DeepStor – Hochtemperatur-Speicherung im tiefen Untergrund

Hintergrund

Um die globale Erwärmung auf 2 °C gegenüber den vorindustriellen Bedingungen zu begrenzen, ist unsere Gesellschaft mit der dringenden Notwendigkeit konfrontiert, weltweit den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem zu vollziehen (IPCC, 2018). Die Dekarbonisierung des Wärmesektors ist für die Energiewende und die Umsetzung der Klimaschutzziele in mittleren und hohen Breiten von entscheidender Bedeutung, da ein großer Teil des Endenergieverbrauchs für Heizzwecke und industrielle Wärmeprozesse verwendet wird. In Deutschland verursacht der Wärmesektor fast 50 % der CO_2-Emissionen (Ausfelder et al., 2017). Eine klimaneutrale Gesellschaft erfordert zudem Lösungen für den zunehmenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energieträger (IEA, 2017) und das saisonale Ungleichgewicht zwischen dem Hauptangebot an solarthermischer Energie und weiterer Überschusswärme im Sommer und der hohen Nachfrage im Winter (REN21, 2019). Beide Problematiken können durch thermische Energiespeichersysteme hoher Kapazität adressiert werden (z.B. Lee, 2013). Geothermische Technologien bieten dafür vielversprechende Perspektiven. Sogenannte ATES-Systeme ("Aquifer Thermal Energy Storage"), also Wärmespeicher in Grundwasserschichten, stellen eine etablierte Technologie dar. 2'800 Systeme im flachen Untergrund befinden sich im Betrieb - insbesondere in den Niederlanden – und stellen mehr als 2.5 TWh pro Jahr für Heiz- und Kühlzwecke bereit (Fleuchaus et al., 2018). Von diesen Systemen arbeiten 99 % bei niedrigen Temperaturen unter 25 °C und nur sehr wenige bei Temperaturen bis zu 80 °C.

Hochtemperaturspeicher (HT-ATES) in größeren Tiefen, die über die typischen niedrigen bis mittleren Betriebstemperaturen hinausgehen, haben das Potenzial, eine wichtige Rolle in zukünftigen thermischen Energiespeicher-Senarien zu spielen.

Potential

HT-ATES-Systeme mit einer Betriebstemperatur von bis zu 150 °C könnten Wärme, z.B. überschüssige Energie aus der Solarthermie oder Geothermie im Sommer oder Abwärme industrieller Prozesse, im großen Umfang speichern. Diese Wärme könnte sodann bedarfsgesteuert an die Industrie abgegeben oder in Fernwärmesysteme einspeist werden. Regionen mit ehemaliger Kohlenwasserstoffproduktion könnten die notwendigen Reservoir-Bedingungen für die Realisierung von HT-ATES bieten. Der große Vorteil dieser ehemaligen Kohlenwasserstoff-Reservoire ist, dass sie gut erkundet sind und daher wichtige Parameter wie Porosität und Permeabilität bekannt sind. Die wasserführenden Bereiche am Rande dieser Reservoire, die nur geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen erwarten lassen, sind potentielle Zielformationen für HT-ATES. Der Oberrheingraben umfasst zahlreiche solche Systeme und weist zudem einen der höchsten Temperaturgradienten im Untergrund Mitteleuropas von bis zu 100°K km^{-1} auf (Baillieux et al., 2013).

Ein generisches numerisches Modell eines möglichen HT-ATES-Systems im Oberrheingraben zeigt, dass der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung in solchen Systemen hoch ist und mit der Zeit weiter ansteigt, nämlich von 66 % im ersten Jahr auf 82 % nach zehn Jahren. Die Speicherkapazität dieser Systeme hängt vor allem von der Permeabilität und Mächtigkeit des Reservoirs, der Injektions-/Förderrate und der Bohrungsgeometrie ab. Eine erste Potenzialanalyse zeigt, dass HT-ATES für einen Großteil der wasserführenden Randbereiche der ehemaligen Ölfelder im Oberrheingraben angewendet werden kann (Abb. 1). Sie weist auf eine Gesamtspeicherkapazität von ca. 10 TWh a^{-1} hin, was einen nicht unerheblichen Anteil des thermischen

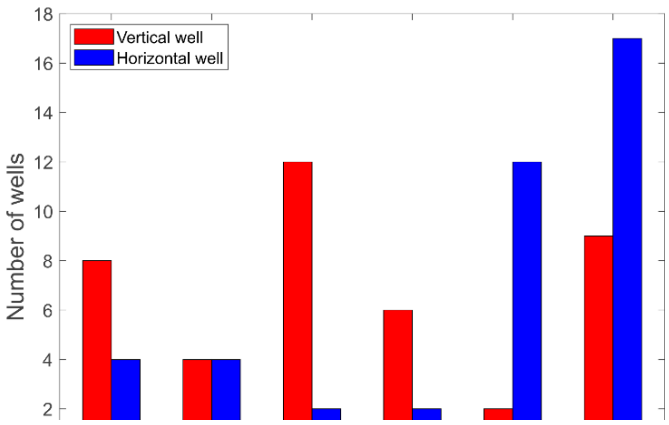

Fig. 1: Distribution of the storage capacity of suited oil fields in the URG. The bars illustrate the storage capacity of these reservoirs for both vertical (red) and horizontal (blue) exploitation wells.

Energiebedarfs in diesem Gebiet darstellt (Stricker et al., 2020). Vor diesem Hintergrund können vorhandenes Wissen und lokale Erfahrungen aus der langen Geschichte der Kohlenwasserstoffgewinnung und Geothermie-Nutzung (z. B. Böcker et al., 2017; Grimmer et al., 2017) auf diese vielversprechende Zukunftstechnologie übertragen werden.

DeepStor – Forschungsinfrastruktur am KIT

Überblick

Die Geothermieforschung am KIT widmet sich der Entwicklung nachhaltiger geothermischer Nutzungstechnologien und der CO_2-neutralen Hochtemperatur-Wärmespeicherung im tiefen Untergrund als neuem Element in einem nachhaltigen Energiemix. DeepStor ist eine geplante wissenschaftliche Infrastruktur zur Demonstration des HT-ATES-Konzepts, das auf ehemalige Kohlenwasserstoff-Reservoirs in tiefen Sedimentgesteinen ausgerichtet ist. DeepStor ist ein wissenschaftliches Projekt und verfolgt einen neuen Ansatz. Das Projekt folgt der übergreifenden KIT-Strategie und ist eingebettet in die Forschung der Helmholtz-Gemeinschaft im Programm "Materialien und Technologien für die Energiewende" und der Helmholtz-Klimainitiative.

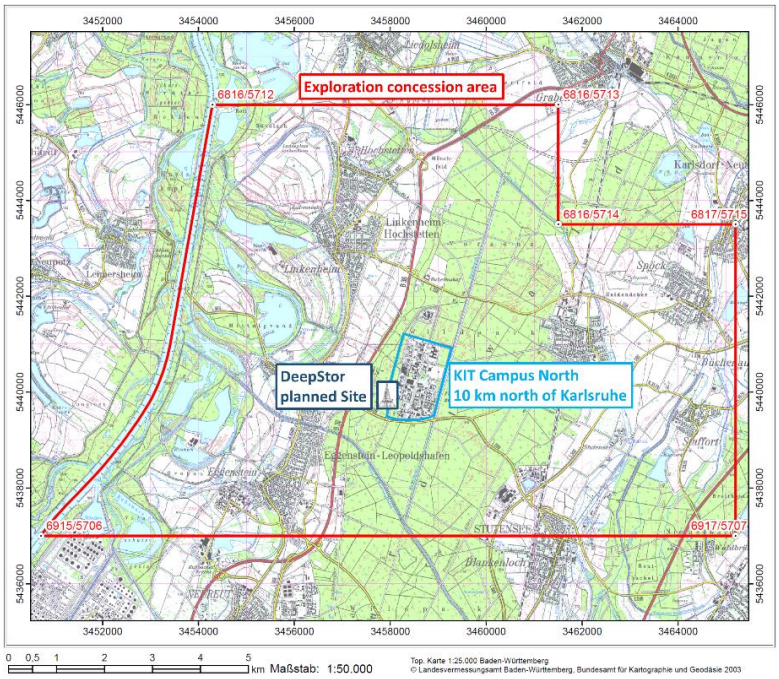

Abb. 2: Gebiet der Erkundungskonzession um den KIT-Campus Nord. Sie wird gemeinsam von KIT und EnBW gehalten.

DeepStor befindet sich auf dem Gelände des KIT Campus Nord, ca. 10 km nördlich der Stadt Karlsruhe. Dieses Gebiet weist eine der höchsten gemessenen geothermischen Anomalien in Deutschland mit Temperaturen von bis zu 140°C in 2 km Tiefe auf. Für das Gelände rund um den Campus Nord halten das KIT und die Firma EnBW eine Erkundungskonzession (Abb. 2). DeepStor ist in drei Phasen unterteilt, die sich aus der Realisierung bestimmter Meilensteine ergeben. **Phase I** zielt auf den Aufbau einer grundlegenden wissenschaftlichen Infrastruktur für eine erweiterte Untersuchung eines HT-ATES-Systems im Randbereich der erschöpften Ölreservoire. Der Zeitplan sieht einen Bau in den Jahren 2021-2024 und einen Testbetrieb in den Jahren 2024 - 2027 vor. Dieser Real-Laborversuch soll 1) eine detaillierte Charakterisierung des Untergrundes durch Logging und Coring, 2) die Bewertung des strukturellen Aufbaus und der hydraulischen und hydrochemischen Randbedingungen der Lagerstätte und 3) kurz- und langfristige Tests der hydraulischen und thermischen Leistung der Lagerstätte ermöglichen.

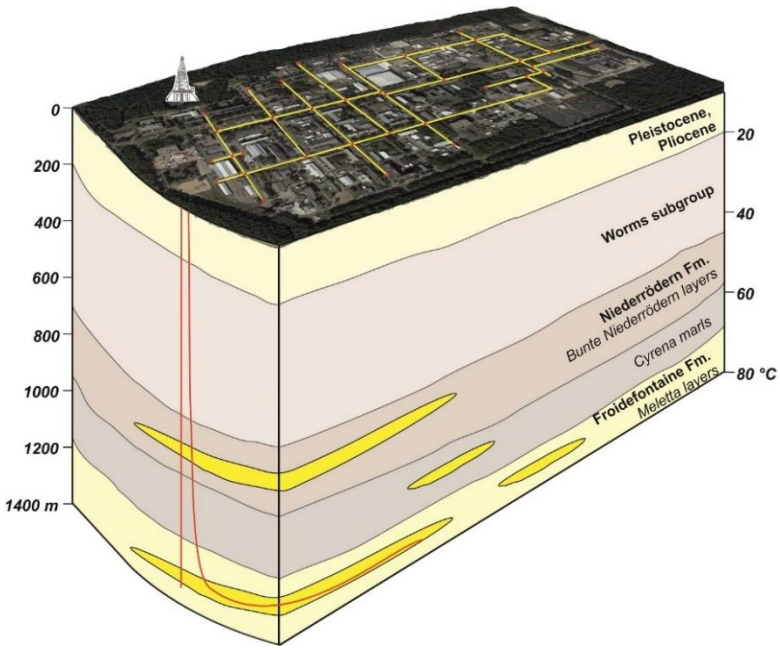

Fig. 3: Konzeptioneller Aufbau von DeepStor - Phase III mit relevanten geologischen Formationen und einer Dublette mit Anschluss an das bestehende Fernwärmenetz am KIT Campus Nord

Phase II befasst sich mit dem Engineering des Reservoirs für die Wärmespeicherung. Zu diesem Zweck wird die Bohrindustrie einbezogen, um die Systemleistung durch horizontale Bohrungen zu optimieren. Diese werden außerhalb der Kohlenwasserstoffindustrie selten genutzt und könnten als Blaupause für andere geothermische Anwendungen dienen. **Phase III** zielt schließlich auf die Integration des HT-ATES-Systems in die Wärmeversorgung des KIT-Campus Nord ab (Abb. 3). Basierend auf ersten Machbarkeitsstudien ist ein voll ausgebautes HT-ATES mit einer jährlichen Speicherkapazität von 5 GWh geplant, das später hochskaliert werden könnte.

Phase I: Experimenteller Aufbau

Die wissenschaftliche Infrastruktur DeepStor – Phase I (Fig. 4) beinhaltet folgende Kernelemente:

- **Erkundungsbohrung**, als Hochtemperatur-Testbohrung (< 170°C) ausgeführt
- **Vertikale Monitoring-Bohrung**, inkl. Isolierung von drei Zonen, Sensoren und Fluidprobenahme
- **Becken** (temperatur- und korrosionsbeständig): Das Becken dient als Pufferspeicher für die gepumpten Untergrundflüssigkeiten. Die Größe von 4'000 m^3 ermöglicht einen ausreichend langen Testzeitraum (d.h. > 20 Tage bei einer Durchflussrate von 2 L s^{-1}).
- **Injektions- und Produktionspumpen** und Verbindungen zum und vom Becken einschließlich eines Wärmetauschers für Heizzwecke und eines Öl- und Gasabscheiders bzw. Speichers zur Reinjektion.

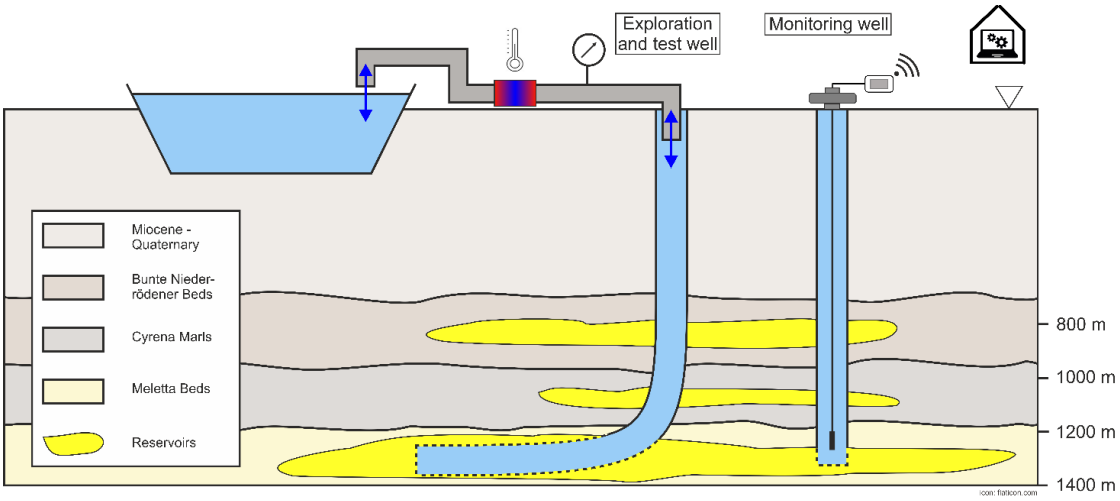

Abb. 4: Schematische Darstellung des Aufbaus von DeepStor (Phase I) mit zwei Bohrungen für Monitoring und Injektion/Förderung, einem Wärmetauscher und einem Becken als Puffer.

Wissenschaftliche Ziele

Da HT-ATES-Systeme ein großes Potenzial für zukünftige Energieszenarien aufweisen, aber bisher noch nie realisiert wurden, werden Demonstratoren wie DeepStor mit fundierter wissenschaftlicher Begleitung benötigt. DeepStor soll drei übergeordnete Ziele erreichen:

- **Machbarkeit**: Studie zur Eignung des Standorts
- **Übertragbarkeit**: Identifizierung der wichtigsten Bedingungen für die zukünftige Entwicklung von HT-ATES-Systemen (z.B. geologisches Umfeld, sedimentologische oder geochemische Bedingungen)
- **Prozess-Beschreibung**: Charakterisierung relevanter chemo-physikalischer Prozesse zur Gewährleistung eines wirtschaftlich effizienten und umweltverträglichen Betriebs.

Das Programm beinhaltet zudem ein zentrales Konzept zu einer engen Interaktion mit der Öffentlichkeit, die Bürger zu Akteuren macht und in die technisch-wissenschaftliche Datenerfassung miteinbezieht ("Wissenschaft für die Bürger - Bürger für die Wissenschaft".)

Zu den wissenschaftlichen Themen gehören:

- **Reservoirverhalten**: Thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische (THMC) Prozesse unter Be- und Entladungsszenarien werden mit Hilfe anspruchsvoller numerischer Simulationen quantifiziert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Zweiphasenströmungen (Öl/Wasser).

- **Hydrochemie**: Da die känozoischen Wässer bekanntermaßen stark salzhaltig sind (TDS <130 g/L) wird eine gründliche Untersuchung von Ablagerungen (Scaling) und Korrosion von entscheidender Bedeutung sein.
- **Materialwissenschaften**: Multiphysik-Simulationen werden entwickelt, um Korrosionsprozesse von Materialien zu charakterisieren. Dies ist eine Grundlage für die Entwicklung verbesserter Materialien und Prozesse. Neuartige funktionale Nano-Tracer werden unter Feldbedingungen getestet und weiter verfeinert.
- **Seismizität** und **Monitoring**: Die Installation von seismischen Sensoren in der Monitoring-Bohrung wird es ermöglichen, das Auftreten von Mikroseismizität zu untersuchen, um ein effizientes und sicheres Betriebsszenario abzuleiten. Es sollen neue Monitoring-Schemata entwickelt werden.
- **Informatik und Datenwissenschaften**: Es werden 3D-Visualisierungskonzepte zur Darstellung der Interpretation von Datenerfassung und numerischen Modellen entwickelt. Datenkonzepte werden die Variabilität der Quelldaten berücksichtigen, die für Analysen, rechtliche Verfügbarkeit oder Visualisierungszwecke behandelt werden müssen.
- **Soziologie**: Das DeepStor-Projekt wird auch neue Strategien der öffentlichen Akzeptanz berücksichtigen, indem es die Öffentlichkeit in einen Co-Design-Prozess und in die Datenerhebung einbindet („Citizen Science“). So wird erwartet, dass das Projekt einen Einfluss auf die Akzeptanz von Geotechnologien über DeepStor und geothermische Speichersysteme hinaus hat.

Referenzen

Ausfelder et al. (Hrsg.): Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017. ISBN: 978-3-9817048-9-1

Baillieux, Paul; Schill, Eva; Edel, Jean-Bernard; Mauri, Guillaume (2013): Localization of temperature anomalies in the Upper Rhine Graben: insights from geophysics and neotectonic activity. In: *International Geology Review* 55 (14), S. 1744–1762. DOI: 10.1080/00206814.2013.794914.

Böcker, Johannes; Littke, Ralf; Forster, Astrid (2017): An overview on source rocks and the petroleum system of the central Upper Rhine Graben. In: *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 106 (2), S. 707–742. DOI: 10.1007/s00531-016-1330-3.

Fleuchaus, Paul; Godschalk, Bas; Stober, Ingrid; Blum, Philipp (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, S. 861–876. DOI: 10.1016/j.rser.2018.06.057.

Grimmer, J. C.; Ritter, J. R. R.; Eisbacher, G. H.; Fielitz, W. (2017): The Late Variscan control on the location and asymmetry of the Upper Rhine Graben. In: *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 106 (3), S. 827–853. DOI: 10.1007/s00531-016-1336-x.

IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Lee, Kun Sang (2013): Underground thermal energy storage. London. Springer (Green energy and technology). Available online at http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1502/2012942260-b.html.

OECD/IInternational Energy Association (Hg.) (2017): Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations.

REN21 (2019): Renewables 2019 Global Status Report. REN21. Paris, France. Available online at https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.

Stricker, Kai; Grimmer, Jens C.; Egert, Robert; Bremer, Judith; Korzani, Maziar Gholami; Schill, Eva; Kohl, Thomas (2020): The Potential of Depleted Oil Reservoirs for High-Temperature Storage Systems. In: *Energies* 13 (24), S. 6510. DOI: 10.3390/en13246510.