zu einem Körper mit geringerer Temperatur. Bei Abwesenheit externer Fluidbewegungen und falls Hebung und Senkung des Beckens langsam genug sind, kann Konduktion als der dominierende Wärmetransportmechanismus betrachtet werden und mit einer vereinfachten Form der Energieerhaltungsgleichung (siehe Box) beschrieben werden. Unter solchen Bedingungen ist der konduktive Wärmefluss von drei Faktoren abhängig: (1) die über das Volumen gemittelte thermische Leitfähigkeit, (2) die durch den Zerfall von natürlich vorkommenden Radionukliden erzeugte radiogene Wärme und (3) der basale Wärmefluss aus dem Erdmantel. Insgesamt können heterogene Materialeigenschaften und die Mehrdimensionalität ihrer Auswirkungen auf der Beckenskala wirkungsvoll mit numerischen Methoden wiedergegeben werden.

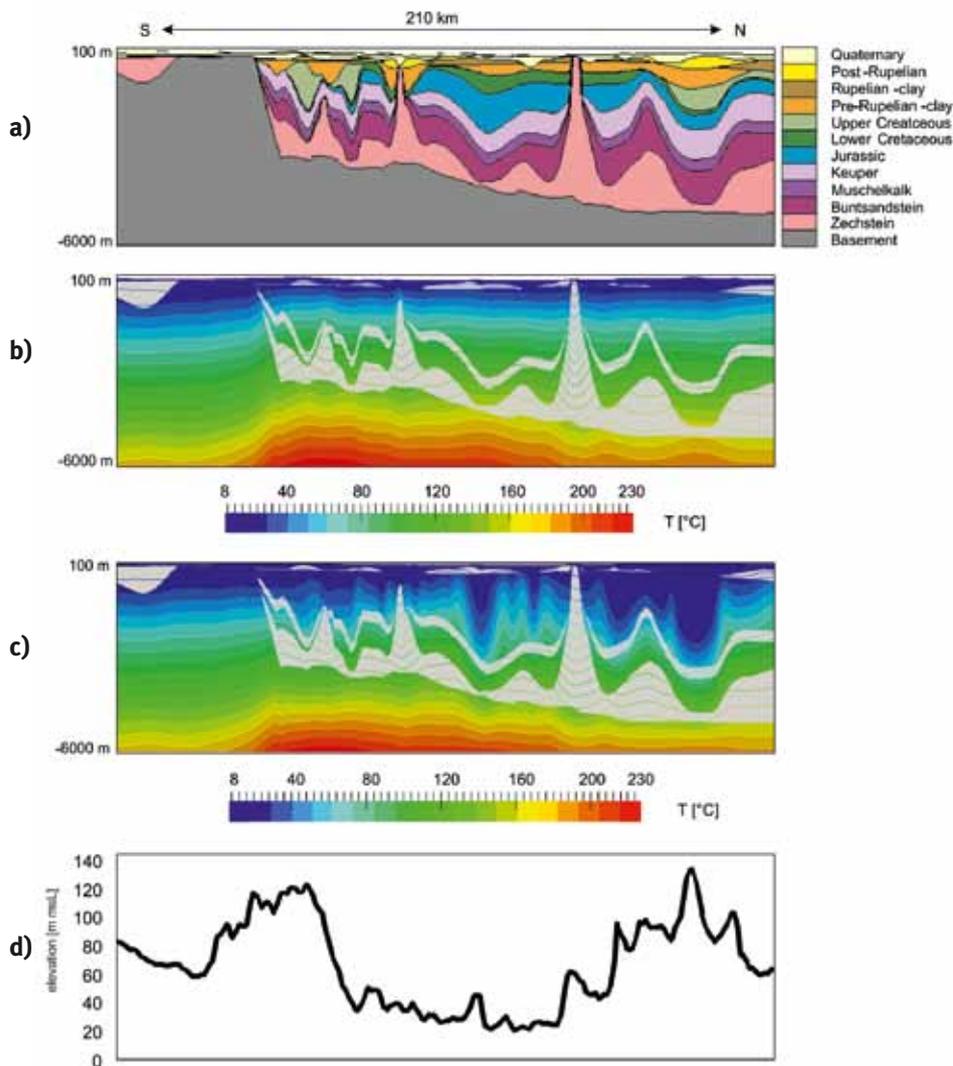


Abb. 1: a) Aufbau der sedimentären Schichten entlang eines N-S-gerichteten Profils durch ein 3D-Strukturmodell von Brandenburg (nach Noack et al., 2013). b) Modellerte Temperaturverteilung des stationären konduktiven thermischen Feldes entlang des Profils. c) Temperaturverteilung aufgrund konduktiven, advektiven und konvektiven Wärmetransports. Graue Bereiche heben die Geometrie des Permischen Zechsteinsalzes, des Mitteltriassischen Muschelkalks und des Tertiären Rupeltons hervor. d) Topographie entlang des Profils.

Fig. 1: a) N-S Cross-section showing the resolved sedimentary units as extracted from a 3D model of Brandenburg (after Noack et al., 2013). b) Modelled temperatures along the cross-section from steady state conductive calculations. c) Temperature distribution due to conductive, advective and convective heat transport. Grey areas highlight the geometry of the Permian Zechstein salt, the Middle Triassic Muschelkalk and Tertiary Rupelian-clay aquitards. d) Topography along profile.

Interessante Fallstudien bieten Sedimentbecken mit eingelagerten Salzschieben, da die thermische Leitfähigkeit des Salzes zwei bis drei Mal höher ist als die normaler Sedimente. Hier lieferten Modellierungsstudien nützliche Informationen zur Auswirkung des Salzes auf die umgebende Temperaturverteilung. Abb. 1b illustriert eine typische Temperaturverteilung entlang eines Querschnitts durch ein Sedimentbecken, welches eine Salzschiebe mit variabler Mächtigkeit und Geometrie enthält. Als Konsequenz der durch das Salz erzeugten Wärmerefraktion entsteht eine dipolförmige thermische Anomalie innerhalb und um den Salzkörper herum, die sehr asymmetrisch ausgebildet sein kann. Eine negative Anomalie bildet sich nahe der Basis der Salzstruktur aus, während an der Spitze des Salzdoms eine positive Anomalie entsteht. Diese Eigenschaft impliziert, dass die aus einem Becken abgeführte Wärmemenge sehr sensitiv bezüglich der Tiefe der Salzstruktur ist und als solche beispielsweise signifikant den Reifeprozess von Erdölmuttergesteinen in der Umgebung der Salzstruktur beeinflussen kann.

Extern gesteuerte Fluidmigration und Wärmeübertragung

Ein wichtiger Antriebsmechanismus für flachen sowie tiefen Grundwasserfluss im Untergrund sind Gradienten des hydraulischen Drucks, welche unter anderem durch das topographische Relief erzeugt werden (Garven, 1995). Das Fließen des Grundwassers geht mit dem Austausch von Wärme einher. Diese Form des Wärmetransports wird Advektion genannt und ist eine Form der Energieübertragung, in der Fluidbewegung durch externe Ursachen hervorgerufen wird, die zur Entstehung von hydraulischen Druckgradienten führen. Generell findet der Grundwasserfluss von Bereichen mit hohem Druck, den Grundwasserneubildungsgebieten, zu Gebieten mit niedrigem Druck, den Grundwasserabflussgebieten statt. Innerhalb eines durch Advektion bestimmten thermischen Regimes wird Wärme direkt durch das Grundwasser transportiert, was einen linearen Zusammenhang zwischen Fluidgeschwindigkeiten und thermischen Gradienten zur Folge hat. Daher kann

advektiver Wärmetransport durch die Fähigkeit des Systems, den Fluidfluss aufrecht zu erhalten, quantifiziert werden. Entsprechend ist der advective Wärmetransport von der hydraulischen Leitfähigkeit und der Permeabilität des Systems abhängig (Darcy-Gleichung, siehe Box). Beckenweite, thermische Auswirkungen des Grundwasserflusses sind häufig sehr subtil und schwierig nachzuverfolgen. Wenn geologische Schichten kontinuierlich und horizontal geschichtet sind und keine großen topographischen Unterschiede im Becken existieren, kann das Temperaturprofil bis zu einer beträchtlichen Tiefe nahezu linear verlaufen. Dagegen kann es in Sedimentbecken mit komplexer Geologie und Topographie starke Temperaturvariationen in derselben Tiefe geben. Intrakontinentale Becken, wie das Zentraleuropäische Beckensystem, das Michigan- und das Pariser Becken, die von Grundgebirge mit geringer Permeabilität umgeben sind und entlang des Beckens kein starkes topographisches Gefälle aufweisen, wurden lange Zeit als relativ frei von hydrodynamischer Umverteilung von Wärme betrachtet. Allerdings haben dreidimensionale Modellierungen des gekoppelten Fluid- und Wärmetransports, die in jüngster Zeit für kleinere Bereiche des Zentraleuropäischen Beckensystems durchgeführt wurden, gezeigt, dass die heutige thermische Struktur solcher Beckenkonfigurationen nur unter Berücksichtigung advektiver Komponenten (Abb. 1d) verstanden werden kann (Cacace et al., 2010; Kaiser et al., 2011; Noack et al., 2013).

Interner Antrieb von Fluidmigration und Wärmeübertragung

Fluidbewegungen im Untergrund werden auch aufgrund von Dichtegradienten im Fluid ausgelöst, die durch Temperatur- oder Salinitätsunterschiede verursacht werden, auch wenn diese in sedimentären Becken nur einen lokalen Stellenwert

zu haben scheinen. Diese Form der Wärmeübertragung wird als freie Konvektion bezeichnet. Freie thermische Konvektion ist eine Art des Wärmeaustauschs, bei dem Fluidbewegung nur durch Dichtegradienten innerhalb des Fluids aufgrund existierender Temperatur- und Druckgradienten erfolgt. Diese Art des sich selbsterhaltenden Fluidflusses resultiert in der Bildung einer sogenannten Konvektionszelle (Abb. 2). Die mathematische Formulierung der freien thermischen Konvektion basiert auf der nichtlinearen Kopplung der Erhaltungsgleichungen von Impuls, Masse und Energie.

Numerische Modelle zeigen, dass großräumige Konvektion ein wichtiger Wärmetransportmechanismus in sogenannten Hochenthalpie-Systemen ist, die sich in vulkanisch aktiven Gebieten befinden, wie z. B. im hydrothermalen System von Yellowstone oder Wyoming in den USA, entlang von Mittel-ozeanischen Rücken, oder in der Taupo-Vulkanzone (TVZ) auf der Nordinsel Neuseelands. Für das letztgenannte Gebiet konnten Kissling & Weir (2005) zeigen, dass das Auftreten der größten geothermischen Felder auf kalte Fluide meteorischen Ursprungs im Innern des Gebiets zurückzuführen ist, die als heiße Wässer am Rand der Region aufsteigen (Abb. 3). Weiterführende numerische Untersuchungen von Cacace & Kissling (2012) bestätigten, dass die Interaktion von tiefer Konvektion mit dem flachen Grundwassersystem die an heißen Quellen des Vulkangebiets beobachtete Variabilität von Flussraten und Wärme erklärt (Abb. 4).

Fluidfluss und Wärmeübertragung durch Störungen

Störungen können, abhängig von ihren hydraulischen Eigenschaften, die Erschließung von geothermischen Reservoiren, die Migration von Kohlenwasserstoffen oder die Ablagerung

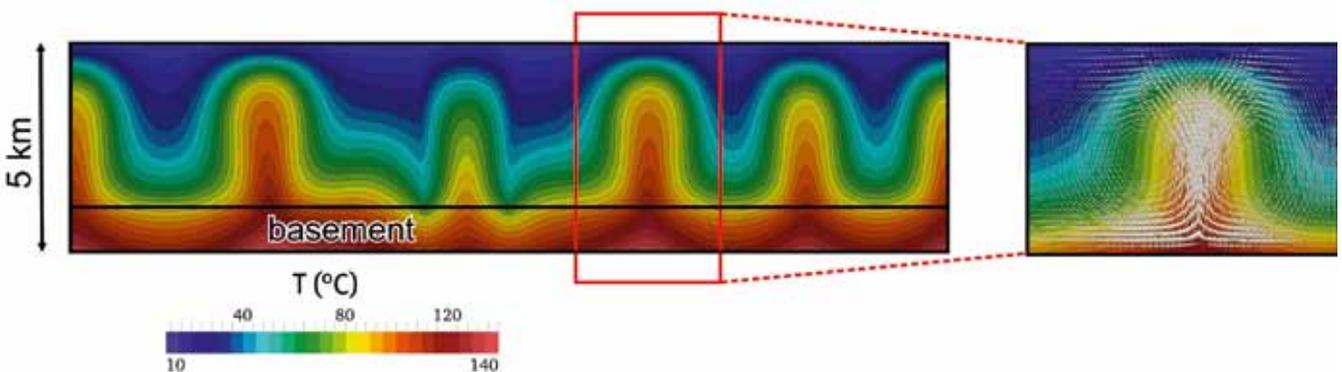


Abb. 2: Temperaturverteilung (°C) infolge freier thermischer Konvektion in einem homogenen Grundwasserleiter (Aquifer). Die schwarze Linie markiert die Basis des Aquifers, der von einer geringpermeablen Schicht unterlagert wird. Der vergrößerte Ausschnitt einer Konvektionszelle rechts zeigt schematisch die Vektoren des Grundwasserflusses im zentralen Bereich des Auftriebs.

Fig. 2: Temperature distribution (°C) due to free thermal convection in a homogeneous aquifer. The black line marks the base of the aquifer, which is bounded below by a low-permeability basement unit. The close up view on the central convection cell (right) schematically illustrates the groundwater flow vectors in the central upwelling region.

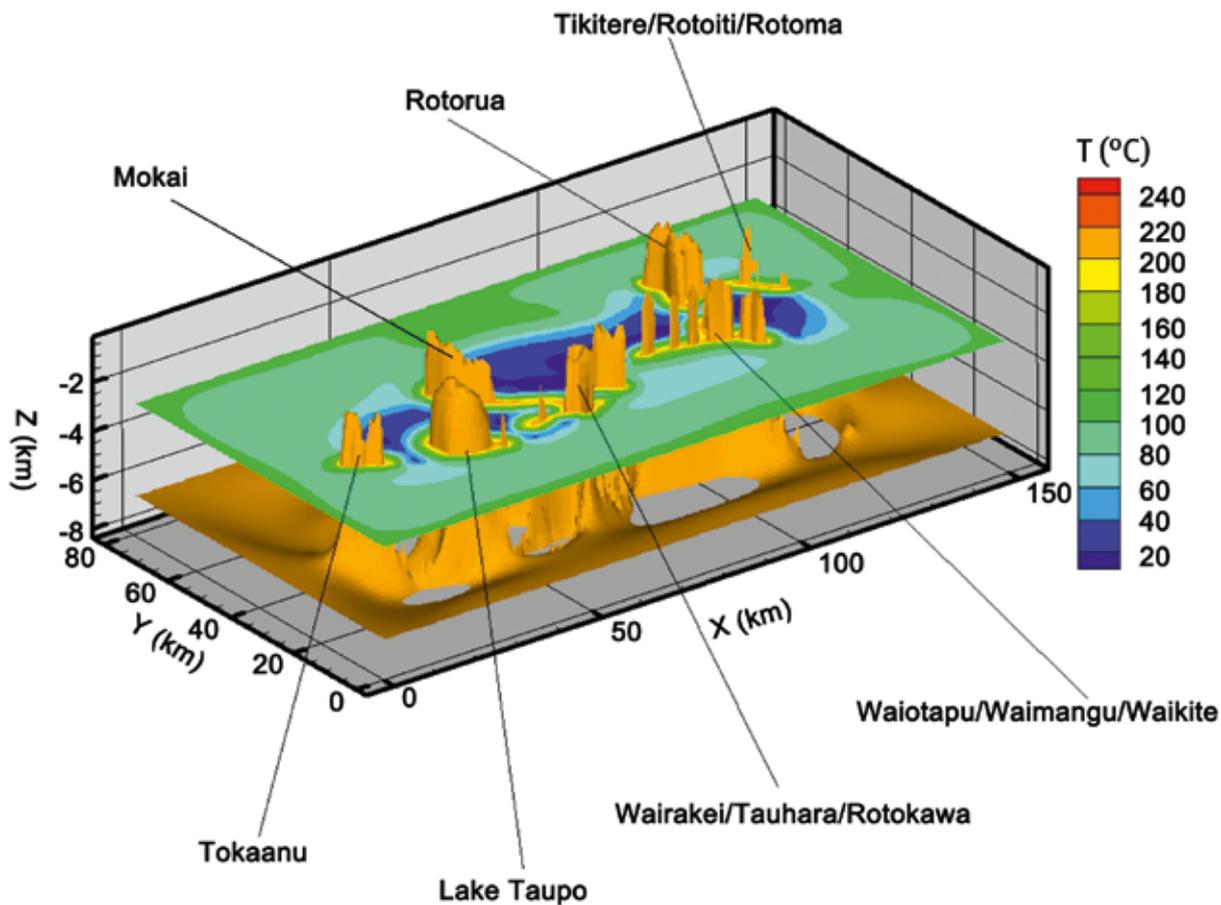


Abb. 3: Dreidimensionale Darstellung ($220\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Isotherme und Schnitt in 3 km Tiefe) der Temperaturverteilung des tiefen thermischen Felds der Taupo Volcanic Zone (TVZ) auf regionaler Skala (nach Kissling & Weir, 2005). Verschiedene Namen bezeichnen die wichtigsten geothermischen heißen Quellen.

Fig. 3: 3D view ($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ isosurface and plane at 3 km depth) of the regional-scale deep temperature distribution in the Taupo Volcanic Zone (TVZ), after Kissling & Weir, 2005). Different names identify major geothermal hot springs.

von Erzen kontrollieren. Trotz ihrer Bedeutung stellt das Verständnis wie hydraulische Eigenschaften und Dynamik von Fließ- und Transportprozessen in Störungszonen zusammenwirken, noch eine große Herausforderung für die Modellierung dar. Numerische Studien zum gekoppelten Fluid- und Wärmetransport, die große regionale Störungszonen im Nordostdeutschen Becken integrieren, konnten den Einfluss der Interaktion zwischen Störungzone und Gesteinsmatrix auf das Temperaturfeld und Fluidsystem quantifizieren (Cherubini et al., 2013) und zeigen, dass der hydrodynamische und thermische Einfluss von Störungen strukturell an ihren internen Permeabilitätsaufbau gekoppelt ist. Permeable Störungszonen, die den Fluidfluss fokussieren, haben einen großen Einfluss auf das thermische Feld innerhalb der Störungszonen und in dem sie umgebenden sedimentären Bereich (Abb. 5). Im Gegensatz dazu haben impermeable Störungszonen nur einen sehr geringen thermischen Effekt und beeinflussen das Fluidsystem lediglich im Störungsbereich und im unmittelbar angrenzenden Gestein. Störungszonen können also in Abhängigkeit von ihrer Durchlässigkeit und Geometrie in dynamischer Wechselwirkung mit der regionalen Grundwasserzirkulation stehen und Druck- und Temperatur-Anomalien bewirken, die weit in die umgebende poröse Gesteinsmatrix reichen.

Jüngste numerische Modellierungsstudien zur geothermischen Reservoirdynamik (Cacace et al., 2013) zeigen außerdem, wie existierende Störungszonen und induzierte Störungen die übergeordnete Permeabilitätsstruktur modifizieren und dadurch die Fließdynamik des Reservoirs verändern, (siehe Titelbild dieses Artikels, Seite 62). Dies hat einen großen Einfluss auf die Produktivität des Reservoirs, die abhängig von der Architektur des Störungsnetzwerks und dessen Lage zur Injektionsbohrung gesteigert oder reduziert werden kann.

Diese am GFZ erstellten Modelle charakterisieren die physikalischen und geodynamischen Prozesse, die mit der Entstehung und Entwicklung von Sedimentbecken in Zusammenhang stehen. Ein besseres Verständnis dieser Prozesse trägt dazu bei, die in Sedimentbecken enthaltenen fossilen und erneuerbaren Geo-Energie-Ressourcen nachhaltig zu erschließen. Daten- und modellgestützte Vorhersagen zur Verfügbarkeit von Ressourcen stellen somit wertvolle Entscheidungshilfen zu deren Nutzung dar und fördern die Entwicklung zur Energiewende.

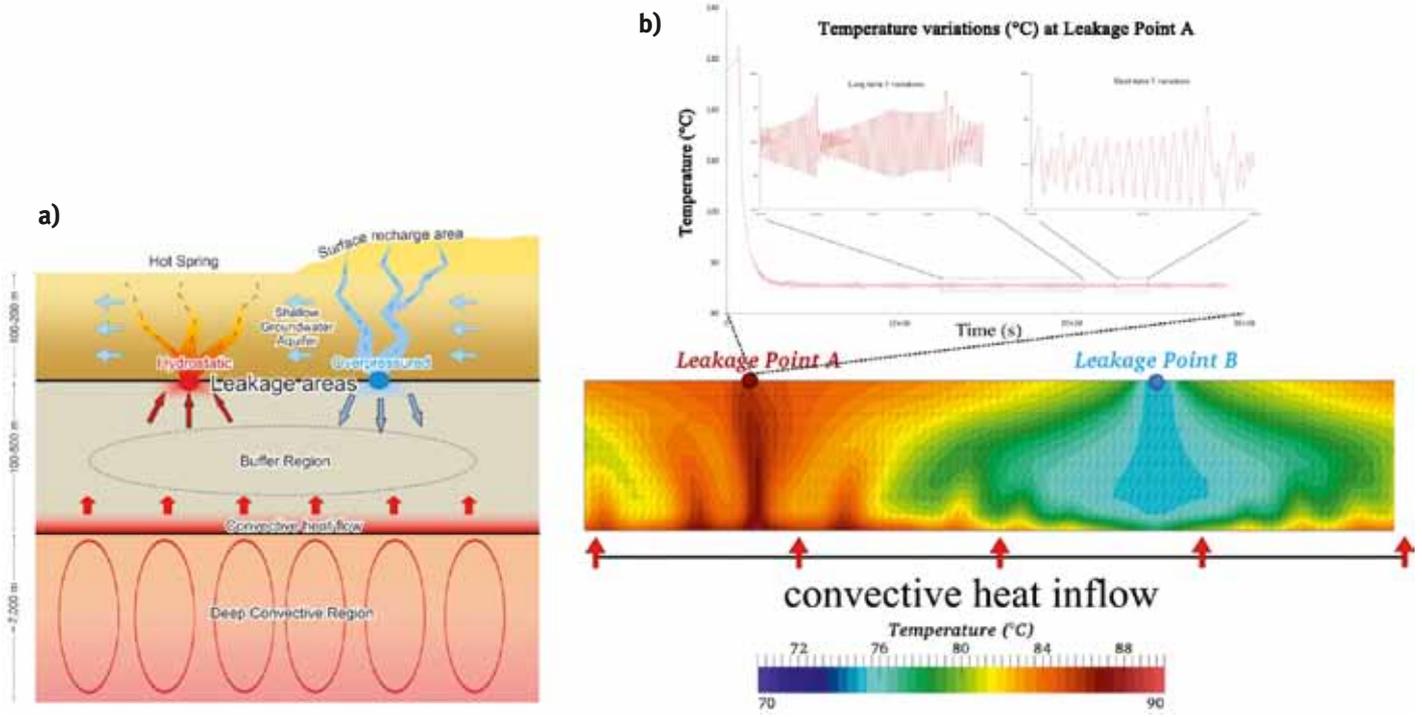


Abb. 4: a) Schematisches konzeptuelles Modell der oberflächennahen Quellen in der TVZ (nach Cacace & Kissling, 2012). b) Temperatureergebnisse (unten) und Temperaturschwankungen am Quellaustritt (oben) von numerischen Simulationen, die auf dem konzeptuellen Modell basieren

Fig. 4: a) Schematic diagram showing the conceptual surface spring model in the TVZ, after Cacace & Kissling (2012). b) Temperature results (bottom figure) and variation at outlet point (upper figure) from numerical simulations based on the conceptual model of geothermal spring behaviour

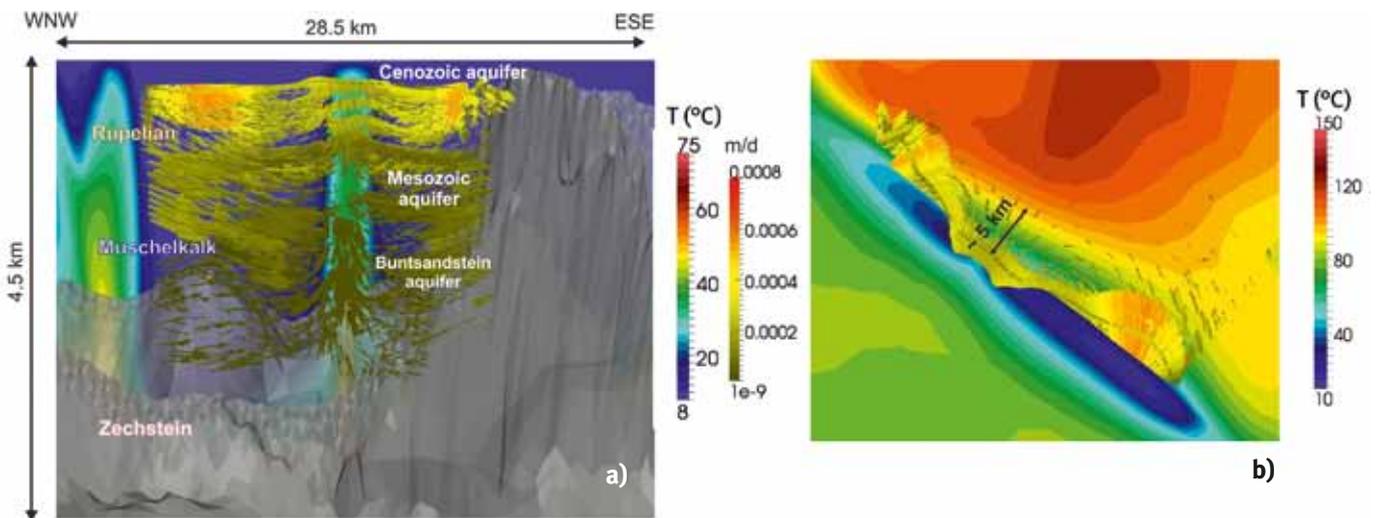


Abb. 5: a) Dreidimensionale Darstellung des Grundwasserströmungsfelds um eine permeable Störungszone mit der Temperaturverteilung im Hintergrund, die in ein 3D-Strukturmodell von Brandenburg integriert wurde (nach Cherubini et al. 2013). Die Geschwindigkeitsvektoren zeigen Grundwasserfluss von den umgebenden durchlässigen Aquifersedimenten hin zur permeablen Störungszone an. b) Die Draufsicht auf das Grundwasserströmungsfeld und die Temperaturverteilung in 3000 m Tiefe illustriert den Einflussbereich der Störungszone auf das regionale Stömungs- und Temperaturfeld.

Fig. 5: a) 3D view of the flow field around a permeable fault zone integrated in a regional-scale 3D model of Brandenburg (after Cherubini et al., 2013). The velocity vectors indicate flow from the surrounding aquifer sediments towards the permeable fault zone. b) Top view of the flow field on the temperature distribution at 3000 m depth illustrating the range of influence of the fault zone on the regional flow and thermal field.

Mathematische Formulierung – Grundgleichungen und deren Kopplung

Konduktiver Wärmetransport: $c\rho(\partial T/\partial t) = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + Q$

Eine mathematische Beschreibung von Grundwasserströmung- und Wärmetransport in geologischen Medien wird durch die Kombination der Erhaltungsgleichungen von Masse und Energie mit der Darcy-Impulsgleichung erhalten.

$$\mathbf{q}^f = -\frac{k}{\mu^f} \cdot (\nabla p + \rho_r \nabla z) \quad \text{Impulserhaltung (Darcy-Gesetz)}$$

$$\frac{\partial[\varepsilon\rho^f + (1-\varepsilon)\rho^s]}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^f \mathbf{q}^f) = \varepsilon Q^f + (1-\varepsilon)Q^s \quad \text{Massenbilanz}$$

$$\frac{\partial[\varepsilon\rho^f c^f + (1-\varepsilon)\rho^s c^s]T}{\partial t} = -\nabla \cdot [\rho^f c^f \mathbf{q}^f T] - \nabla \cdot \mathbf{j} + \varepsilon Q_e^f + (1-\varepsilon)Q_e^s \quad \text{Energiebilanz}$$

Kopplung der nichtlinearen Zustandsgleichungen durch Fluid-/Dichteschwankungen

Das System der oben angegebenen partiellen Differentialgleichungen wird durch Setzen einer Zustandsgleichung für die Dichte des Mediums in Bezug auf die primären Variablen (p und T) geschlossen, $\rho^f = \rho^f(p, T)$:

$$\rho^f = \rho_0^f [1 + \gamma(p - p_0) - \beta(T - T_0)]$$

\mathbf{q}^f = Darcy-Fluidgeschwindigkeit (Vektor) [m s^{-1}]

c^f = spezifische Wärmekapazität des Fluids [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

$\rho_r = \frac{\rho^f}{\rho_0^f} - 1$ = relative Dichte der Flüssigkeit [kg m^{-3}]

c^s = spezifische Wärmekapazität der Matrix [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

p = Porendruck [Pa]

$\mathbf{j} = \{[\varepsilon\lambda^f + (1-\varepsilon)\lambda^s] \mathbf{I} + c^f \rho^f \mathbf{D}^f\} \cdot \nabla T$ = nicht advektiver Energiefluss (Vektor) [W m^{-2}]

k = Permeabilität des porösen Mediums (Tensor) [m^2]

$\mathbf{D}^f = \alpha_T \|\mathbf{q}^f\| \mathbf{I} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{q}^f \otimes \mathbf{q}^f}{\|\mathbf{q}^f\|}$ = hydrodynamische Thermodispersion (Tensor) [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

μ^f = dynamische Viskosität des Fluids [Pa s]

z = vertikale Koordinate [m]

α_T = Querdispersivität [m]

∇ = Nabla-Operator (Vektor) [m^{-1}]

α_L = Längsdispersivität [m]

ε = Porosität [-]

ρ^s = Matrixdichte (Gestein) [kg m^{-3}]

Q = Wärmequelle (radioaktiver Zerfall) [W m^{-3}]

ρ^f = Dichte der Flüssigkeit [kg m^{-3}]

Q_e^f = Fluid-Energie (Wärme) der Senke/Quelle [W m^{-3}]

Q^f = Fluidmasse der Senke/Quelle [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

Q_e^s = Matrix-Energie (Wärme) der Senke/Quelle [W m^{-3}]

Q^s = Matrixmasse der Senke/Quelle [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

t = Zeit [s]

T = Temperatur [K]

γ = Fluidkompressibilität [Pa^{-1}]

λ^f = Wärmeleitfähigkeit des Fluids [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

β = Wärmeausdehnungskoeffizient [T^{-1}]

λ^s = Wärmeleitfähigkeit der Matrix [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

Literatur

- Cacace, M., Kaiser, B. O., Lewerenz, B., Scheck-Wenderoth, M. (2010): Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models. - *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 33-46, 10.1016/j.chemer.2010.05.017
- Cacace, M., Kissling, W. (2012): Hot and saline spring behaviour in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand) and in the Northwest German Basin (Germany), 34th International Geological Congress - IGC (Brisbane, Australia 2012).
- Cacace, M., Blöcher, G., Watanabe, N., Moeck, I., Börsing, N., Scheck-Wenderoth, M., Kolditz, O., Huenges, E. (2013 online first): Modelling of fractured carbonate reservoirs: outline of a novel technique via a case study from the Molasse Basin, southern Bavaria, Germany. - *Environmental Earth Sciences*, 10.1007/s12665-013-2402-3.
- Cherubini, Y., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M. (2013): The impact of fault zones on the 3D coupled fluid and heat transport for the area of Brandenburg (NE German Basin), (Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-10929, 2013), General Assembly European Geosciences Union (EGU) (Vienna, Austria 2013).
- Garven, G. (1995): Continental-scale groundwater flow and geologic processes. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 89-117, 10.1146/annurev.ea.23.050195.000513
- Kaiser, B. O., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M., Lewerenz, B. (2011): Characterization of main heat transport processes in the Northeast German Basin: Constraints from 3-D numerical models. - *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, C07011, 10.1029/2011GC003535.
- Kissling, W., Weir, G. J. (2005): The spatial distribution of the geothermal fields in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145, 1-2, 136-150, 10.1016/j.jvolgeores.2005.01.006
- Noack, V., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M. (2012): Sensitivity of 3D thermal models to the choice of boundary conditions and thermal properties: a case study for the area of Brandenburg (NE German Basin). - *Environmental Earth Sciences*, 67, 6, 1695-1711, 10.1007/s12665-012-1614-2.