

Querschnittsthema Geo-Energie

Innovative Beiträge der Geowissenschaften zur Energieforschung

*Magdalena Scheck-Wenderoth, Rita Streich, Simona Regensburg, Hilke Würdemann,
Mauro Cacace, Rolando di Primio, Klaus Bauer, Thomas Kempka
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

The provision of appropriate technologies is a major challenge in the ecological and sustainable use of geological resources. At the same time, there is an increasing awareness that innovative technologies are needed to allow for an environmentally sound and economically feasible exploitation of geo-reservoirs. This applies for both traditional and for more recent efforts of utilizing the geological underground, e.g. for geothermal energy production, storage of CO₂ or other gases, the exploitation of gas shales and the storage of heat and chill. Most approaches with respect to lowering the environmental impact and improving the productivity of a reservoir and for monitoring physical, biological and chemical changes in such reservoirs currently under discussion can be looked upon as cross-cutting issues as they contribute to the various or even all areas mentioned above. The geoenergy concept focuses, in particular, on these cross-cutting issues and, at the same time, highlights the gaps in knowledge and respective research needs. Thus, a holistic approach is required that integrates exploration, exploitation and utilisation of potential reservoirs with innovative concepts for monitoring. Accordingly, the research fields of the cross-cutting topics described below focus on methodological development applicable in equal measure to the utilisation of geothermal energy and of shale gas as well as to the use and monitoring of CO₂ storage. Complementary, new modelling approaches need to be developed that allow for the simulation of the involved processes to predict the occurrence and physical properties of potential reservoirs and the changes that may be induced by their utilisation. In addition, interactions between the different kinds of reservoir use need to be anticipated as well as related aspects of synergy or competition (CO₂-Storage vs. Shale Gas vs. Geothermal).

*Wissenschaftliche Bohrung zur Erforschung
von Gashydrat führenden Sedimenten, Mallik,
Kanada, 2002*



Steigende Ansprüche an die umweltverträgliche und nachhaltige Nutzung geologischer Ressourcen stellen die Geowissenschaften vor neue technologische Herausforderungen. Bereits im Vorfeld entsprechender Maßnahmen ist ein grundlegendes Verständnis des geologischen Untergrunds und der mit der Nutzung einhergehenden Prozesse erforderlich. Hierzu müssen komplexe wissenschaftliche und technische Fragestellungen erörtert und standortspezifisch unterschiedliche Maßnahmen abgeleitet werden. Dies kann nur durch gesamtheitliche Ansätze erreicht werden, die von der Erkundung und Erschließung, über die Bewirtschaftung potenzieller Reservoirs bis hin zu innovativen Monitoring-Konzepten alle relevanten geowissenschaftlichen Fachdisziplinen nutzt und zusammenführt. Aus dieser integrierten Herangehensweise leiten sich eine Reihe von Querschnittsthemen ab, die über alle Nutzungsarten hinweg einzeln oder in Kombination eingesetzt werden können, um den gesellschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Ansprüchen im Hinblick auf die Nutzung des geologischen Untergrunds gerecht zu werden. Gleichzeitig leitet sich aus diesen Ansprüchen vor dem Hintergrund der aktuellen Veränderungen im Energiesektor ein zunehmender Forschungsbedarf ab. Dies betrifft insbesondere die im Kontext des Energiewandels diskutierten Nutzungsformen, zu denen u. a. die Exploration und Nutzung potentieller geothermischer Lagerstätten, die Shale Gas-Produktion, die CO₂-Speicherung sowie die Kälte- und Wärmespeicherung gehört. Hierzu gehören auch Modellierungsansätze, um ablaufende Prozesse simulieren, Vorhersagen über das Vorkommen und die Eigenschaften der Reservoirs treffen und deren nutzungsbedingte Entwicklung abschätzen zu können. Darüber hinaus sind Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Nutzungsarten des Untergrunds und daraus entstehende Synergien bzw. Konkurrenzsituationen (CO₂-Speicherung/Shale Gas vs. Geothermie) zu bedenken.

Nachfolgend sollen die verschiedenen für die Geo-Energie bezogene Nutzung des Untergrundes relevanten Querschnittsthemen vorgestellt und der damit einhergehende Forschungsbedarf verdeutlicht werden.

Erkundung, Erschließung und Überwachung (Monitoring)

Zur Erkundung von potentiellen Geo-Energie-Standorten muss zunächst die räumliche Verteilung von geologischen Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften erfasst werden. Zusätzlich müssen die betrachteten Reservoirtypen und die in den Reservoirs ablaufenden Prozesse verstanden werden. Daher umfassen die entsprechenden Arbeiten ein weites Spektrum räumlicher Skalen und reichen von der Analyse ganzer Sedimentbecken bis zu mikroskopischen Untersuchungen von Gesteins- und Fluidproben. Ebenso reichen auch die betrachteten zeitlichen Skalen von geologischen Zeiträumen bis zur Untersuchung von Änderungen der Reservoirs während der wirtschaftlichen Nutzung. Dazu werden am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ neben Methoden der Sedimentbeckenanalyse, die geophysikalische Lagerstätten erkundung, die Bestimmung von thermodynamischen, hydraulischen, biologischen, chemischen und kinetischen Reservoirseigenschaften, sowie verschiedene Monitoring-Methoden und Untersuchungen zur Geomechanik und Bohrlochstabilität eingesetzt.

Eine besondere Neuentwicklung betrifft die geophysikalische Lagerstätten erkundung. Hier wurden neue Erkenntnisse zur Reservoir erkundung mit aktiven elektromagnetischen Methoden und mit seismischen Verfahren gewonnen, die künftig für verschiedene Geo-Energie-Fragestellungen von Nutzen sein werden.

Reservoir erkundung mit aktiven elektromagnetischen Methoden

Die elektrische Leitfähigkeit von Gesteinen hängt wesentlich von den Leitfähigkeiten der Porenfluide, der Porosität und der Porenvernetzung ab. Daher sind elektrische und elektromagnetische Verfahren besonders zur Charakterisierung des Fluidgehalts in Reservoirgesteinen geeignet. In Gebieten mit starken elektromagnetischen Störfeldern, wie sie z. B. durch Pipelines, Hochspannungsleitungen oder elektrifizierte Bahnanlagen erzeugt werden, kommen Verfahren zum Einsatz, die mit aktiven Quellen arbeiten (Controlled-Source Magnetotellurik – CSMT). Mit aktiven elektromagnetischen Verfahren lassen sich elektrisch schlecht leitende Schichten erfassen, wie sie etwa entstehen, wenn bei CO₂-Injektionen leitfähiges Porenwasser durch schlecht leitendes CO₂ verdrängt wird. Umgekehrt können auch gute Leiter nachgewiesen werden, wie sie z. B. für geothermische Reservoirs charakteristisch sind. Unter günstigen Umgebungsbedingungen sollte außerdem die interne Leitfähigkeitsvariabilität von Schwarzschieferhorizonten auflösbar sein; dies kann zur Charakterisierung des Reifegrads der eingeschlossenen Kohlenwasserstoffe beitragen.



Kontakt: M. Scheck-Wenderoth
(leni@gfz-potsdam.de)

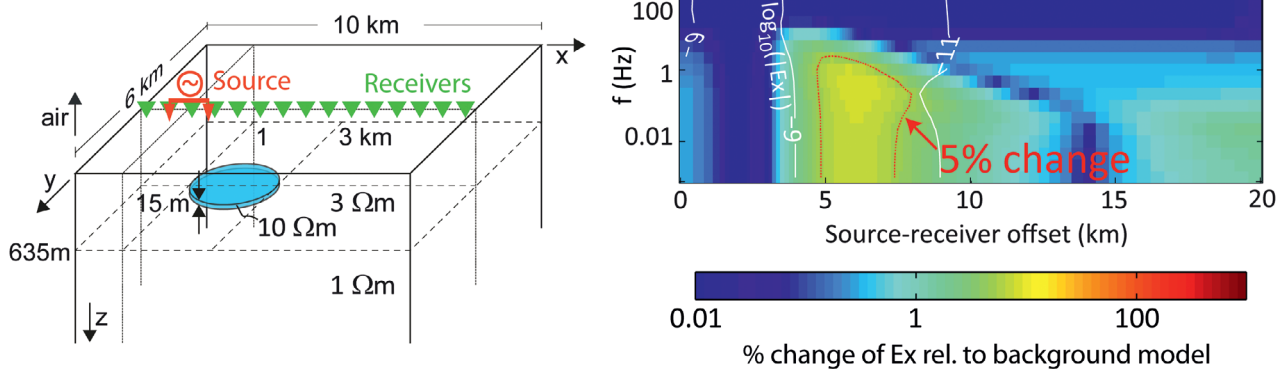


Abb. 1: Änderung des elektrischen Feldes für das dargestellte Leitfähigkeitsmodell mit einem scheibenförmigen „CO₂-Reservoir“ (blau), relativ zum elektrischen Feld für ein Modell ohne das CO₂-Reservoir. Bei Frequenzen unter 1 Hz und Quell-Empfänger-Distanzen von rund 5 bis 8 km wäre die Änderung messbar.

Fig. 1: Change of the electric field for the displayed electrical conductivity model containing a disk-shaped anomaly that represents a CO₂ reservoir, relative to the electric field for a model not containing the CO₂ reservoir. The reservoir would be detectable at frequencies less than 1 Hz and source-receiver distances of about 5-8 km.

Im Rahmen des vom GFZ federführend koordinierten und durch das BMBF innerhalb des Programms „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Bundesländern“ als Verbundprojekt geförderten Vorhabens GeoEn wurde mit Simulationsrechnungen das Auflösungsvermögen für verschiedene Zielstrukturen untersucht (Streich et al., 2010). Entsprechende Software, mit der elektromagnetische Felder in 3D auf dem Rechencluster des GFZ berechnet werden können, wurde für diese Studien neu entwickelt (Streich, 2009; Streich und Becken, 2011). Die Simulationsrechnungen zeigen beispielsweise, dass Leitfähigkeitsänderungen durch Einspeisung größerer Mengen CO₂ von der Erdoberfläche grundsätzlich messbar sind (Abb. 1). Um kleinere Mengen, wie das derzeit am CO₂-Teststandort Ketzin injizierte Volumen, direkt aufzulösen, müsste Strom näher am CO₂-Reservoir, also in einem Bohrloch eingespeist werden. Hier kann CSMT wichtige Hinweise zur Leitfähigkeit in der Umgebung des CO₂-Speichers geben und so dazu beitragen, die Ausbreitung des CO₂ vorherzusagen sowie Störungszonen zu identifizieren, die besonders aufmerksam überwacht werden müssen, um einer Leckage salinärer Porenfluide in höhergelegene Aquifere vorzubeugen.

Um aktive CSMT-Messungen durchführen zu können, wurde in einer Industriekooperation ein neuartiger Stromsender entwickelt, der mit einem Dreiphasenstrom arbeitet und dadurch eine besonders hohe Effizienz erreicht. Anders als mit bisher gebräuchlichen Dipolsendern lässt sich damit auch die Polarisationsrichtung der eingespeisten Ströme im Feld sehr einfach ohne logistisch aufwändigen Umbau des Senders ändern.

Der neue Sender hat im Herbst 2010 einen ersten umfangreichen Praxistest bei einer Feldmessung in der Umgebung des CO₂-Speichers Ketzin erfolgreich bestanden (Streich et al., 2011). Bei dem dort vorhandenen sehr hohen elektromagnetischen Rauschpegel zeigt sich ein weiterer Vorteil des neuen Stromsenders: Durch statistische Auswertung von verschiedenen polarisierten Stromsignalen lassen sich auch noch bei starkem Rauschen die eingespeisten Signale extrahieren und somit auswertbare Daten gewinnen (Abb. 2). Derzeit werden die in Ketzin gemessenen Daten weiter ausgewertet, um die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund zu bestimmen.

Reservoir-Erkundung mit seismischen Verfahren

Seismische Erkundung ist traditionell ein wesentliches Werkzeug bei der Auffindung und Charakterisierung von Reservoiren. Am GFZ werden seit einigen Jahren insbesondere nicht-konventionelle Reservoirtypen, wie Gashydrate, Gasschiefer und geothermische Reservoire, mit neuen und am GFZ weiterentwickelten Methoden untersucht. Im Rahmen des Mallik-Projekts (Kanada, 2002) wurde zum ersten Mal ein seismisches Cross-hole-Experiment in Gashydrat-führenden Sedimenten durchgeführt. Dabei konnte unter In-situ-Bedingungen eine seismisch ungewöhnliche Kombination aus erhöhten Geschwindigkeiten und erhöhter seismischer Absorption nachgewiesen werden (Bauer et al., 2008). Daraus kann für dieses spezielle Geomaterial auf Wechselwirkungen zwischen Korngerüst und Porenfüllung geschlossen werden. Für die seismische Charakterisierung von Gasschiefern wurde am GFZ ein integriertes Konzept entwickelt, das unter Einbeziehung

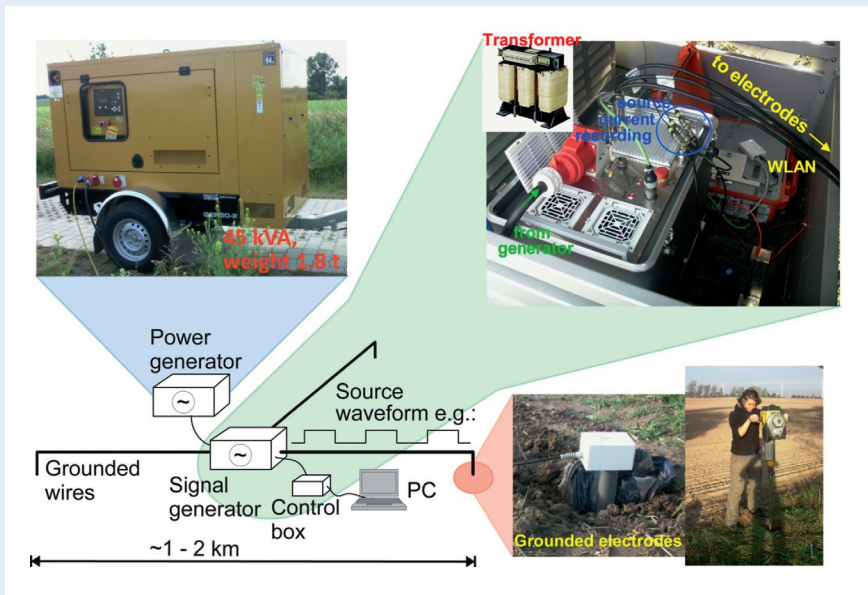


Abb. 2: Schematische Skizze und Feldaufbau des neuen Drei-Phasen-Stromsenders, bestehend aus einem handelsüblichen Stromaggregat, einem Trenntransformator, Signalgenerator und Steuerelektronik sowie drei geerdeten, isolierten Stahlelektroden, die durch bis über 1 km lange Kabel mit dem Signalgenerator verbunden sind.

Fig. 2: Principle sketch and field setup of a new three-phase generator, consisting of a standard power generator, a transformer, signal generator with control unit and three grounded, insulated steel electrodes, which are connected to the generator via copper cables that may be more than 1 km long.

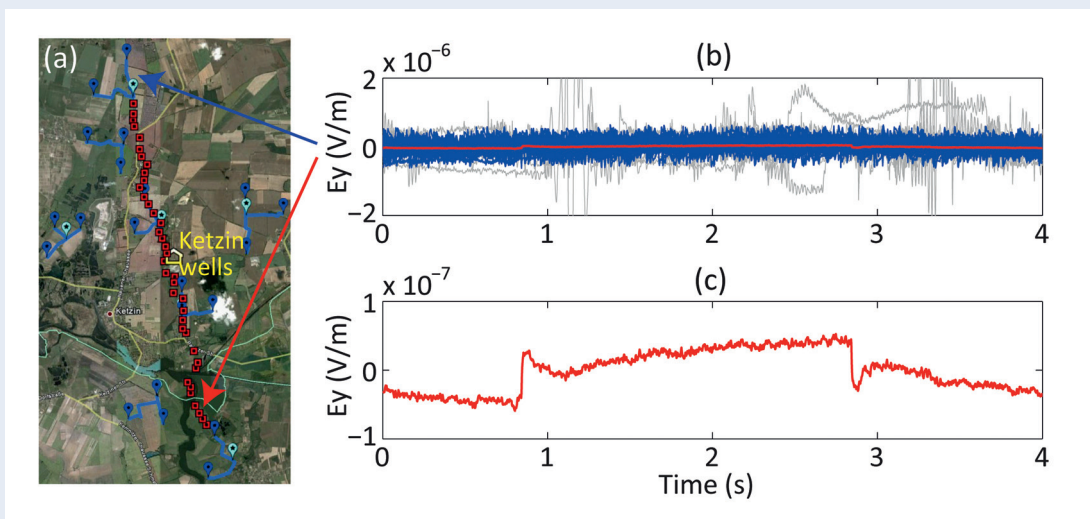


Abb. 3: (a) Messanordnung für das CSMT-Feldexperiment in Ketzin. Sender sind blau, Empfänger rot dargestellt. (b) Datenbeispiel für einen Sender und Empfänger im Abstand von 10,5 km. In den Rohdaten (grau und blau) ist das Quellsignal nicht sichtbar. Nach statistischer Selektion „guter“ Daten (blau) und Stapelung ergibt sich die rote Summenspur (vergrößert in (c)). In der Summenspur sind das eingespeiste Rechtecksignal und dessen Verformung durch die Ausbreitung im Untergrund deutlich erkennbar.

Fig. 3: (a) Field layout of the CSMT survey in Ketzin. Blue symbols indicate transmitters and red squares indicate receivers. (b) Data example for a receiver located 10.5 km from the transmitter. The source signal is not visible in the raw data (gray and blue). The red trace in (b) (magnified in (c)) results from statistical selection and stacking of “good” (blue) data. In the stacked trace, the transmitted square-wave signal is clearly visible. The deformation of the square-wave is indicative of the subsurface electrical conductivity.

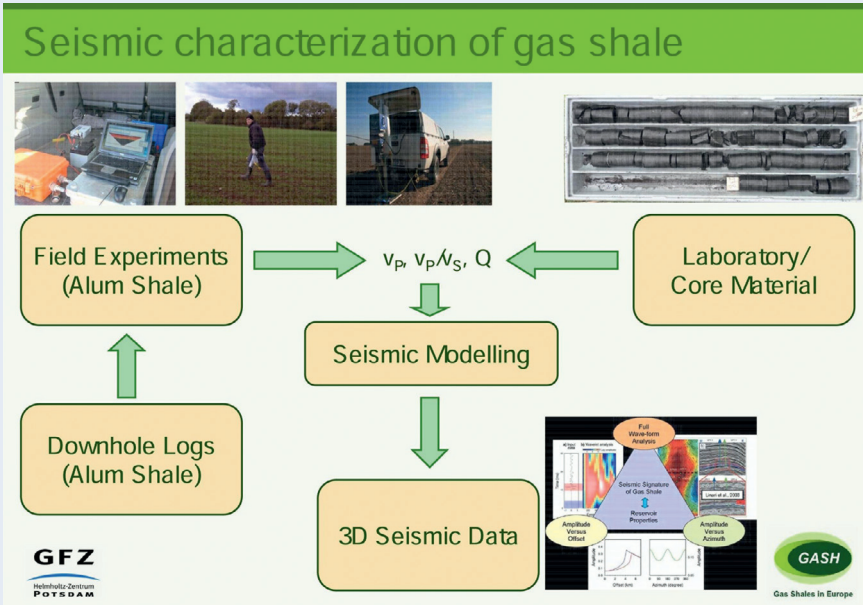


Abb. 4: Integriertes Konzept zur Charakterisierung von Gasschiefern mit Hilfe von seismischen Verfahren

Fig. 4: Integrated work flow to characterize gas shales using a broad range of seismic methods at different scales

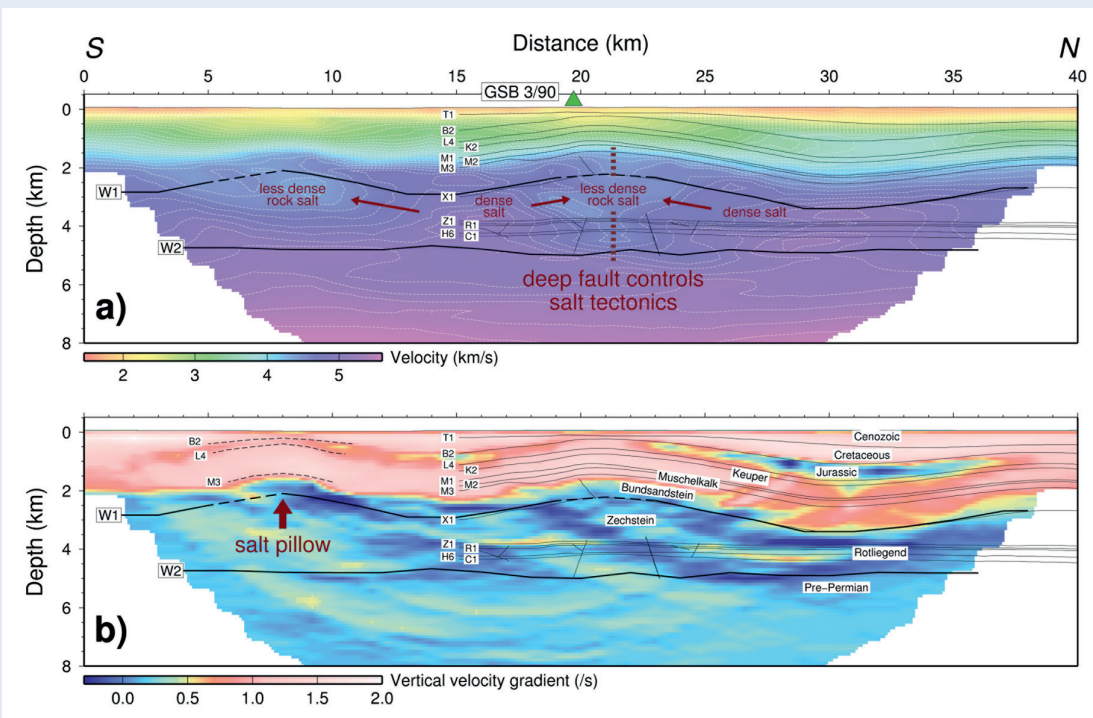


Abb. 5: Seismische Struktur im Umfeld der Geothermie-Bohrung Groß Schönebeck abgeleitet mit tomographischen Verfahren

Fig. 5: Seismic P velocity and vertical velocity gradient structure around the geothermal research well at Groß Schönebeck (NE German basin) using tomographic methods

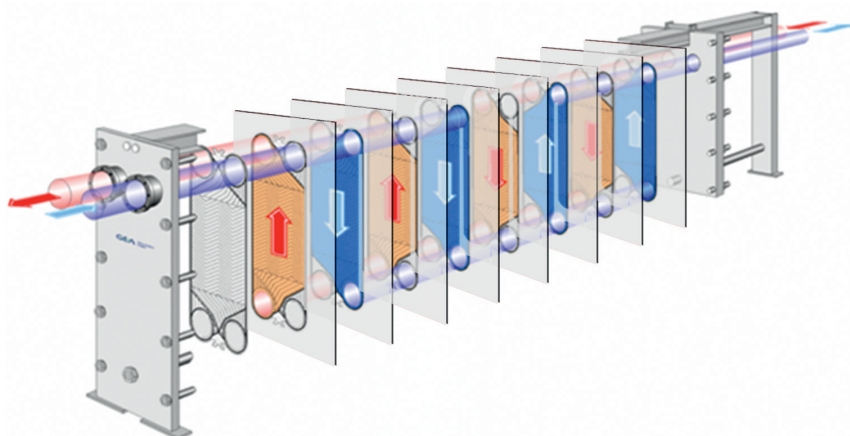


Abb. 6: Plattenwärmeübertrager am Geothermiestandort Groß Schönebeck (Quelle: GEA Ecoflex)

Fig. 6: Plate heat exchanger at the geothermal research laboratory Groß Schönebeck (source: GEA Ecoflex)

von Petrophysik, Bohrlochdaten, oberflächennaher und tiefer Geophysik sowie seismischer Modellierung eine verbesserte Identifizierung von Anomalien in Gasschiefern (sogenannte sweet spots) ermöglicht (Abb. 4).

Bei der geothermischen Erkundung setzen wir eine breite Palette von bekannten und neu entwickelten Methoden in verschiedenen Skalenbereichen und geologischen Umgebungen ein. So wurden am Standort Groß Schönebeck erste Erfahrungen mit tomographischen Methoden gesammelt (Abb. 5). Als wichtigste Ergebnisse dieses methodischen Ansatzes konnten (a) tiefe Wegsamkeiten im Umfeld der Bohrung nachgewiesen werden, (b) bisher nicht bekannte allgemein gültige Effekte der Salztektonik abgebildet und (c) Zusammenhänge zwischen seismischen Geschwindigkeiten sowie Temperaturen modelliert werden (Bauer et al., 2010). An einem vergleichbaren Standort im Polnischen Becken analysierten wir 3D reflexionsseismische Daten. Dabei konnte durch kombinierte Anwendung von Common Reflection Surface Stack-Methoden und speziellen Signalform-Analysen Störungssysteme im Reservoir mit hoher Auflösung abgebildet werden.

Nutzungstechnologien und Wechselwirkungen

Die Forschung zu diesem Querschnittsthema befasst sich mit der konkreten Umsetzung der Forschungsergebnisse in Nutzungstechnologien. Die gewonnenen Erkenntnisse und Daten werden so aufgearbeitet, dass parallel zur Grundlagenforschung auch die technische Umsetzung von Anfang an bedacht wird. Sowohl die Geothermie, als auch die CO₂-Speicherung und die Nutzung von Gasschiefern greifen auf die Ressource „tiefer Untergrund“ zurück. Jede Erkenntnis, die in einem der Teilgebiete gewonnen wird, stellt indirekt auch für die anderen Kernthemen einen unmittelbaren Wissensgewinn dar. Vor allem die Kernthemen Geothermie und CO₂-Speicherung greifen auf ähnliche Bohrtechniken und Daten über die Beschaffenheit des Untergrunds zurück, so dass sich spürbare Synergieeffekte ergeben. Auch weisen die Wärmetransportvorgänge und die Injektion von Fluiden

in den Untergrund bei der geothermischen Nutzung und bei der CO₂-Speicherung grundsätzlich ähnliche Effekte auf und bieten Möglichkeiten zur gegenseitigen Ergänzung. Ähnliches gilt für die künstliche Erhöhung der Gesteinsdurchlässigkeit in Reservoirbereichen durch Fracturing in den Bereichen Geothermie und Shale Gas. Neben physiko-chemischen Effekten können auch mikrobiologische Prozesse die Nutzung von Reservoiren beeinflussen. All diese Aspekte werden in unterschiedlichen Arbeitsgruppen am GFZ untersucht. So wird beispielsweise das Verhalten von Formationsfluiden und deren Wechselwirkung mit technischen Anlagen analysiert, wobei hierzu neue Erkenntnisse an dem Geothermie-Versuchsstandort Groß Schönebeck gewonnen wurden.

Charakterisierung geothermischer Fluide und ihrer Wechselwirkungen mit Materialien in geothermischen Anlagen und Reservoirgesteinen

Die für den Rotliegendesandstein charakteristische hohe Salinität und der hohe Gasanteil des Thermalfluids stellen für die langfristige Nutzung geothermischer Energie im Nordostdeutschen Becken eine besondere geotechnologische Herausforderung dar. Für diese Bedingungen müssen angepasste Technologien entwickelt werden, die die Korrosion minimieren und gleichzeitig den Wärmeaustausch optimieren. Am Geothermie-Standort Groß Schönebeck werden diese Themen mit geochemischen und verfahrenstechnischen Methoden bearbeitet.

Zur Abschätzung des Gefährdungspotentials durch Korrosion werden in den Anlagenkomponenten von Groß Schönebeck Materialuntersuchungen zum Einfluss von Korrosion und Ausfällungen auf Funktionalität und Langzeitbeständigkeit der technischen Ausrüstungen durchgeführt. Weitere Untersuchungen betreffen die katalytische Verbrennung von Schwachgasen, Untersuchungen und Modellierungen zum Wärmeübergang beim Phasenübergang und zur Mehrphasenströmung im Thermalkreis. Die geochemischen Verfahren beinhalten ferner ein intensives Monitoring der Fluidchemie mit einem eigens hierfür entwickelten fluidchemischen Monitoringsystems (Flu-



Abb. 7: Konzept von FluMo (mobile Fluidmonitoring-Einheit) zur online Messung chemo-physikalischer Parameter von geothermalen Fluiden

Fig. 7: Concept of FluMo (mobile fluid monitoring unit) for online measurement of chemo-physical parameters of geothermal fluids

Mo), sowie Untersuchungen von Radionukliden in den Fluiden und Mineralausfällungen.

Als Bindeglied zwischen Thermalwasserkreislauf und Kraftwerkskreislauf hat der Wärmeübertrager entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit der energetischen Nutzungskette. Für die zuverlässige Berechnung von Wärmeübertragern für geothermische Anwendungen in Deutschland und eine darauf aufbauende Optimierung werden Zustands- und Transportgrößen der Fluide und ein Modell des Wärmeübertragers mit Wärmeübergang und Druckverlust benötigt, wobei alle genannten Bereiche bisher noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Am Standort Groß Schönebeck kann das entwickelte Modell schließlich validiert werden (Abb. 6).

Bei der Förderung des Thermalwassers aus dem Reservoir und bei der obertägigen Nutzung kommt es wegen des Anteils an freiem Gas im Fluid zur partiellen Entgasung der gelösten Gase sowie zu Phasenübergängen. Durch die großen Dichteunterschiede zwischen Gas- und Flüssigphase hat der Gasanteil

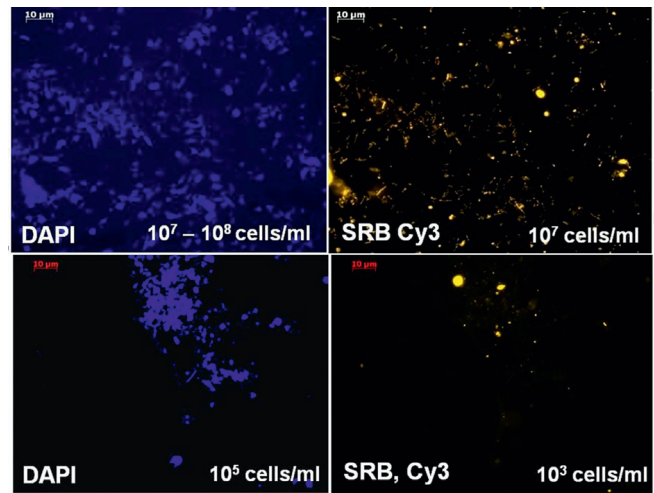


Abb. 8: Höhere Zahl aktiver Zellen im Sumpf der Injektionsbohrung im Gegensatz zu der Beobachtungsbohrung. DAPI: alle Zellen, SRB: Sulfatreduzierende Bakterien. Oben: Injektionsbohrung (Ktzi 201), unten: Beobachtungsbohrung (Ktzi 200)

Fig. 8: higher number of cells in the injection well in contrast to the observation well at the Ketzin site for CO₂ sequestration. DAPI: all cells, SRB: Sulfate reducing bacteria. Upper panel: injection well (Ktzi 201), lower panel: observation well (Ktzi 200)

großen Einfluss auf die hydrostatischen Drücke im gesamten Thermalwasserkreis. Zusammen mit den Unterschieden in der Viskosität und der Kompressibilität können erhebliche oszillierende Druckschwankungen entstehen, die die Funktionalität beeinträchtigen und die Sicherheit der gesamten geothermischen Anlage gefährden können. Die Auslegung eines Thermalwasserkreislaufs mit dem üblichen Einphasenmodell ist daher durch den vernachlässigten Gasanteil mit großem Fehler behaftet. Alternativ soll daher mit einem am GFZ entwickelten Programm die mehrphasige Strömung in allen betroffenen Komponenten modelliert und die Auswirkung auf die Funktionalität betrachtet werden.

Trotz umfangreicher Datenlage, sind viele Reaktionen der hochsalinaren geothermischen Fluide noch nicht im vollen Umfang bekannt. Um unter In-situ-Bedingungen in geothermischen Anlagen die wichtigsten chemo-physikalischen Eigenschaften des Fluids bestimmen zu können, wurde ein mobiles fluidchemisches Monitoringsystem (FluMo) entwickelt (Abb. 7). Das Gerät kann an unterschiedlichen Lokationen einer geothermischen Anlage angeschlossen werden und ermöglicht

eine Online- und In-situ-Messung diverser Parameter (Druck, Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential, Sauerstoffgehalt, Dichte, Massenstrom). Die gemessenen Daten werden über einen Controller direkt gespeichert und können nach Bedarf ausgewertet werden. Auf diese Weise werden umfangreiche Daten zur Fluidbeschaffenheit und Entwicklung generiert, die chemische Reaktionen erkennen lassen und die, nach Vergleich mit geeigneten Laborexperimenten, in eine geochemische Modellierung einfließen können.

Da sich natürliche Radionuklide in den Ausfällungen von geothermischen Anlagen anreichern können, besteht die Gefahr der Kontamination von Anlagenteilen und erfordert ggf. einen besonderen Arbeitsschutz. Daher ist eine Quantifizierung und ein genaues Verständnis der Mobilität der Radionuklide erforderlich, was derzeit ebenfalls am Geothermie-Standort Groß Schönebeck erfolgt.

Mikrobielles Geo-Engineering

Am Beispiel des Untertagelabors zur CO₂-Speicherung in Ketzin und verschiedener geothermischer Anlagen im Norddeutschen Becken sowie im Molassebecken wird auch die Bedeutung mikrobiologischer Stoffwechselfvorgänge für die technische Nutzung des Untergrunds deutlich. In allen bisher untersuchten Reservoiren konnten Mikroorganismen trotz z. T. extremer Umweltbedingungen nachgewiesen werden (Abb. 8). Erste Studien zeigen, dass Mikroorganismen sowohl die Injektivität im bohrlochnahen Bereich, die Mineralbildung im Reservoir als auch die Beständigkeit der verwendeten Materialien erheblich beeinflussen können. Häufig waren die Stoffumsatzraten aufgrund extremer Bedingungen im Habitat wie geringe Nährstoffverfügbarkeit oder hohe Temperatur niedrig, so dass

ein Nachweis mikrobieller Stoffwechselaktivität über Veränderungen in der Fluidchemie allein nicht hinreichend genau war. In Verbindung mit dem Nachweis von Stoffwechselprodukten, wie z. B. sulfidische Ausfällungen, konnten molekularbiologische Verfahren aufgrund ihrer hohen Sensitivität auch bei niedrigen Stoffumsatzraten Hinweise auf die im Untergrund ablaufenden Prozesse liefern.

Bei einem Wärmespeicher dominierten Sulfatreduzierer (*Desulfotomaculum*, *Desulfobalobium*, *Candidatus Desulfurudis audaxviator*) in der kalten Bohrung und waren vermutlich für Korrosion an der Pumpe und Ausfällungen von Pyrit verantwortlich, die zu Betriebsstörungen führten. An einem Kältespeicher zeigte die temporäre Zunahme eines Schwefeloxidierenden Bakteriums (*Thiothrix*) während einer Betriebsstörung eine erhöhte Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren wie Nitrat oder Sauerstoff an, obwohl keine signifikante Änderungen der Verfügbarkeit im Fluid nachgewiesen werden konnte (Lerm et al., 2011).

Modellierung und Simulation

Sowohl bei der Erkundung nach geeigneten Standorten für CO₂-Speicherung, Shale Gas-Vorkommen oder geothermischen Ressourcen als auch zur Einbindung der CO₂-Prozesskette, ist eine Kenntnis der physikalischen Beschaffenheit des Untergrunds und seines Verhaltens Voraussetzung. Benötigt wird nicht nur eine Vorhersage, wo optimale Voraussetzungen für einen potentiellen Geo-Energie-Standort vorliegen, sondern auch ein Prozessverständnis wie Strömung, Wärmeausbreitung, Stofftransport, chemische Reaktionen und mechanische Deformationen das Reservoir beeinflussen. Ein wichtiger

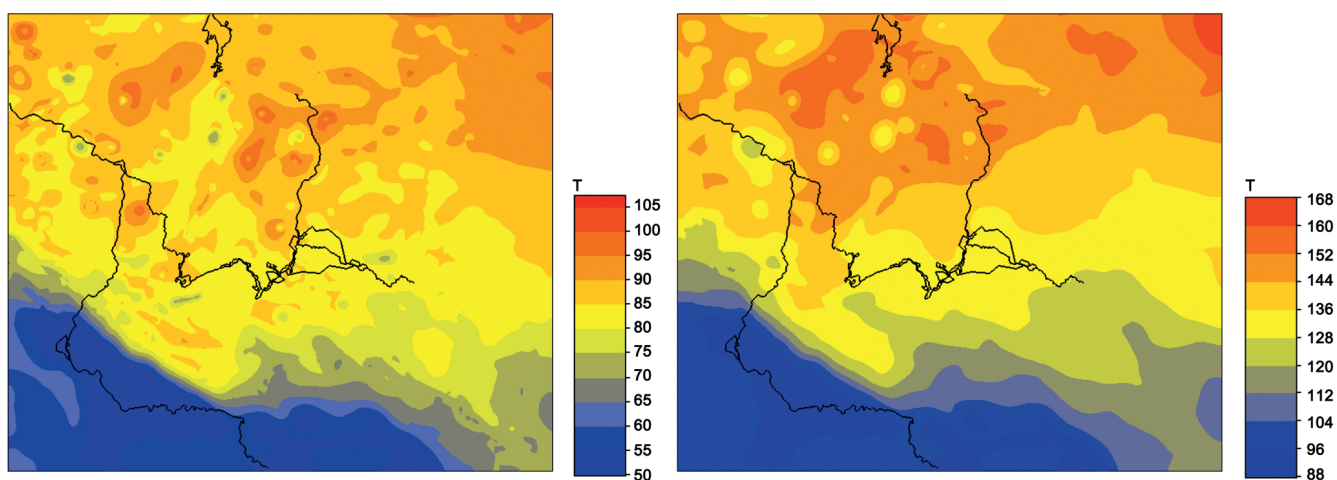


Abb. 9: Modellierte Temperaturverteilung im Untergrund von Brandenburg in einer Tiefe von 2000 m (links) und 4000 m (rechts) in °C (Noack et al., 2010)

Fig. 9: Modelled temperature distribution in the subsurface of Brandenburg in a depth of 2000 m (left) and 4000 m (right) in °C

Faktor in diesem Zusammenhang ist der zeitliche Rahmen der ablaufenden Prozesse.

Die heutige Beschaffenheit eines Reservoirs ist das Resultat von Prozessen, die über Millionen von Jahren abgelaufen sind. Ein Verständnis dieser Prozesse ist beispielsweise für die Erkundung nach Kohlenwasserstoffen, z. B. Shale Gas, relevant. Ebenso kann die Nutzung von Reservoiren Auswirkungen auf den Untergrund haben, die noch Dekaden bis Jahrhunderte andauern können. Entsprechend kann die ökonomisch und ökologisch sinnvolle Nutzung von Reservoiren nicht ausschließlich auf Echtzeitexperimente aufgebaut werden, da diese zu lange Zeiträume umfassen. Die dreidimensionale Simulation der natürlichen Vorgänge ist somit ein wesentliches Werkzeug bei der nachhaltigen Nutzung von Geo-Energie, stellt allerdings noch immer große Herausforderungen an die methodische Entwicklung. Entsprechend bündelt das Forschungsfeld „Modellierung und Simulation“ Arbeiten, die die Erstellung von Modellen und deren Nutzung zur Vorhersage in der Erkundung und Nutzung von Reservoiren beinhalten, aber auch die Weiterentwicklung von numerischen Simulationsmethoden vorantreiben. Konsequenterweise umfasst dieses Querschnittsthema verschiedene Aspekte der Prozessmodellierung, die gemeinsam relevant sind, um die Potenziale der Reservoirnutzungen abschätzen zu können. Dazu sind numerische Simulationen von der regionalen Skala über die Skala von Reservoiren, bis zur Skala von Strömungsprozessen erforderlich, die mittels Basisdaten validiert werden können.

Im Sinn der Validierung und Optimierung von Prozessabläufen fließen umgekehrt Ergebnisse der numerischen Simulationen in das Design der Prozesskette ein.

Modellierung des gekoppelten Wärme- und Fluidtransports

Für alle Nutzungsarten von Geo-Energie spielt die Temperaturverteilung im Untergrund eine Schlüsselrolle. Entsprechend ist es zur Erkundung der Hauptmechanismen, die das geothermische Feld steuern, erforderlich, die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse zu identifizieren und deren Interaktion zu verstehen. Da aus lokalen Temperaturmessungen und Informationen zur Fluidbewegung kostspieliger Bohrungen weder umfassende Einschätzungen zum Wärmefluss noch zu Fluidbewegungen im Untergrund getroffen werden können, liefern numerische Simulationen einen wichtigen Beitrag in diesem Kontext. Vorhersagen zur regionalen Temperaturverteilung im Untergrund (Abb. 9) sind beispielsweise für die Exploration nach Geo-Energie-Standorten hilfreich. Darüber hinaus ermöglichen numerische Simulationen des gekoppelten Fluid- und Wärmetransports eine Quantifizierung der beteiligten Prozesse. Besonders das Wechselspiel zwischen hydrogeologischen Bedingungen, physikalischen Gesteins- und Grundwassereigenschaften sowie Wärmetransport kann systematisch untersucht werden. Solche Simulationen berücksichtigen sowohl den strukturellen Aufbau der geologischen Schichten und

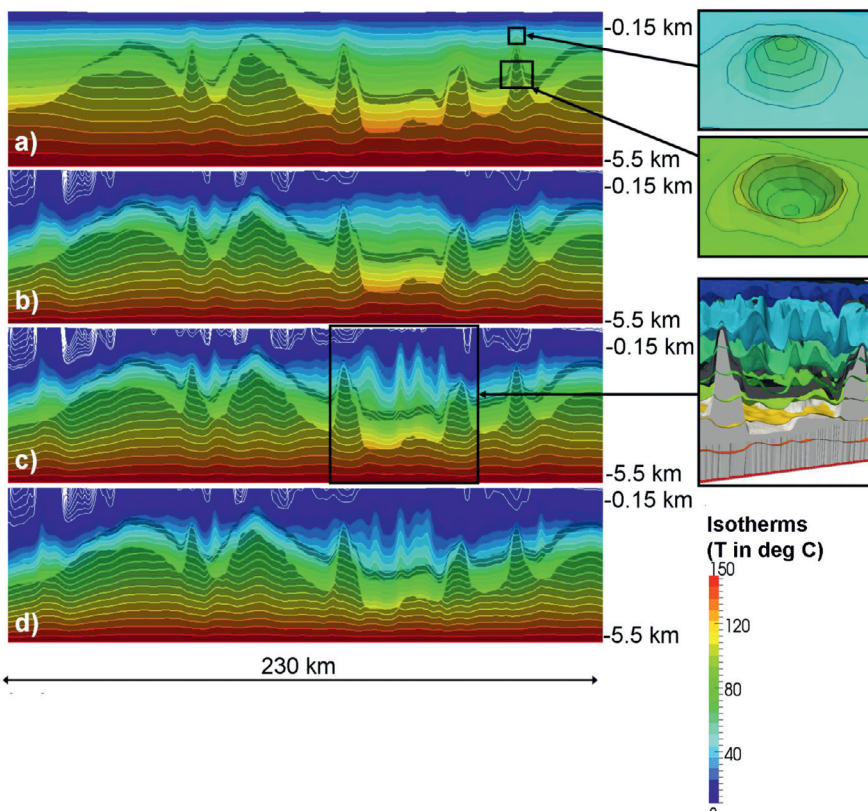


Abb. 10: Profile aus unterschiedlichen 3D-Simulationen des thermischen Feldes (Kaiser et al., 2011) für das Nordostdeutsche Becken mit Isothermen: a) konduktives Regime mit Schornsteineffekt über Salzdiapiren, b) advektives Regime durch regionalen Grundwasserfluss, c) erzwungene Konvektion, d) erzwungene Konvektion gekoppelt mit Viskositäts-effekten. Schattierte Bereiche zeigen Konturen des impermeablen Zechsteinsalzes (unten) und des Muschelkalks; vertikale Überhöhung 1:10.

Fig. 10: Cross sections through different 3D Simulations of the thermal field (Kaiser et al., 2011) for the Northeast German Basin. a) conductive regime with chimney-effect above salt diapirs, b) advective regime induced by regional groundwater flow, c) forced convection, d) forced convection coupled with viscosity effects. Shaded areas show contours of the impermeable Zechstein salt and Muschelkalk. Vertical exaggeration 1:10

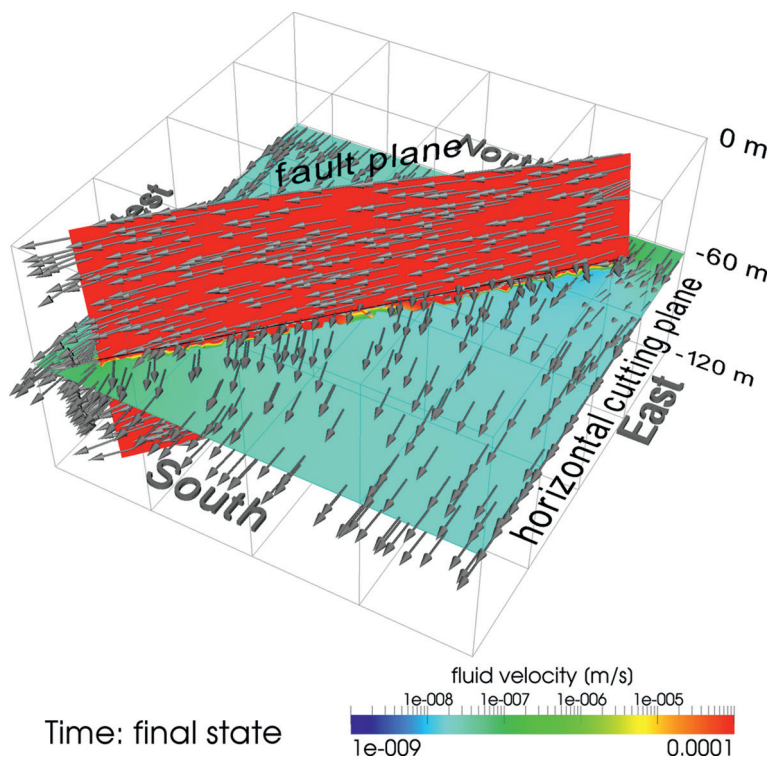


Abb. 11: Berechnetes Geschwindigkeitsfeld von Fluiden in einem synthetischen 3D-Modell, in dem eine geologische Schicht von einer einfallenden Störung durchschnitten wird. Die höchsten Geschwindigkeiten treten entlang der Störung auf, die deutlich durchlässiger als die umgebende Matrix ist. Die Pfeile stellen die Fließrichtung dar, die hinterlegten Farben den Betrag der Geschwindigkeit.

Fig. 11: Calculated velocity field of fluid in a synthetic 3D model with a geological layer cut by a dipping fault. Highest velocities occur along the fault which is distinctly more permeable than the surrounding matrix. Arrows show direction of flow, colours illustrate absolute velocity.

damit die räumliche Verteilung von thermischen und hydraulischen Gesteinseigenschaften, als auch die physikalischen Prozesse, die den Wärmetransport kontrollieren.

Ergebnisse thermohydraulischer numerischer Simulationen im Nordostdeutschen Becken (Cacace et al., 2010; Kaiser et al., 2011; Noack et al., 2010) zeigen, dass der Wärmetransport durch mehrere überlagerte Mechanismen erfolgt (Abb.10). Eine besondere Rolle spielt hier das permische Zechsteinsalz, welches aufgrund seiner starken Mobilisierung in den letzten 200 Millionen Jahren in einer Vielfalt von Salzstrukturen vorliegt. Das Salz weist eine hohe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den überlagernden Sedimenten auf und ist hydraulisch undurchlässig. Entsprechend kann die durch das Salz verursachte Temperaturanomale insbesondere im konduktiven thermischen Feld beobachtet werden, wo im Bereich von Salzdiapiren effektiver Wärme transportiert wird und es zum sogenannten Schornsteineffekt kommt. Im Gegensatz dazu wird das Temperaturfeld in den hydraulisch durchlässigen Schichten zusätzlich von aktiver Grundwasserzirkulation in räumlich variablen Intensitäten beeinflusst. Welcher Fluidtransportmechanismus das Temperaturfeld maßgeblich kontrolliert, ist vom Gefälle der Grundwasserstände und von Aquifermächtigkeiten abhängig. Ein steiles Gefälle des Grundwasserstands

induziert einen starken druckgetriebenen Grundwasserfluss, der das Temperaturfeld kühlt, während mächtige Grundwasserleiter gute Voraussetzungen für dichtegetriebene Strömungen (thermale Konvektion) bieten und das Temperaturfeld in oberflächennahen Bereichen erwärmt. Da die Kombination aus mächtigen Sedimentschichten in Verbindung mit schwachen Grundwasserständen im Nordostdeutschen Becken begrenzt sind, hat thermale Konvektion einen lokalen Charakter, der nicht beckenweit vorhergesagt wird. Im Gegensatz dazu trägt der druckgetriebene Grundwasserfluss beckenweit zu einer Abkühlung des Systems in den wasserdurchlässigen sedimentären Schichten bei.

Für die Nutzung von Reservoiren spielt auch der Einfluss geologischer Störungen auf den Fluid- und Wärmetransport eine entscheidende Rolle. Geologische Störungen entstehen infolge tektonischer Spannung, lithostatischem oder Fluiddruck und sind aufgrund potentieller Fluidwegsamkeiten für ingenieurwissenschaftliche, geotechnische und hydrogeologische Anwendungen von großer Bedeutung. Viele Öl-, Gas-, Geothermie- und Wasserreservoirs befinden sich in gestörten geologischen Systemen. Störungen und Klüfte können hydraulisch als bevorzugte Bahnen oder als Barrieren für den Fluidfluss wirken. Dabei ist die Durchlässigkeit von Störungen von

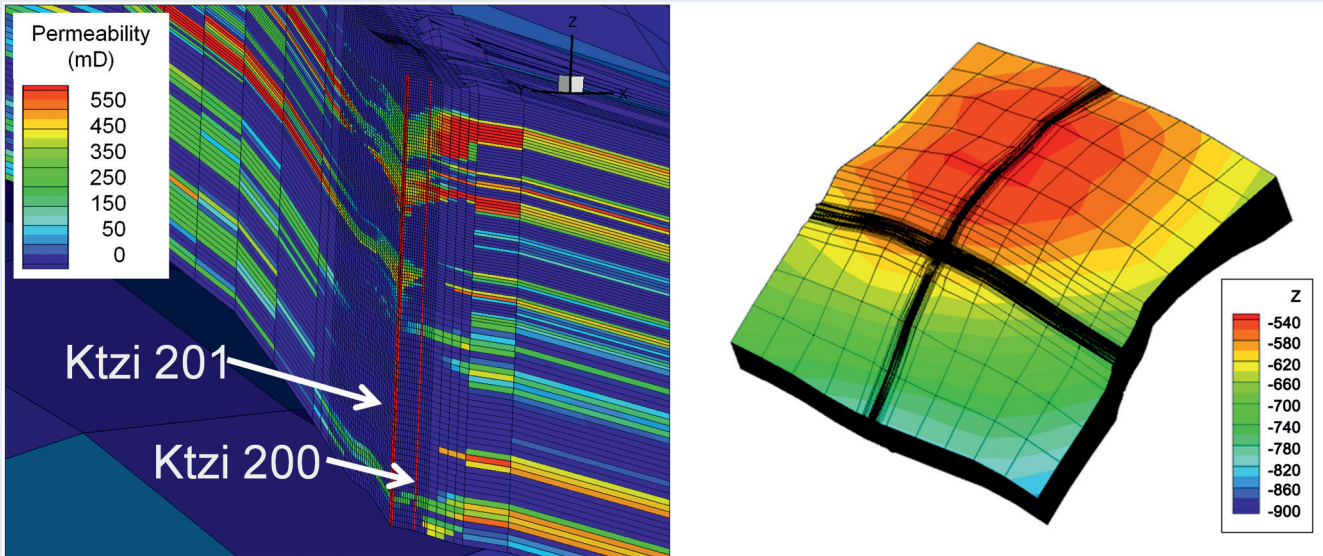


Abb. 12: Durch hohe Permeabilitäten gekennzeichnete Sandsteinkanäle in der Stuttgart-Formation am Pilotstandort Ketzin (links) sowie die Teufenlage und Diskretisierung des derzeit verwendeten numerischen Modells mit einer Ausdehnung von 5 x 5 km und ca. 306 000 Elementen (rechts)

Fig. 12: Sandstone channels in the Stuttgart formation at the Ketzin pilot site determined by high permeabilities (left) as well as depth and discretization of the current numerical model with a size of 5 km x 5 km involving about 306.000 elements (right)

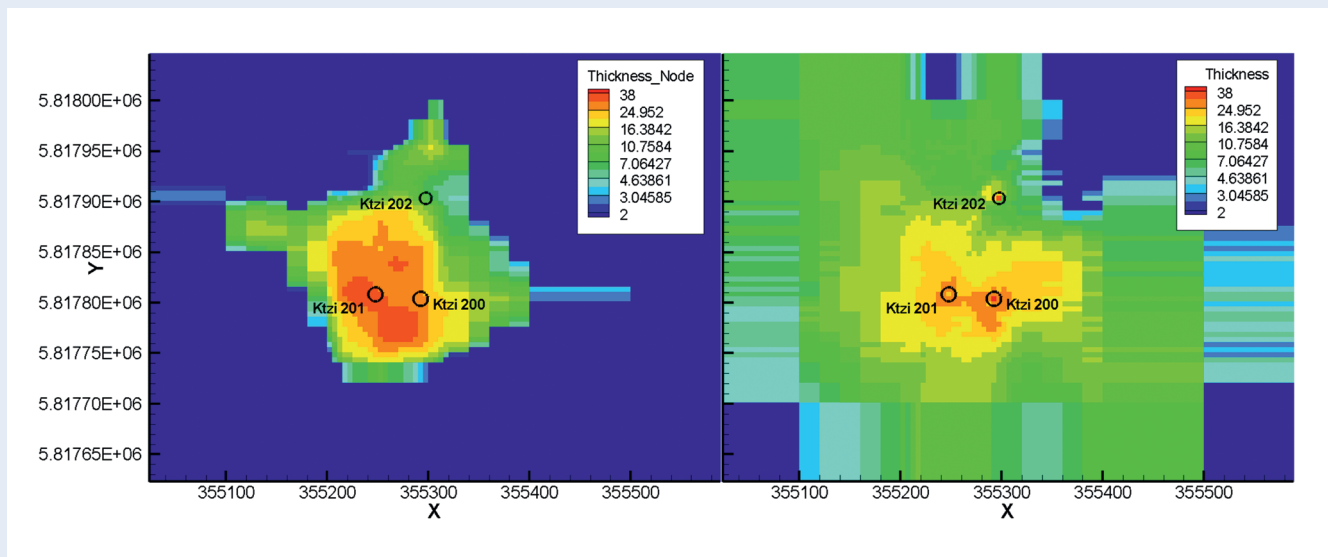


Abb. 13: Verteilung der Mächtigkeiten des gasförmigen CO₂ im Nahbereich der drei Bohrungen am Pilotstandort Ketzin basierend auf den skalierten Differenzen der Reflexionsamplituden aus der 4D-Seismik (nach Kazemeini et. al, 2010, links) und der Vergleich aus der numerischen Modellierung nach einer Injektionszeit von etwa 500 Tagen (Oktober 2010). Relevante Verteilungen der Mächtigkeit können durch die numerischen Modellierungen gut abgebildet werden.

Fig. 13: Distribution of thickness of gaseous CO₂ in the near-well area at the Ketzin pilot site based on scaled reflection amplitudes resulting from 4D seismics (after Kazemeini et. al, 2010, left) and the results from dynamic simulations after 500 days of CO₂ injection (October 2010). Relevant thickness concentrations produced by the dynamic simulations are in good agreement with the geophysical results.

der Geometrie und Beschaffenheit der Störungsfüllung sowie ihrer Orientierung zur Hauptspannung abhängig.

Die Herausforderung in der Modellierung von Prozessen, die in solchen gestörten Gesteinen auftreten, liegt in deren numerischer Abbildung. So waren Modellierungsansätze bisher entweder auf den zweidimensionalen Raum beschränkt oder wurden zu orthogonalen Störungssystemen vereinfacht, die nur aus vertikalen und horizontalen Störungselementen bestehen.

Mithilfe einer am GFZ neu entwickelten Technik zur Generierung unstrukturierter 3D-Finite-Elemente-Netze (Blöcher et al., 2010), können sowohl einfallende als auch sich kreuzende Störungen in unstrukturierten tetraedrischen Netzen abgebildet werden. Die generierten Finite-Elemente-Netze können unmittelbar in die numerische open source Software „OpenGeoSys“ importiert werden, um gekoppelte Prozesse zu simulieren. Erste Ergebnisse aus solchen 3D-Simulationen von Störungsgeometrien zeigen, dass die Störungen einen erheblichen Einfluss auf den Fluid- und Wärmefluss haben, indem sie das hydrostatische Druck-, Geschwindigkeits-, und Temperaturfeld lokal beeinflussen (Abb. 11). Diese Hinweise werden von 3D-Simulationen des realen, komplexeren Strukturinventars am Geothermie-Standort Groß Schönebeck bestätigt.

Dynamische Simulation der Kohlenstoffdioxid-Speicherung am Pilotstandort Ketzin

Dynamische Multi-Phasen-, Multi-Komponenten-Simulationen (CO₂, H₂O und NaCl) dienen der Planung des CO₂-Speicherbetriebs und der Vorhersage des Speicherungsverhaltens unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen, wie z. B. variierenden CO₂-Injektionsraten, dem Einfluss der Heterogenität der Speicherformation und von geologischen Störungssystemen auf die CO₂-Ausbreitung. Im Vorfeld der CO₂-Injektion am Pilotstandort Ketzin wurden dynamische Simulationen zur Abschätzung der Porendruckentwicklung in der Speicherformation durchgeführt, u. a. zur Risikoabschätzung und Erlangung der bergrechtlichen Injektionsgenehmigung (Kempka et al., 2010). Nach und seit Injektionsbeginn werden weiterführende und regelmäßige Prognosen des Speicherungsverhaltens erfolgreich eingesetzt. Durch Bohrloch- und geophysikalische Wiederholungsmessungen (z. B. 4D-Seismik, Elektrische Widerstandstomographie, etc.) konnten die ursprünglichen geologischen 3D-Modelle (Abb. 12) mit Hilfe der neuerlich verfügbaren Daten erweitert, so dass die Druckentwicklung im Reservoir, die Ankunftszeiten des CO₂ in den beiden Beobachtungsbohrungen sowie die durch die 4D-Seismik bestimmte CO₂-Ausbreitung mithilfe der dynamischen Modelle gut abgebildet werden kann (Abb. 13). Die Übereinstimmung zwischen Überwachungsdaten und dynamischer Computersimulation ist eine wesentliche Forderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für den sicheren Betrieb eines CO₂-Speichers und auch für die Übertragung der Verantwortlichkeit für einen Speicher nach seiner Verwahrung an den Staat, die für Ketzin damit bereits gegeben wäre.

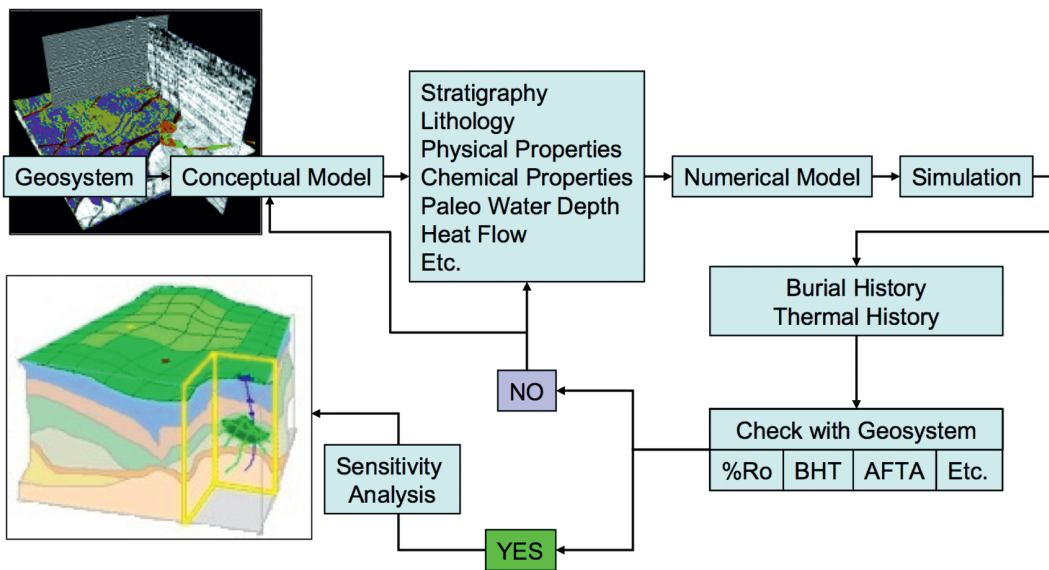


Abb. 14: Flussdiagramm der Erdölsystemmodellierung

Fig. 14: Flow chart for petroleum system modeling

Kohlenwasserstoffe in der Beckenmodellierung

Sedimentbecken beinhalten auch die wichtigsten Speicher für fossile Brennstoffe. Um diese Lagerstätten zu finden, muss man ihre Entstehungsgeschichte und alle sich dabei abspielenden geologischen, chemischen, biologischen und physikalischen Prozesse rekonstruieren, die über Jahrmillionen der Beckenentwicklung auf enorm variierenden räumlichen und zeitlichen Skalen verlaufen. Dieses Spezialgebiet der Sedimentbeckenmodellierung, die Erdölsystem-Modellierung, wird auch für die Erkundung von Shale Gas eingesetzt.

Um die Genese von Erdöl oder Erdgas in der numerischen Simulation nachzuvollziehen, müssen die beteiligten chemischen Prozesse beschrieben und quantifiziert werden. Dies wird am GFZ durch die detaillierte Charakterisierung der chemischen Reaktionen unter Verwendung von Labormethoden erreicht. Dabei können wir sowohl die Art der ablaufenden chemischen Reaktionen bestimmen, als auch Vorhersagen zur Zusammensetzung der entstehenden Fluide, abhängig von sich verändernden Temperaturen, machen. Solche Beschreibungen werden in Beckenmodelle implementiert und erlauben Rückschlüsse darauf, wo und wann welche Kohlenwasserstoffe (Erdöl oder Erdgas) generiert wurden, ob sich diese später im Untergrund bewegt haben und welche physikalischen Eigenschaften diese Fluide haben.

Eingangsdaten für die Erdölsystem-Modellierung (Abb. 14) sind geologische Daten aus Bohrungen oder Tiefenkarten, die auf der Auswertung seismischer Daten basieren. Je nach Datengrundlage kann man die Entwicklung des Beckens in verschiedenen Dimensionen nachbilden. Ein Beckenmodell wird durch die zeitliche Abfolge von Ereignissen definiert, die beispielsweise Ablagerungs- oder Erosions-Phasen beschreiben. Jede Sedimentablagerung muss hinsichtlich des Sedimenttyps (z.B. Tonstein, Kalkstein, Sandstein) sowie der Entwicklung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Ablagerung beschrieben werden. Weitere wichtige Faktoren sind Kompaktionsverhalten (Verringerung der Porosität und Permeabilität im Zuge der Versenkung), thermische Leitfähigkeit und Kapazität, radiogenes Wärmepotential sowie die Anisotropie dieser Eigenschaften. Auch die Randbedingungen des Modells müssen definiert werden. Hierzu gehören die Tiefe des Ablagerungsraums (Meerestiefe, Seetiefe), die Temperaturentwicklung an der Sedimentoberfläche sowie der Wärmeeintrag am Boden des Beckens.

Basierend auf den oben aufgeführten Definitionen resultiert die Simulation der Beckenentwicklung in einer Reproduktion des jetzigen Zustands des Beckens, eine Vorhersage, die verifizierbar ist. Dazu benutzt man Kalibrationsdaten, also Messungen von Größen, die für den heutigen Zustand des Beckens charakteristisch sind oder bestimmte Paläozustände anzeigen. Ist ein Beckenmodell kalibriert, muss auch die Sen-

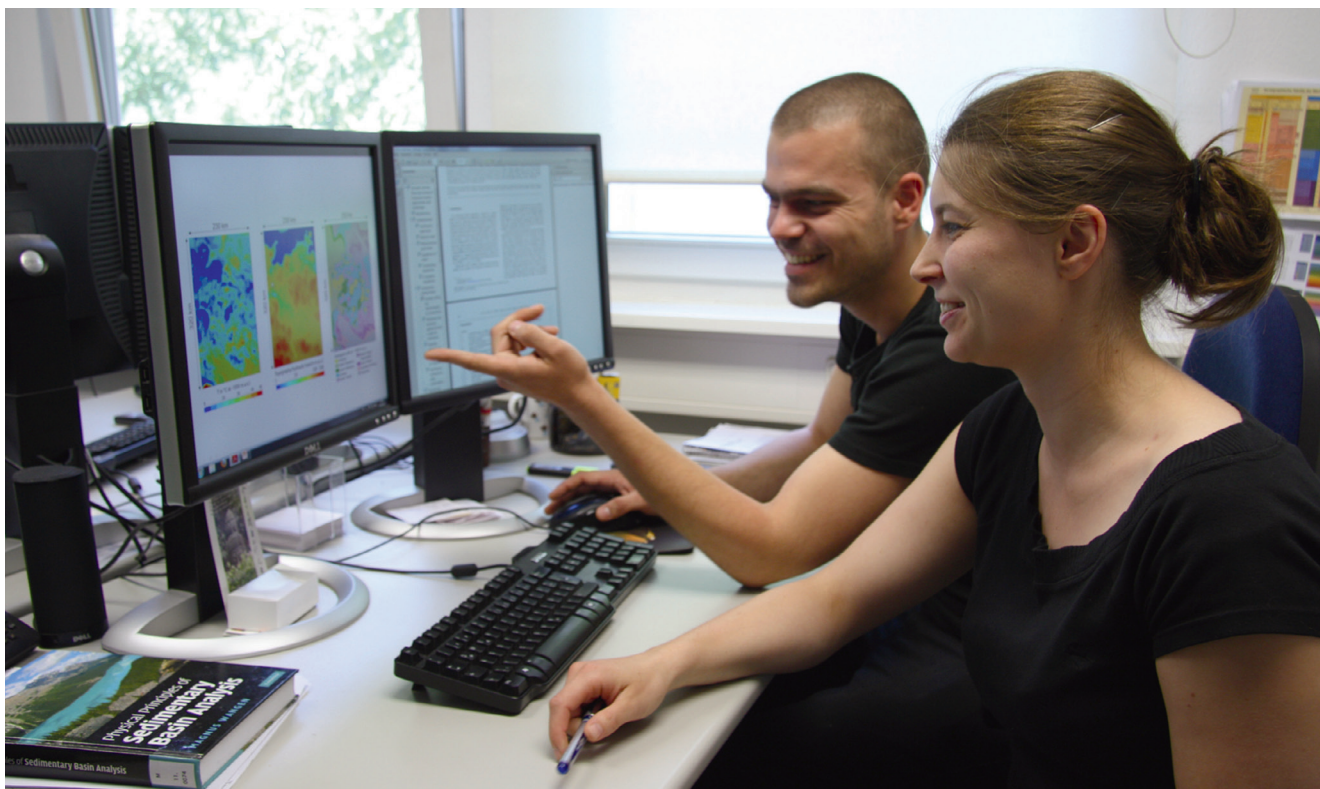
sitivität der Vorhersagen untersucht werden. Die Sensitivität ist ein Maß für die mögliche Variabilität der Eingangsparameter die eine Kalibration erlauben.

Die Erdölsystem-Modellierung wurde ursprünglich für konventionelle Erdölsysteme entwickelt. Entsprechend ist die Anwendung dieser Modelle für unkonventionelle Systeme wie Shale Gas noch relativ unerforscht. Da die Modellierung des Shale Gas-Potenzials noch in den Anfängen steckt, besteht Entwicklungsbedarf überwiegend in der korrekten Beschreibung der Gas-Genese, sowie der Retentions-Prozesse, die das Gas im Muttergestein festhalten.

Erste Expulsions- und Retentionsmodelle zeigen, dass im Nordostdeutschen Becken die Schichten des Karbons im richtigen Reifebereich für Shale Gas-Vorkommen auftreten. Diese Schichten sind aber im Hauptteil des Beckens zu tief versenkt (zwischen 3500 und über 5000m), um eine Gasförderung ökonomisch zu erlauben. Am nördlichen Rand, im Bereich der Insel Rügen, sind aber dieselben Schichten im richtigen Reifebereich in geringeren Teufenlagen zu finden. Hier wäre eine detailliertere, hochauflösende Untersuchung sinnvoll.

Ausbildung und Geo-Energie

Der zu erzielende zusätzliche Nutzen aus den Synergien der Querschnittsthemen kann weiter gesteigert werden. Dazu bedarf es allerdings eines verstärkten Engagements in der Ausbildung qualifizierter Nachwuchskräfte, die themenübergreifend Geo-Energie-Forschung durchführen können. Erste Schritte hierzu sind bereits umgesetzt. So arbeiten zurzeit über 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler an Geo-Energie-Fragestellungen am GFZ. Zusätzlich wird im Verbund Geo.X, der Berliner und Potsdamer Universitäten in Kooperation mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, die Basis für ein Ausbildungsziel „Geo-Energie-Master“ geschaffen.



Literatur

- Bauer, K., Moeck, I., Norden, B., Schulze, A., Weber, M., Wirth, H. (2010): Tomographic P-wave velocity and vertical velocity gradient structure across the geothermal site Gross Schoenebeck (NE German Basin): Relationship to lithology, salt tectonics, and thermal structure. - *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B08312, 10.1029/2009JB006895.
- Bauer, K., Pratt, R. G., Haberland, C., Weber, M. (2008): Neural network analysis of crosshole tomographic images: The seismic signature of gas hydrate bearing sediments in the Mackenzie Delta (NW Canada). - *Geophysical Research Letters*, 35, L19306, 10.1029/2008GL035263.
- Blöcher, G., Cacace, M., Lewerenz, B., Zimmermann, G. (2010): Three dimensional modelling of fractured and faulted reservoirs: Framework and implementation. - *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 145-153, 10.1016/j.chemer.2010.05.014.
- 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.
- Horsfield, B., Scheck-Wenderoth, M., Krautz, H. J., Mutti, M. (2010): Geoenery: From visions to solutions. - *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 1, 10.1016/j.chemer.2010.06.002.
- 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.
- Kazemeini H., Juhlin C., Fomel S., (2010): Monitoring CO₂ response on surface seismic data; a rock physics and seismic modeling feasibility study at the CO₂ sequestration site, Ketzin, Germany. - *Journal of Applied Geophysics*, 71, 109-124, 10.1016/j.jappgeo.2010.05.004.
- Kempka, T., Kühn, M., Class, H., Frykman, P., Kopp, A., Nielsen, C. M., Probst, P. (2010): Modelling of CO₂ arrival time at Ketzin – Part I. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 1007-1015, 10.1016/j.ijggc.2010.07.005.
- Lerm, S., Alawi, M., Miething-Graff, R., Wolfram, M., Rauppach, K., Seibt, A., Würdemann, H. (2011): Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. - *Grundwasser*, 16, 2, 93-104, 10.1007/s00767-011-0165-x.
- Noack, V., Cherubini, Y., Scheck-Wenderoth, M., Lewerenz, B., Höding, T., Simon, A., Moeck, I. (2010): Assessment of the present-day thermal field (NE German Basin)- Inferences from 3D modelling. - *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 47-62, 10.1016/j.chemer.2010.05.008.
- Streich, R. (2009): 3D finite-difference frequency-domain modeling of controlled-source electromagnetic data: direct solution and optimizations for high accuracy. - *Geophysics*, 74, 5, F95-F105, 10.1190/1.3196241.
- Streich, R., Becken, M. (2011): Electromagnetic fields generated by finite-length wire sources: comparison with point dipole solutions. - *Geophysical Prospecting*, 59, 2, 361-374, 10.1111/j.1365-2478.2010.00926.x.
- Streich, R., Becken, M., Ritter, O. (2010): Imaging of CO₂ storage sites, geothermal reservoirs, and gas shales using controlled-source magnetotellurics: modeling studies. - *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 63-75, 10.1016/j.chemer.2010.05.004.
- Streich, R.; Becken, M.; Ritter, O. (2011): Electromagnetic characterization of CO₂ sequestration sites: feasibility studies and first field results from Ketzin, EAGE 73rd Conference and Exhibition, Extended Abstract L036 (Vienna, Austria 2011)