

Verbundprojekt „SKEWS“: Saisonaler kristalliner Erdwärmespeicher.

Teilvorhaben: Praktische Umsetzung von Mess- und Monitoringkonzepten für mit-teltiefe Erdwärmespeicher.

Teilvorhabenbeschreibung der Firma Geotechnisches Umweltbüro Lehr für das Forschungs- und Ent-wicklungsprojekt „SKEWS“ im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung

Förderkennzeichen: 03EE4030D

Sachstand: Abschlußbericht

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03EE4030D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Ver-öffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger:

Geotechnisches Umweltbüro Lehr
Am Taubenbaum 25 A
61231 Bad Nauheim



Ansprechpartner: Dipl. Geol. Clemens Lehr
Tel.: 06032 – 32343

Mail: info@geotechnik-lehr.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Abschlussberbericht	
1.....Aufgabenstellung	2
2.....Voraussetzungen	2
3.....Ablauf	2
4.....Wissenschaftlich technischer Stand zu Vorhabenbeginn	3
5.....Verwendung der Zuwendung und erreichte Ziele	3
6.....Wichtige Erkenntnisse	5
7.....Angemessenheit der Forschungen	5
8.....Verwertbarkeit	5
9.....Fortschritte in anderen Vorhaben	6
10....Veröffentlichungen	6

1. Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung und Umsetzung eines Mess- und Monitoringkonzeptes für mitteltiefe Erdwärmesondenspeicher, das es erlaubt, den Speicherbetrieb sowie den Einfluss dieses Betriebes auf den umgebenden Untergrund messtechnisch erfassen zu können. Die aufgezeichneten Messdaten sollten im Rahmen des Forschungsprojektes zur Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von numerischen Modellen herangezogen werden. Als adäquates Mittel wurde der Einsatz von Glasfasermesstechnik identifiziert. Diese Technik ermöglicht die zeitgleiche Messung der Parameter Schall, Deformation und Temperatur.

Die angestrebte Aussagekraft erforderte eine hohe Datendichte und Datengüte, die durch das sorgfältig ausgearbeitete und ausgeführte Messkonzept erreicht werden sollte. Dabei kann mit der Glasfasertechnik eine Auflösung bis in den Meterbereich erzielt werden (vergleichbar einem konventionellen Sensor je Meter der Messstrecke) Die Messung des Schalls (DAS) sollte im Vorfeld zur Erkundung der Untergrundstrukturen (Seismik, VSP) und im Betrieb zur Kontrolle der thermischen Auswirkungen auf das Gebirge (induzierte Seismik) genutzt werden. Die Temperatur-Messungen sollten zur Bewertung des Betriebsverhaltens in der umgebenden Geologie sowie im Vorfeld zur Ermittlung der thermophysikalischen Parameter des Gebirges (dGRT) eingesetzt werden. Die Strain-Messungen (DSS) sollten Auskunft über die Deformationen durch thermische Impulse (Laden und Entladen des thermischen Speichers) im Nahbereich der Sonde geben.

2. Voraussetzungen

Um die messtechnische und technische Umsetzbarkeit zu prüfen, war es notwendig eine der Anwendungswirklichkeit entsprechende Anwendungsumgebung (Reallabor) zu haben. Dies umfasst eine mitteltiefe Bohrung und den Einbau der Messtechnik im Rahmen des Bohrungsausbaus sowie den nachfolgenden Betrieb der mitteltiefen Erdwärmesonde und die messtechnische Erfassung der benannten Parameter.

Der Bohrplatz wurde durch die TU Darmstadt bereitgestellt. Im Falle eines positiven Forschungsergebnisses, ist ein Ausbau des Reallabors in einen Kristallinspeicher zur Versorgung des Campus „Lichtwiese“ ein reales Szenario. Die für die Messungen notwendige Glasfaser-Messtechnik wurde durch den assoziierten Projektpartner Luna Innovations Germany GmbH, Schanzenstrasse 39, 51063 Germany (vormals NKT Photonics GmbH) bereitgestellt.

3. Planung und Ablauf

Die ersten Planungen zu diesem Projekt starteten bereits im Jahr 2013 an der TU Darmstadt. Zur Jahreswende 2020/2021 wurde der finalisierte Projektplan beim Fördergeber eingereicht. Das Projekt startete nach Bewilligung mit dem Kick-Off-Meeting im November 2021.

Die Bohrarbeiten zur Errichtung der 750 m tiefen Bohrungen begannen im Juni 2022. Durch unerwartete geologische Gegebenheiten dauerten die Bohrarbeiten länger als geplant. Um das Messprogramm entsprechend der Planungen durchführen zu können, wurde im Projektablauf die Anzahl der Bohrungen von 4 auf 3 reduziert und der Projektzeitraum um ein Jahr verlängert. Der Zeitrahmen des gegenständliche Teilprojekts wurde nicht verlängert. Die wesentlichen Projektziele konnten bis zum Ende des ursprünglichen Projektzeitraums erreicht werden. Für die Auswertungen der Messungen wird auf den Schlussbericht der TU Darmstadt verwiesen.

Alle Bohrungen wurden mit einem Glasfaser-Hybridkabel ausgestattet. Die Kabel konnten voll funktionstüchtig bis in die Endtiefe von 750 m in den Ringraum der Bohrung eingebracht werden. Weiterhin wurden Glasfasern im Zentralrohr und Ringspalt der tiefen Koaxial-Sonde und in drei Grundwassermessstellen im Umfeld der Tiefbohrungen eingebaut.

Im Vorlauf der thermischen Untersuchungen wurde durch den assoziierten Partner LIAG – Institut für angewandte Geophysik, Hannover, eine Seismik-Kampagne durchgeführt und die Schallwellen via Glasfaser (DAS) begleitend gemessen.

Nachfolgend wurde ein dGRT durchgeführt, bei dem alle Parameter (Temperatur, Deformation, Schall) aufgezeichnet wurden. Der dGRT konnte im Projektzeitraum abgeschlossen und ausgewertet werden.

Im Anschluss erfolgten (derzeit noch in Durchführung) mehrere Lade- und Entladezyklen des Kristallinspeichers. Hierbei wird das Gestein über die mitteltiefen Sonden wiederholt aufgeheizt. Das Aufheiz- und Abkühlverhalten wird mit dem Glasfaser-Messsystem gemessen. Die Daten dienen der Validierung eines numerischen Modells. Die Validierung soll eine Präzisierung des mathematischen Modells erzeugen, um die Prognosefähigkeit des Modells zu verbessern.

4. Wissenschaftlich technischer Stand zu Vorhabenbeginn

Die Glasfasertechnik zur Messung von Temperatur, Schall und Deformation war zu Beginn des Projektes bereits Stand der Technik. Der Ansatz, dies zusammen zur Beschreibung von technischem und mechanischen Eigenschaften geothermischer mitteltiefer Speicher zu nutzen, ist Neuland. Zurzeit sind keine Informationen vergleichbarer Projekte bekannt. Der hohe Technisierungsgrad der Messtechnik ermöglicht es gut, die technologischen Entwicklungen zu verfolgen, da der Kreis der Entwickler und Forscher vergleichsweise klein ist. Durch Recherchen in Online Portalen (z.B. EduAcademia, ResearchGate, Internet allgemein) die themenspezifische Artikel automatisiert per Email melden, werden Veröffentlichungen unmittelbar wahrgenommen. Weiterhin ist mit dem assoziierten Partner Luna Innovations GmbH ein weltweit operierender Partner mit dem Projekt verbunden, deren Entwickler ihr Know-how in das Projekt eingespeist haben.

5. Verwendung der Zuwendung und erreichte Ziele

Die Verwendung erfolgte der Zuwendung erfolgte im Rahmen der Planung, Umsetzung und Begleitung der messtechnischen Erfassung. Das Messkonzept konnte technisch umgesetzt werden und erreichte die erwarteten Ziele.

Die erste Herausforderung war das Design und der Einbau eines geeigneten Glasfaser-Hybridkabels in eine 750 m tiefe Bohrung. Hierfür wurde ein Hybridkabel designt, das Zeitgleich die Messung der Parameter Schall, Deformation und Temperatur ermöglicht. Um dies zu ermöglichen wurden „tight buffered“ Fasern und „loose buffered“ Fasern/ „single“ und „multi“ Mode Fasern in das Kabel integriert. Die „tight buffered“ Fasern liegen am Mantel an, um so Schall und Deformation direkt auf die Faser übertragen zu können. Die „loose buffered“ Fasern liegen in einer Gel-gefüllten Kapillare und werden zur Temperaturmessung genutzt. Die unterschiedlichen Fasern „single“ und „multi“ Mode werden mit unterschiedlichen Frequenzen der Laser Impulse zur Messung der Parameter genutzt. Der Verbundpartner H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbauges. mbH, 37235 Hessisch Lichtenau, steuerte eine Einbauvorrichtung bei, die es ermöglichte das Hybridkabel unbeschädigt bis auf Endtiefe einzubringen.



Abbildung 1: Centralizer zum Kabeleinbau

Dies ist ein anspruchsvoller Vorgang, da das Kabel im Vergleich zur tonnenschweren Stahl-Rohrtour des Einbaus vergleichsweise empfindlich ist. Das Kabel konnte so beschädigungsfrei in alle drei Bohrungen installiert werden.

Nachfolgend wurde der Messaufbau installiert. Die Controller wurden in einem Container installiert und mit den Hybridkabeln der Bohrungen verbunden.

Zunächst wurde eine Seismik-Kampagne durchgeführt. Dabei wurden die Schallwellen via DAS (Distributed Acoustic Sensing) aufgezeichnet. Die Schallaufzeichnungen wurden durch den assoziierten Partner LIAG, Hannover, gesichtet und bewertet. Die Aufzeichnungen sind konsistent und verwertbar. Die finale Auswertung steht jedoch noch aus. Hier wird auf den Schlußbericht der TU-Darmsatd verwiesen. Das Gleiche gilt für die begleitenden DAS-Messungen im Rahmen der noch andauernden Aufheiz- und Abkühlungszyklen.

Nach der Seismik-Kampagne wurde ein dGRT durchgeführt. Der dGRT (Distributed Geothermal Response Test) dient der Ermittlung der thermophysikalischen Gesteinsparameter des Gebirges, in das die Bohrung abgeteuft und die mitteltiefe Koaxial-Sonde installiert wurde. Hierbei wird die Sonde aufgeheizt (hier: Mobile Heizzentrale) und das Heizverhalten im Gebirge tiefenaufgelöst („distributed“) mit der Glasfaser gemessen. Das Aufheiz- und Abkühlverhalten (Temperaturkurven) kann nachfolgend dazu genutzt werden die thermischen Kennwerte effektive Thermische Leitfähigkeit, effektive volumetrische Wärmekapazität und den effektiven thermischen Bohrlochwiderstand zu bestimmen. Diese Parameter charakterisieren die thermischen Eigenschaften des Gebirges und können genutzt werden, um ein mathematisches Untergrundmodell zu erzeugen. Diese wiederum kann zur Prognose für den Regelbetrieb eines Kristallinspeichers herangezogen werden. Durch die Glasfasern im Zentralrohr und dem Ringspalt der Koaxialsonde, können die Effekte innerhalb des Bauwerks gezeigt und bewertet werden. Dies ist im Projekt für die Bewertung der Wirksamkeit der Zentralrohr-Isolation des Projektpartners Handke Brunnenbau GmbH, 67246 Dirmstein, von großem Interesse. Da das Fluid (hier Wasser), das innerhalb der Koaxial-Sonde zirkuliert, durch den koaxialen Aufbau (Rohr-in-Rohr) große Kontaktflächen zwischen warmem und kaltem Strom hat, ist eine Isolierung unabdingbar, um den internen thermischen Kurzschluss gering zu halten.

Während des dGRT wurde via Glasfaser die Deformation (DSS – Distributed Strain Sensing) gemessen. Da sich Materialien bei Erwärmung ausdehnen und bei Abkühlung schrumpfen, ist die temperaturabhängig Deformation von Interesse. Da die Kompartimente (z.B. Zement, Stahl, Gestein) unterschiedliche kubische Ausdehnungskoeffizienten besitzen, können so mechanische Effekte nicht ausgeschlossen werden. Zusätzlich kann die Deformation zu akustischen Ereignissen führen, weshalb parallel zu Temperatur und Strain auch die Akustik-Messung weitergeführt wurde.

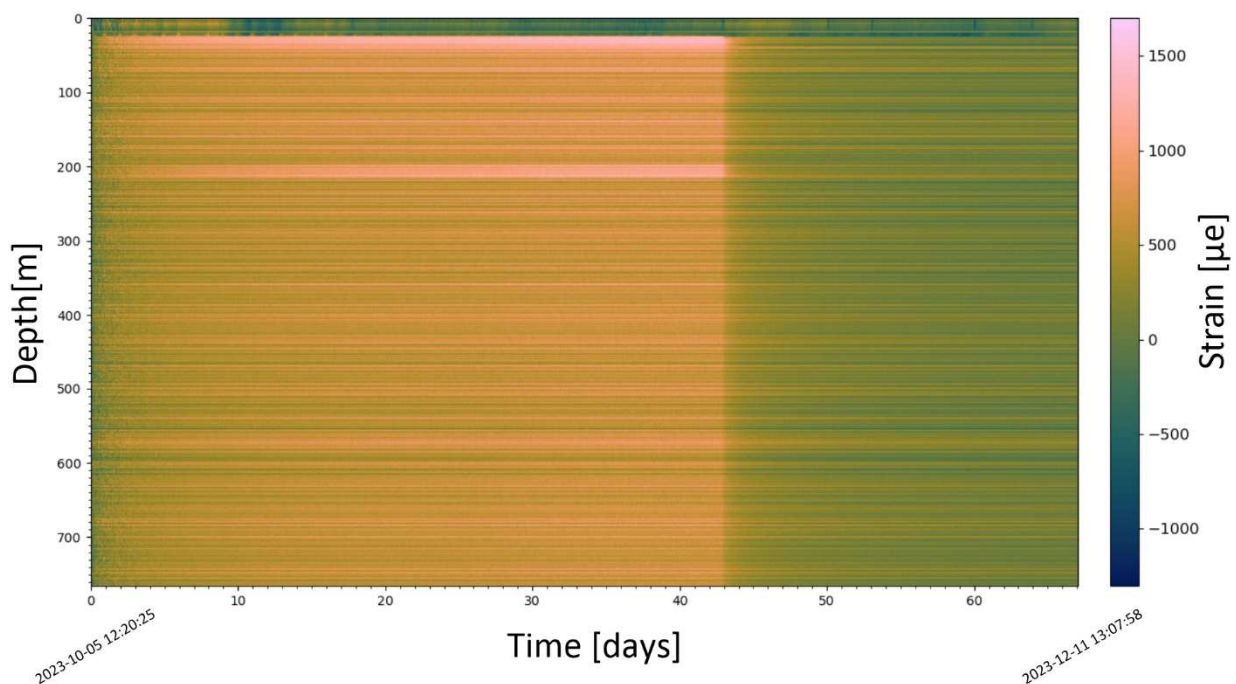


Abbildung 2: Strain-Messung – Die Abbildung zeigt den mit Aufheizung zunehmenden Strain (Abschaltung der Heizung nach ca. 43 Tagen).

Die Auswertung der DAS und DSS Daten ist noch nicht abgeschlossen. Hier wird auf den Schlussbericht der TU Darmstadt verwiesen.

6. Wichtige Erkenntnisse

Zusammenfassend verlief das Teilprojekt umfassend erfolgreich. Es kann gezeigt werden, dass die eingesetzte Glasfasertechnik (Hybridkabel) in ein Sonden-Bauwerk technisch funktionstüchtig einbaubar ist. Die Messungen liefern valide Werte in hoher Auflösung und Dichte.

Da das Projekt noch weiter läuft und somit noch nicht alle Datensätze vorliegen, muss für die Dateninterpretationen auf den Schlussbericht der TU Darmstadt verwiesen werden.

7. Angemessenheit der Forschungen

Die Anforderungen der Wärmewende erfordern neue Technologien. Hierzu zählen insbesondere thermische Speichersysteme wie der mitteltiefe Kristallinspeicher, der Gegenstand dieser Forschungsarbeiten ist. Hieraus ergibt sich der Bedarf eines dezidierten Verständnis im Gebirge installierter Wärmeübertrager, deren interne Wirkungsweise und deren Wechselwirkung mit dem Untergrund. Hierfür sind Messungen erforderlich, die die Wirkweise hochauflösend beschreiben. Dies führt zu Optimierungsmöglichkeiten im Übertrager-Design, im Speicherbetrieb und in der Fähigkeit Geo-Speicher durch mathematische Modelle zu Planen und zu dimensionieren. Dabei finden thermische und technisch mechanische Aspekte Berücksichtigung, die in der multidisziplinären Bauausführung und im Speicherbetrieb unabdingbar sind.

8. Verwertbarkeit

Die Ergebnisse liefern ein solides technisches Konzept zur Datenerhebung in vergleichbaren Vorhaben. Es kann gezeigt werden, dass die eingesetzte Messtechnik die notwendigen Daten zum Betrieb und zur Überwachung thermischer Untergrund-Speicher-Arrays liefern kann. Der Vorteil liegt in einer über weite Temperaturbereiche einsetzbaren Technik, einem „optischen Sensorsystem“ mit hoher Ortsauflösung und der Möglichkeit die Veränderungen „real time“ beobachten zu können. Zudem haben Glasfasern eine hohe Lebensdauer, sodass eine Überwachung über Jahrzehnte gewährleistet ist.

9. Fortschritte aus anderen Vorhaben

Derzeit sind keine Ergebnisse aus vergleichbaren Vorhaben bekannt.

10. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des dGRT wurden in

Applied Thermal Engineering, Volume 273, 15 August 2025, 126322, veröffentlicht:

Seib, L., et al.: Distributed geothermal response test on a 750 m deep borehole thermal energy storage system, Elsevier B.V. (2025) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126322>