

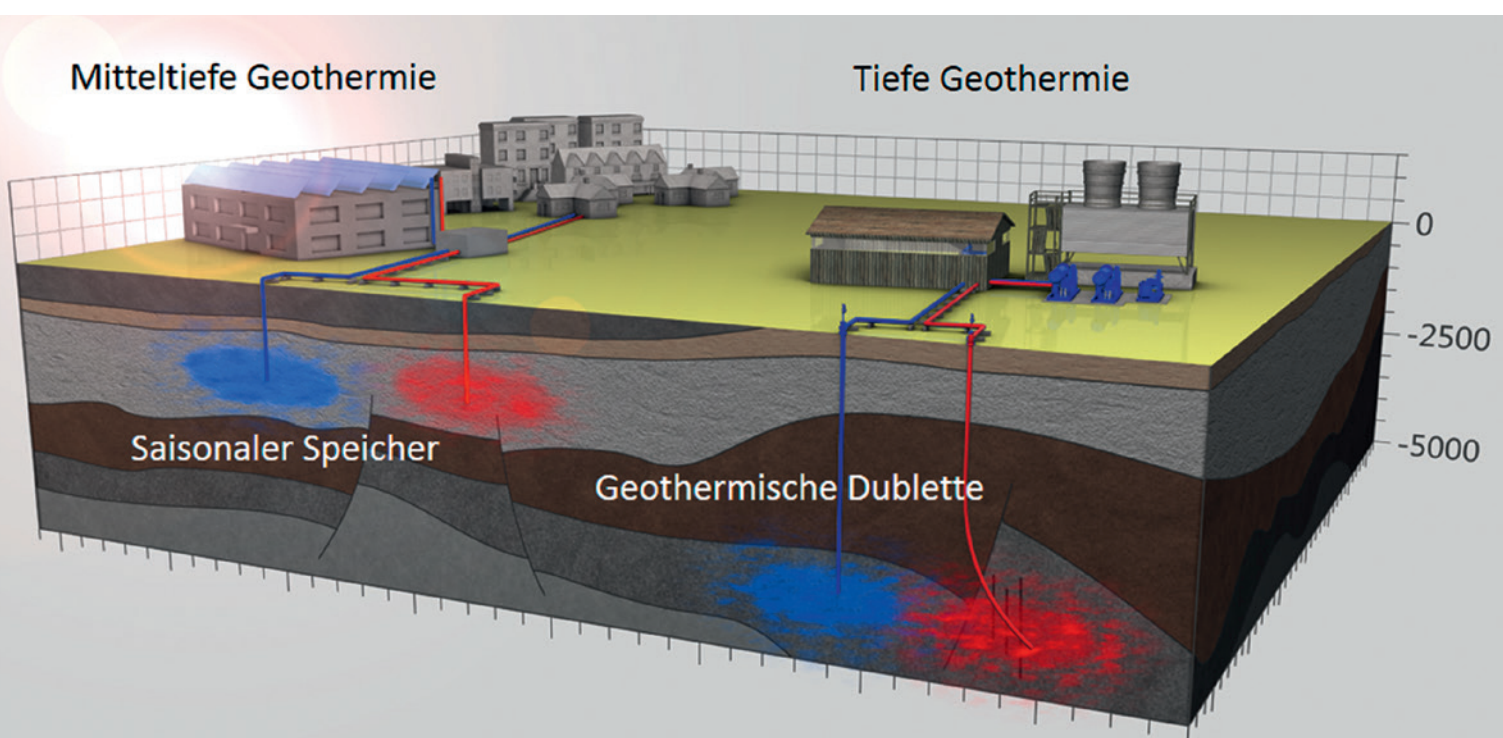
Geothermie in urbanen Räumen

Thermische Untergrundspeicherung und Tiefe Geothermie in Deutschland

Guido Blöcher, Thomas Reinsch, Simona Regenspurg, Jan Henniges, Maren Brehme, Ali Saadat, Stefan Kranz, Maximilian Frick, Angela Spalek, Ernst Huenges
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The demand for heat generation based on renewable energies has become increasingly important during the last decades, especially in urban areas. Geothermal energy, the heat stored in the upper part of the Earth's crust, offers a huge but largely untapped potential. Specifically, the use of near-surface geothermal energy increased significantly in Germany. Medium and deep geothermal energy systems provide a wide range of applications for environmentally friendly, large scale heat provision. Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems, for example, offer great potential for heat supply in major cities (Fig. below, left). A case study, led by GFZ, investigated the potential of an ATES system in the centre of Berlin. The research well Gt BCh 1/2015 on the campus of the Technical University of Berlin was established, geologically characterized, and hydraulically tested.

Deep geothermal systems play another important role within the future energy supply. In hydrothermal systems, direct use or conversion of extracted heat to electricity can be obtained at economically feasible costs (Fig. below, right). These resources, however, are limited in most countries due to local geological conditions. Nonetheless, sufficient heat in place is encountered in other geological settings such as the so called "petrothermal" systems, which could cover the heat demand for centuries. However, the initial productivity of these systems is often too low for an economically viable utilization. Further research and demonstrators are needed to improve the efficiency and sustainability of geothermal energy systems. Groß Schönebeck, the geothermal research site of the GFZ, has been established as a research platform for technology development and process understanding in order to achieve a broader spectrum of technical solutions for using this domestic form of energy.



Der deutsche Wärmemarkt, der mehr als die Hälfte des Gesamtenergiebedarfs ausmacht, wird aktuell fast ausschließlich über fossile Energieträger bedient. Um die Treibhausgasemissionen weltweit bis 2050 um 40 % bis 70 % im Vergleich zum Jahr 2010 zu reduzieren (Vereinbarung des G7-Gipfels von 2015), müssen verlustreiche Energietransportwege vermieden werden. Die Nutzung innerstädtischer Wärmequellen, wie z. B. Erdwärme (Geothermie), wird daher zukünftig eine große Rolle spielen. Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ werden Konzepte zur innerstädtischen Erkundung und Erschließung tiefer geothermischer Quellen bzw. potenzieller Räume zur saisonalen Speicherung thermischer Energie entwickelt.

Der geothermisch nutzbare Untergrund teilt sich in drei Bereiche: In den obersten Sedimentschichten werden Süß- bzw. Trinkwasserhorizonte angetroffen, die bis zu einer Temperatur von etwa 20 °C der oberflächennahen Geothermie zugeordnet werden. Ihre Nutzung für die Heizwärme- und Warmwasserversorgung ist Stand der Technik und in Deutschland weit verbreitet. Darunter folgen wasserführende Schichten mit Temperaturen bis 60 °C, die zur mitteltiefen Geothermie gehören. Über einen Thermalwasserkreislauf zwischen zwei Bohrungen kann ihnen Wärme entzogen und für die direkte Wärmebereitstellung genutzt werden. Die hier vorherrschenden Temperaturen können mit Hilfe von Wärmepumpen auf die erforderlichen Nutzungstemperaturen für Fernwärme (100 °C bis 110 °C) oder Niedertemperaturnetze (70 °C bis 90 °C) erhöht werden. Großes Potenzial bietet der mitteltiefe Untergrund auch für die saisonale Speicherung thermischer Energie. In porösen, tiefen Grundwasserschichten, sogenannten Aquiferen, kann Wärme vorübergehend gespeichert und bei Bedarf als Heizwärme wieder entnommen werden. Die tiefe Geothermie (ab etwa 60 °C) kann für große Wärmenetze oder für die Stromerzeugung genutzt werden. Unterschieden werden die hydrothermale Geothermie, die die Wärme über das im Untergrund vorhandene Thermalwasser erschließt und die petrothermale Geothermie, welche die in gering durchlässigen Tiefengesteinen gespeicherte Energie durch Injektion von Wasser in künstlich erzeugte Gesteinsrisse nutzt. Beide Teilgebiete zur Nutzung der tiefen Geothermie erfordern in der Regel mindestens eine Förder- und eine Schluckbohrung (geothermische Dublette), die

bedarfsgerecht Energie mit ausreichender Temperatur aus einer tiefen Erdwärmelagerstätte erschließen.

Mitteltiefe Geothermie

Saisonale Wärmespeicherung in Aquiferen

Aquiferspeicher bieten aufgrund ihrer großen Kapazität und Effizienz im saisonalen Betrieb (Abb. 1) bedarfsgerechte Lösungen für Stadtquartiere in Metropolregionen. Energieversorgungssysteme mit Aquiferspeichern bestehen aus verschiedenen Teilsystemen: dem Untergrund, dem anlagentechnischen Teil und den Nutzern, welche die Energiebedarfsstruktur bestimmen.

Die Machbarkeit der Energieversorgung unter Einbeziehung von Aquiferspeichern wird in Deutschland bereits an drei Standorten gezeigt (Berlin, Rostock, Neubrandenburg). Zum Beispiel erfolgt die Versorgung der Parlamentsbauten in Berlin mit Strom, Wärme und Kälte mit einem in seiner Art einzigartigen System. Dazu wurden saisonale Wärme- und Kältespeicher in Aquiferen unterhalb des Platzes der Republik vor dem Reichstagsgebäude eingerichtet und in Betrieb genommen. Das GFZ war federführend an dem Monitoringprojekt „Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen“ beteiligt. Trotz des großen Potenzials und Bedarfs steht jedoch eine breite Nutzung noch aus. Vernetzte Projekte des GFZ mit Universitäten (z. B. Technische Universität Berlin, TUB), Standortbetreibern (z. B. Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Adlershof, WISTA) sowie Energieversorgern (z. B. GASAG) streben daher die Entwicklung von Demonstrationsprojekten im Raum Berlin an.

In den Stadtgebieten von Berlin und Potsdam eignen sich mehrere geologische Einheiten zwischen 200 m und 600 m Tiefe als potenzielle Speicher für ein ATES-System (Aquifer Thermal Energy Storage). Dazu gehören das Hettang (unterer Jura), die Exter-Formation (oberer Keuper), die Stuttgart-Formation (mittlerer Keuper) und der Schaumkalk (unterer Muschelkalk). Jeder potenzielle ATES-Standort erfordert ein standortangepasstes Speicherdesign, das mehrere Faktoren berücksichtigen muss. Zum einen ist die Beschaffenheit des Untergrunds (geologische Struktur, Geo- und Fluidchemie, Mikrobiologie, hydraulische und thermische Speichereigenschaften) bedeutend. Zum anderen müssen die aus der Einbindung des Speichers entstehenden Einflussfaktoren beachtet werden (ein- und ausgespeicherte Energiemengen, transportierte Fluidvolumina, Temperaturen sowie zeitliches Verhalten). Für eine effiziente, nachhaltige Nutzung sind vorhandene Methoden und Planungsansätze weiterzuentwickeln und neue methodische Ansätze zu testen.

Fallstudie Campus der TUB

Mit diesem Fokus führten das GFZ, die Universität der Künste (UdK) und die TUB im Forschungsprojekt ATES Berlin eine Fallstudie für ein

Links: Saisonale Speicherung von Wärme (links) und Geothermische Dublette (rechts)

Left: Seasonal heat storage (left) and a geothermal doublet system (right)



Kontakt: G. Blöcher
(guido.bloecher@gfz-potsdam.de)

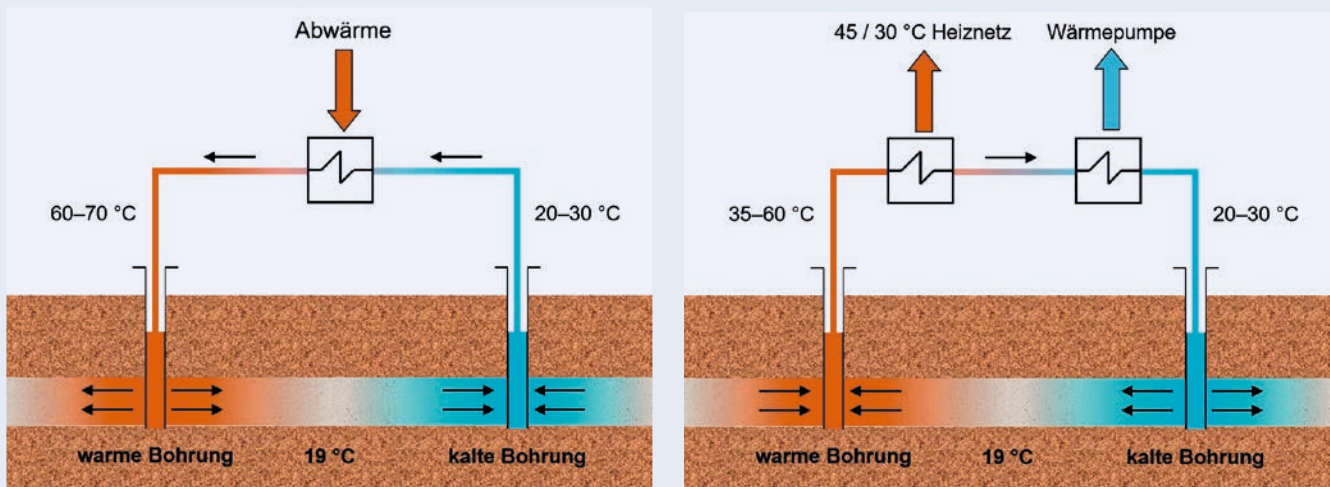


Abb. 1: Prinzip der saisonalen Wärmespeicherung in Aquiferen. Das im Sommer geförderte Grundwasser (links) wird durch überschüssige Wärme erwärmt. Es wird dann in den Aquifer zurückgepumpt und dort gespeichert. Im Winter (rechts) wird die Fließrichtung umgekehrt, so dass das erwärmte Grundwasser gefördert wird und zum Heizen verwendet werden kann (oft in Kombination mit einer Wärmepumpe). (Abb.: S. Kranz, GFZ)

Fig. 1: Concept of seasonal heat storage in aquifers. The groundwater extracted in summer (left) is heated by means of excess heat. It is then pumped back into the aquifer and stored there. In winter (right), the flow direction is reversed so that the heated groundwater is pumped and can be used for heating (often in combination with a heat pump).

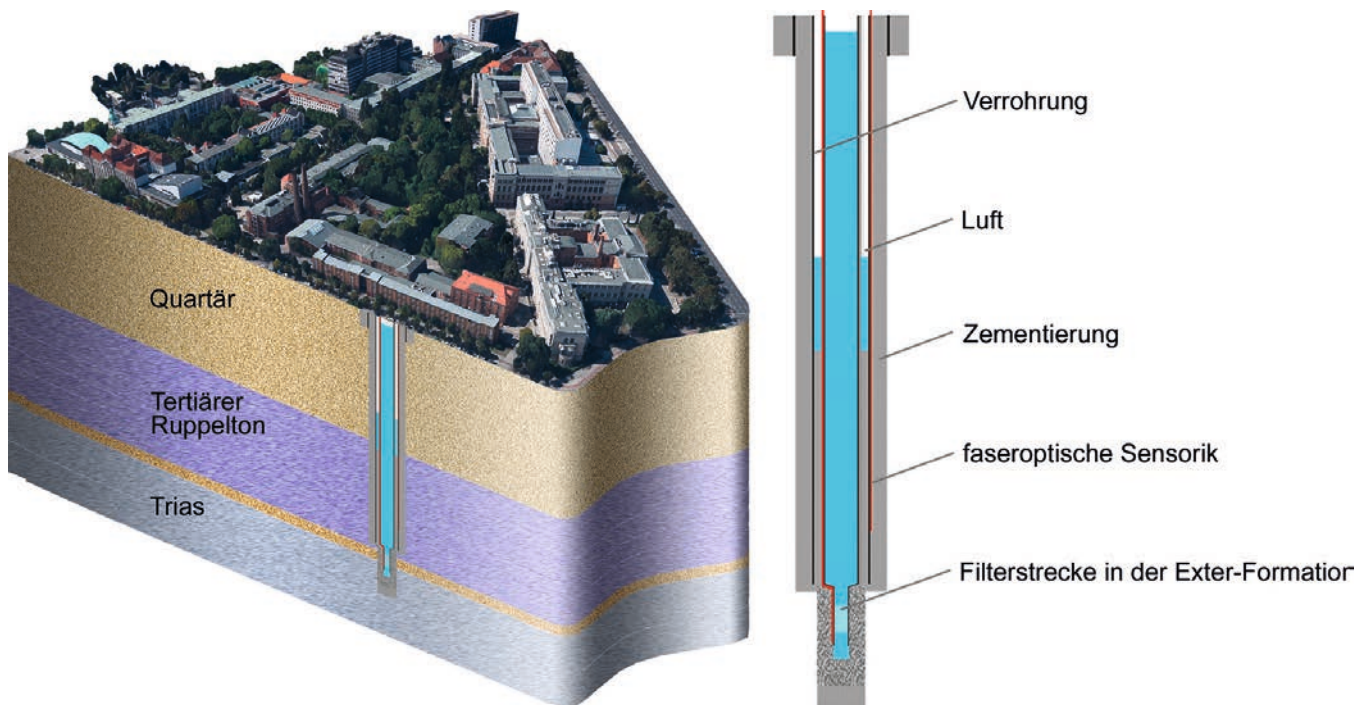


Abb. 2: ATES-Forschungsbohrung auf dem Campus der Technischen Universität Berlin (Quelle: G. Blöcher, GFZ, unter Verwendung von Google Earth)

Fig. 2: ATES research drill site at the campus of the Technical University Berlin

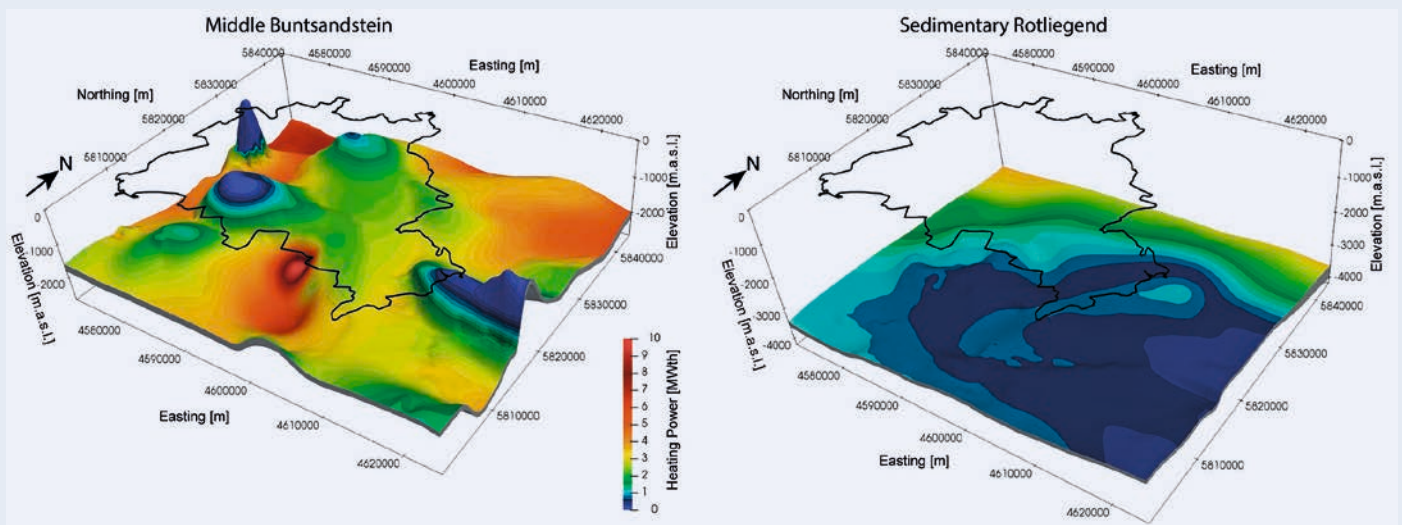


Abb. 3: Voraussichtliche Heizleistung einer virtuellen geothermischen Dublette für zwei Zielhorizonte unter Berlin. Links: Mittlerer Buntsandstein, rechts: Sedimentäres Rotliegend (Abb.: M. Frick, GFZ)

Fig. 3: Predicted Heating Power of a virtual geothermal doublet for two target horizons below Berlin. Left: Middle Buntsandstein, right: Sedimentary Rotliegend

ATES-System im Zentrum Berlins durch (Regensburg et al., 2018). Am Beispiel des Campus der TUB, mit seinem Mix aus altem und modernem Gebäudebestand und seiner vielseitigen Bedarfsstruktur aus Laboren, Büros und Lehrgebäuden, wurde ein energetisch und ökonomisch effizientes Energiekonzept entwickelt, für das u. a. die Einbindung saisonaler Unterspeicher in die Wärmeversorgung untersucht wurde. Im Rahmen des Projekts wurde eine 560 m tiefe Forschungsbohrung auf dem Universitätscampus Charlottenburg abgeteuft, die die geologische Datenbasis für die methodische Studie lieferte.

An der Bohrung (Abb. 2) wurden Tests und Temperaturmessungen durchgeführt, die Informationen über die physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters lieferten. Dabei zeigte sich, dass die Exter-Formation, obwohl nur 4 m mächtig (im Bereich zwischen 220 m bis 230 m Tiefe), generell als potenzieller Speicher genutzt werden kann.

Neben der geologischen Charakterisierung des Aquifers wurde durch die Untersuchungen ein Methodenkatalog zur hydraulischen, chemischen und thermischen Bewertung potenzieller ATES-Standorte entwickelt. Er soll im Rahmen zukünftiger Projekte in Berlin und an anderen Standorten in Deutschland verifiziert und weiterentwickelt werden.

Hydrothermale Geothermie in Berlin

Auch die Nutzung heißer Formationsfluide steht im Fokus der Forschung am GFZ. Anhand von Modellen des Untergrunds werden die

geothermischen Potenziale in mitteltiefen bis tiefen Reservoiren abgeschätzt. Durch die Kombination der Temperaturverteilungen mit den physikalischen Eigenschaften der Reservoirs können virtuelle geothermische Kraftwerke simuliert werden, die im Untergrund an geothermische Dubletten angeschlossen sind (Kastner et al., 2015). Für den Raum Berlin kann für den mittleren Buntsandstein (mitteltiefe Geothermie) bei einer Temperatur von 20 bis 100 °C und einer Tiefe von 200 m bis 2600 m unter Geländeoberkante ein durchschnittlicher Massenstrom von 35 kg/s und eine Wärmeleistung von bis zu 10 MW_{th} (im Mittel 3,4 MW_{th}) abgeschätzt werden (Abb. 3).

Tiefe Geothermie

Für das sedimentäre Rotliegend ergibt sich bei einem Massenstrom von 2 bis 14 kg/s, einer Temperatur von 95 bis 135 °C und einer Tiefe von 3000 m bis 4500 m unter Geländeoberkante eine Wärmeleistung von bis zu 4 MW_{th}. Dabei handelt es sich um hydrothermale Wärmeleistung. Durch spezielle Maßnahmen, wie die hydraulische Stimulation, könnten für das sedimentäre Rotliegend noch höhere Wärmeleistungen erreicht werden.

Forschungsstandort Groß Schönebeck

Das GFZ hat für die Entwicklung von Technologien zur Nutzung geothermischer Energieressourcen aus einem tiefen Sedimentbecken im Norddeutschen Becken ein wissenschaftliches Untertagelabor im brandenburgischen Groß Schönebeck aufgebaut (Abb. 4). Es ermöglicht experimentelle Studien unter natürlichen Bedingungen, die Aufschluss über die geologischen und



Abb. 4: Infrastruktur am Standort Groß Schönebeck: 1–Injektionsbohrung, 2–Technikhalle, 3–Kühlturm, 4–Binärkraftwerkmodule und 5–Förderbohrung (Foto: GFZ)

Fig. 4: Infrastructure at the Groß Schönebeck site: 1–injection well, 2–technical facility, 3–cooling tower, 4–binary power plant modules, and 5–production well

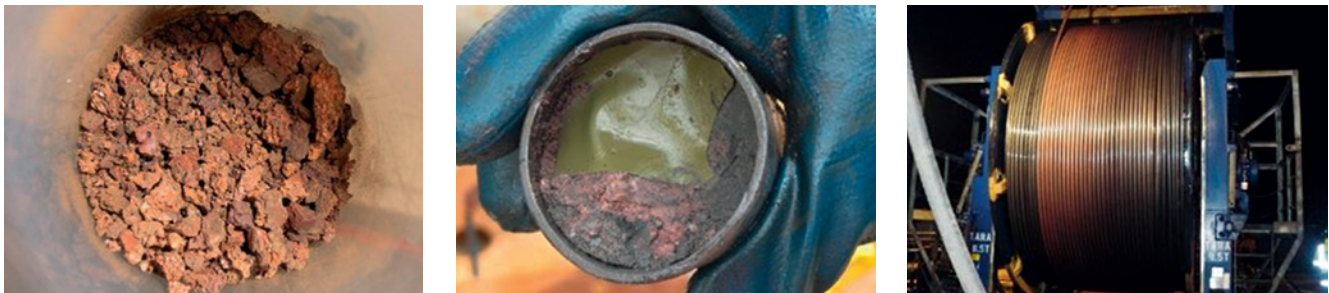


Abb. 5: Ausfällungen und Sedimentation von Mineralien im Bohrloch (links); abgelöste und sedimentierte Innenbeschichtung (Mitte); Coiled-Tubing-Einheit mit Kupferschicht nach Einfahrt in den Reservoirbereich der Produktionsbohrung (rechts) (Fotos links und Mitte: S. Regenspurig, GFZ; rechts: T. Reinsch, GFZ)

Fig. 5: Precipitation and sedimentation of minerals in the borehole (left); detached and sedimented wellbore coating (middle); Coiled tubing unit with coating of copper after entering the reservoir area (right)

hydrogeologischen Verhältnisse in der Tiefe geben. Moderne Labor- und Messtechnik sowie tomographische Verfahren der geophysikalischen Tiefensondierung kommen zum Einsatz. Da Niedrigtemperatur-Reservoire den größten Teil des weltweiten tiefeingeothermischen Potenzials darstellen, können die Methoden auf andere Standorte übertragen werden.

In Groß Schönebeck erschließen zwei Bohrungen die Sediment- und Vulkanitschichten des unteren Perm (Rotliegend). Das geothermische Reservoir kann in zwei geologische Einheiten unterteilt werden: siliziklastische Gesteine (Oberes Rotliegend), die von Konglomeraten über feinkörnige Sandsteine, Schluff- und Siltsteine (Elbe-Untergruppe) in der Korngröße variieren, und Vulkanitgesteine (Unteres Rotliegend bzw. Permokarbon). Die Zielformation befindet sich in einer Tiefe von 3830 bis 4250 m bei Temperaturen um 150 °C (Zimmermann *et al.*, 2011).

Die Injektionsbohrung ist eine nichtfündige Gasexplorationsbohrung (EGrSk 3/90) mit einer Tiefe von 4309 m. Die Förderbohrung wurde im Jahr 2006 als Geothermiebohrung (Gt GrSk4/05) abgeteuft und erreicht eine Endteufe von 4404 m mit einer maximalen Ablenkung von 48° im Bohrlochtieftsten. In diesem Bereich sind die Bohrlöcher etwa 475 m voneinander entfernt.

In den Bohrungen wurden Experimentserien zur Reservoircharakterisierung sowie hydraulische Stimulationsexperimente zur Verbesserung der Thermalwasserproduktivität durchgeführt. Anhand von Bohrlochmessungen und 3D-Modellierungen wurde ein Abbild des geologischen Untergrunds erstellt. Zwischen 2012 und 2014 wurden Kommunikationsexperimente zwischen den Bohrungen durchgeführt, um die Nachhaltigkeit der Thermalwasserproduktivität zu testen. Während des Testzeitraums wurde an der Produktionsbohrung eine nichtlineare Verringerung der Produktivität beobachtet (Blöcher *et al.*, 2016). Die Injektivität an der Injektionsbohrung blieb nahezu konstant.

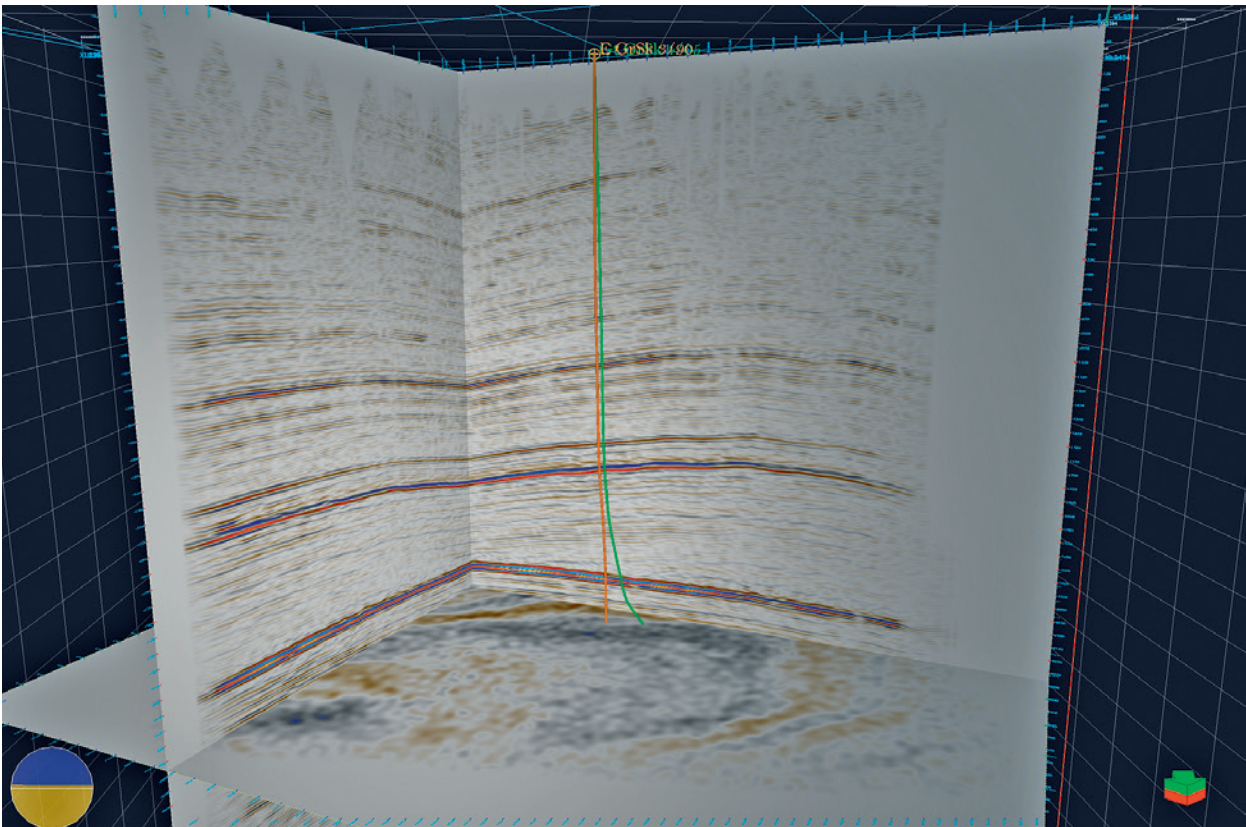


Abb. 6: Vertikal- und Horizontalschnitte durch das migrierte Datenvolumen und der Verlauf der beiden GFZ-Forschungsbohrungen E GrSk3/90 (orange) und Gt GrSk4/05 (grün) (Abb.: B. Norden, GFZ)

Fig. 6: Vertical and horizontal sections through the migrated data volume and the two GFZ research boreholes E GrSk3/90 (orange) and Gt GrSk4/05 (green) are shown

Es wurden fünf Prozesse identifiziert (Abb. 5), die die nachhaltige Thermalwasserzirkulation verhinderten: (1) Mineralische Ausfällungen im Bohrloch, (2) die elektrochemische Reaktion und Ausfällungen im Bohrlochnahbereich, (3) die Nachhaltigkeit induzierter hydraulischer Risse, (4) die Zwei-Phasen-Strömung im Reservoir sowie (5) eine mögliche Reservoir-Kompartimentierung.

Um diese Prozesse zu quantifizieren, wurden Untersuchungen im Feld (einschließlich einer 3D-seismischen Messkampagne), im Labormaßstab sowie numerische Untersuchungen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen werden Lösungen entwickelt, um den beobachteten Hindernissen in zukünftigen Projekten wirksam begegnen zu können.

3D-seismische Messkampagne

Im Februar/März 2017 wurde im Umfeld von Groß Schönebeck eine hochauflösende 3D-reflexionsseismische Vermessung durchgeführt. Vier je 22 Tonnen schwere Vibroseis-Fahrzeuge erzeugten an 1830 verschiedenen Quellpositionen seismische Wellen, die an 3240 in der Fläche verteilten Empfangspositionen registriert wurden. Es konnte ein seismisches Datenvolumen gewonnen

werden, dessen horizontale Abtastung 25 m x 25 m beträgt. Die Erkundungsdaten geben Aufschluss über die Lage und Struktur der Gesteinsschichten bis in eine Tiefe von rund 4 km und ermöglichen eine noch detailliertere geologische Charakterisierung des Standorts. Neue Erkenntnisse zur Tiefenlage der Vulkanite und zur Option ihrer Nutzung als Hot-Dry-Rock-System ermöglichen eine qualitative Weiterentwicklung von Erschließungskonzepten für das Norddeutsche Becken.

Im Rahmen der 3D-seismischen Messkampagne wurden auch VSP (Vertical Seismic Profiling)-Messungen in den Bohrungen durchgeführt. An 61 flächig um die Bohrungen herum verteilten Quellpunkten regten vier je 22 Tonnen schwere Vibrationsfahrzeuge seismische Wellen an. Die Messdaten wurden mit dem neuartigen Verfahren der ortsverteilten akustischen Messungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) in den Bohrlöchern aufgezeichnet. Dabei kam das hybride Bohrlochmesssystem des GFZ zum Einsatz, mit dem sowohl faseroptische Sensorik als auch elektrische Bohrlochsonden parallel betrieben werden können. Die DAS-Methode hat Messungen unter den Temperaturbedingungen von bis zu 150 °C in über 4 km Tiefe ermöglicht und zu einer

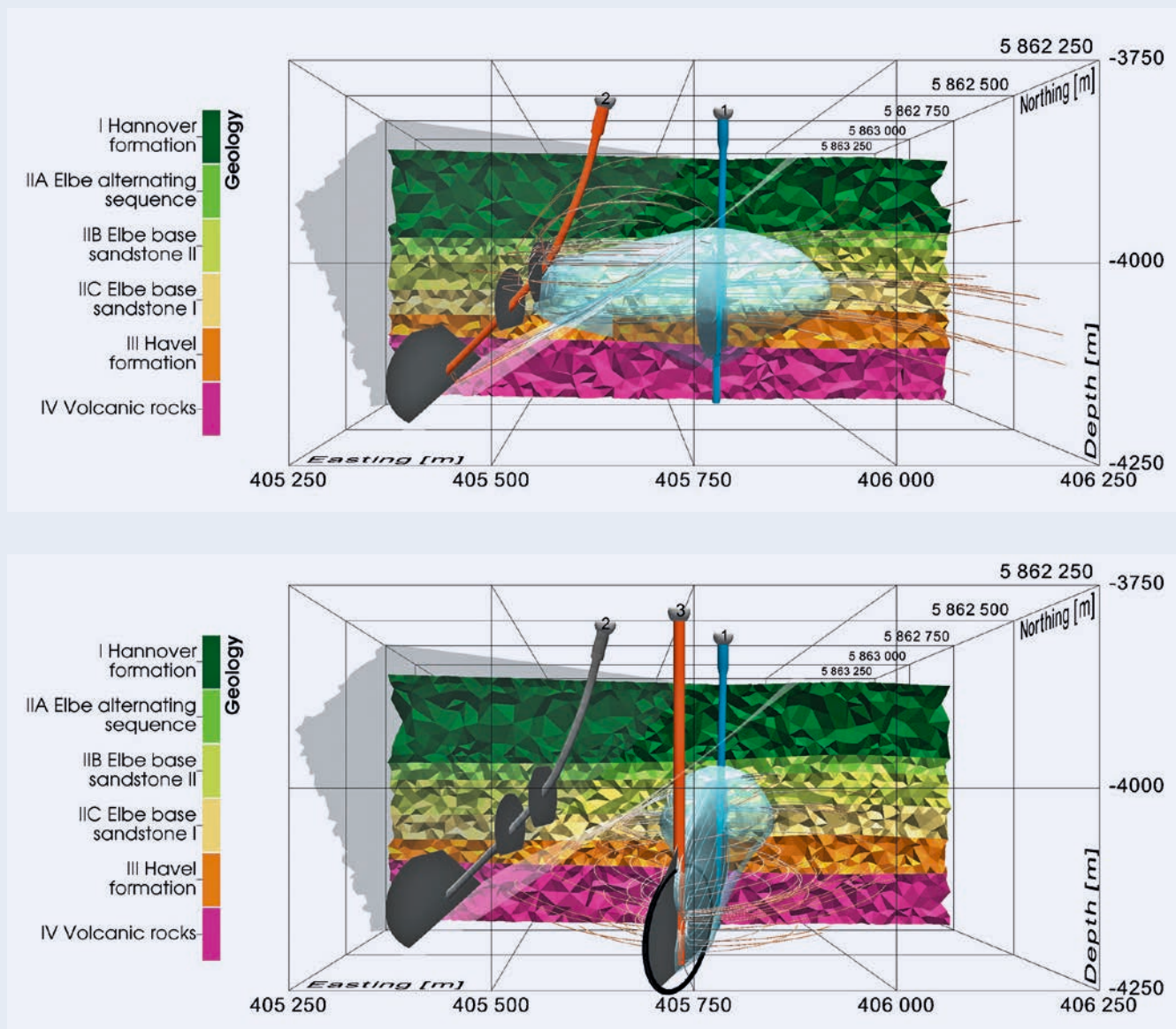


Abb. 7: Bei dem aktuellen Erschließungskonzept in Groß Schönebeck (oben) fungiert das Reservoirgestein als Wasserwegsamkeit; bei dem neuen Erschließungskonzept (unten) übernehmen diese Aufgabe künstlich erzeugte Risse. (Abb.: G. Blöcher, GFZ)

Fig. 7: Previous concept of exploitation in Groß Schönebeck (top) in which the reservoir rocks act as flow media and the new concept of exploitation (bottom) in which hydraulically induced fractures act as preferential flow paths.

deutlichen Zeit- und Kostenersparnis gegenüber der Verwendung konventioneller Geophone geführt. Anhand der Messdaten wurden genaue Zeit-Tiefen- und Geschwindigkeitsprofile ermittelt, die in die Auswertung der 3D-seismischen Erkundung einbezogen werden. Die seismischen Daten erlauben eine deutlich verbesserte Interpretation von Strukturen im dreidimensionalen Raum (Abb. 6).

Vom matrixdominierten zum rissdominierten Erschließungskonzept

Die Erkenntnisse fließen in eine alternative Erschließungsstrategie für den Standort Groß Schönebeck ein, mit dem Ziel, eine nachhaltige Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen im Norddeutschen Becken zu demonstrieren. Bei dem bislang verfolgten Erschließungskonzept (Abb. 7 oben) fließt das geothermische Fluid durch die Gesteinsmatrix. Wie oben dargestellt, ergaben die Feldmessungen während der Kommunikationsexperimente, dass dieses Konzept nicht zu einer wirtschaftlichen Nutzung führt. Ein alternatives Erschließungskonzept sieht vor, das geothermische Fluid durch hydraulisch induzierte Risse strömen zu lassen (Abb. 7 unten). Für dieses „rissdominierte Erschließungskonzept“ werden die vulkanischen Gesteine des unteren Rotliegend untersucht.

Ausblick

Geothermische Wärmequellen und saisonale thermische Speicher können zu einem stabilen und flexiblen Strom-Wärme-System und zu einer treibhausgasarmen Wärmebereitstellung beitragen. Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse aus dem Aquiferspeicher-Projekt Berlin erweitern die methodischen und technologischen Grundlagen für die effiziente Planung und Einbindung von Aquiferspeichern in Energieversorgungssysteme. Sie sind auch für andere Anwendungen, die die Charakterisierung und die Nutzung des unterirdischen Raums als Speicher (thermisch oder stofflich) zum Ziel haben, von Bedeutung.

Mit dem Ziel, eine nachhaltige Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen im Norddeutschen Becken zu demonstrieren, soll am Forschungsstandort Groß Schönebeck ein rissdominiertes Erschließungskonzept umgesetzt werden. Dieses Konzept muss als Teil eines Multirissystems betrachtet werden, bei dem die beiden Bohrungen durch mehrere Rissysteme miteinander verbunden werden. In dieser Umsetzung können Umwelteinflüsse minimiert werden. Das Konzept kann auf andere Standorte im Norddeutschen Becken, wie z. B. Berlin, übertragen werden.

Das Forschungsvorhaben ATES Berlin und die Forschungsprojekte am Geothermieforschungsstandort Groß Schönebeck wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Literatur

- Blöcher, G., Cacace, M., Reinsch, T., Watanabe, N. (2015): Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North German Basin. - *Computers and Geosciences*, 82, pp. 120–129. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.005>
- Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G., Huenges, E. (2016): Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. - *Geothermics*, 63, pp. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.008>
- Kastner, O., Sippel, J., Zimmermann, G. (2015): Regional-scale assessment of hydrothermal heat plant capacities fed from deep sedimentary aquifers in Berlin/Germany. - *Geothermics*, 53, pp. 353–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.06.002>
- Regenspurg, S., Alawi, M., Blöcher, G., Börger, M., Kranz, S., Norden, B., Saadat, A., Scheytt, T., Virchow, L., Vieth-Hillebrand, A. (2018): Impact of drilling mud on chemistry and microbiology of an Upper Triassic groundwater after drilling and testing an exploration well for aquifer thermal energy storage in Berlin (Germany). - *Environmental Earth Sciences*, 77, 516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7696-8>
- Stillner, M., Krawczyk, C. M., Bauer, K., Henniges, J., Norden, B., Huenges, E., Spalek, A. (2018): 3D-Seismik am Geothermieforschungsstandort Groß Schönebeck. - *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 1, pp. 84–91
- Zimmermann, G., Blöcher, G., Reinicke, A., Brandt, W. (2011): Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system - Concepts and field results. - *Tectonophysics*, 503, 1-2, pp. 146–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.026>