

Forschungsbericht BWPLUS

Sichere und effiziente Nutzung von Geothermie in Baden- Württemberg SENG-LFZG

Teilbericht 2: Potenzialanalyse Tiefe Geothermie

von

Prof. Dr. Frank R. Schilling, Dr. Birgit Müller, PD Dr. Ernst Kiefer

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Angewandte Geowissenschaften,
Professur für Technische Petrophysik

Förderkennzeichen: L75 20115 – SENG-LFZG

Laufzeit: 01.01.2020 – 31.12.2022

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

November 2023



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

Verzeichnis der Abbildungen.....	2
Zusammenfassung	3
GIS-basierter Potenzial-Atlas für die Tiefe Geothermie in Baden-Württemberg.....	4
Motivation und Anforderungen für den Aufbau des Geo-Informationssystems	4
Verfügbarkeit der Informationen	5
Abbildung der Informationen im GIS-System	6
Raster-Datenverarbeitung und Datenanalyse	7
Quantitative Potenzialanalyse: Abschätzung der Energiemenge	10
Weiteres Vorgehen und Ausblick	12
Veröffentlichung der Ergebnisse	12
Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	12
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	12
Literatur.....	13
Referenzen aus der Arbeitsgruppe:.....	13
Publikationen (peer review)	13
Tagungsbeiträge	14

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Datenquellen des GIS-Systems

Abb. 2: Datenerfassung für die Raster-Datenbasis

Abb. 3: Raster-Datenverarbeitung

Abb. 4: Muschelkalk als Reservoir für die Tiefe Geothermie

Abb. 5: Buntsandstein und Jungpaläozoikum als Reservoir für die Tiefe Geothermie

Abb. 6: Quantitative Potenzialanalyse

Abb. 7: Zusatzinformationen für das Geothermie-GIS

Zusammenfassung

Um die Nutzung der Geothermie in Baden-Württemberg effektiv voranzutreiben, soll die Effizienz der Geothermie-Nutzung weiter gesteigert, von Projekten aus Nachbarländern gelernt und die Sicherheit der Anlagen weiter erhöht werden. Um Behörden und politischen Entscheidungsträger fundiert informieren und unterstützen zu können und Kommunen bei Vorhaben der tiefen Geothermie (z.B. Bürgeranhörungen etc.) unabhängig beraten und begleiten zu können wurden erste Schritte zur Erstellung von Potenzialkarten für verschiedene geothermische Nutzungsmöglichkeiten in Baden-Württemberg unternommen.

Diese Forschungsaktivitäten im LFZG unterstützen die Planung und Genehmigung tiefer Geothermiebohrungen durch die Bereitstellung erforderlicher detaillierter Vorkenntnisse des geologischen Untergrundes und dessen geophysikalische und petrophysikalische Parameter. Danach lassen sich vor Investitionsentscheidungen die Geothermiepotenziale modellieren und Vorprofile für Injektions- und Förderbohrungen oder Sondenfelder und Untergrundspeicher entwickeln.

Der geologische Untergrund des Bundeslandes Baden-Württemberg ist durch ein breites Spektrum groß- und kleinräumiger Untergrundstrukturen gekennzeichnet. Trotzdem ist der Erkundungsstand durch die mehr als 200-jährige Landeskartierung, die Kohlenwasserstoffexploration und die Grundwassererschließung vergleichsweise hoch, so dass praktisch für jeden Punkt in BW ein geologisch-geothermisches Profil prognostiziert werden kann. Durch die Notwendigkeit, künftige Geothermievorhaben schneller umzusetzen, müssen die geologisch-geophysikalischen Daten rasch in vergleichbaren Formaten und für einen breiten Anwenderkreis verfügbar sein.

Dazu entwickelt das LFZG ein GIS-System, das auf der geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25.000 und dessen Erläuterungen basiert. Die 306 Blätter wurden mit einem skalierbaren Raster untergliedert, das auf eine Datenbank zurückgreift. In dieser sind neben den stratigraphischen Profilen auch die geothermischen Parameter, sowie Informationen zur Reservoir-Geologie und dem Spannungsfeld abgelegt. Über eine Online-Oberfläche soll es künftig für jeden möglich sein, für einen beliebigen Punkt in Baden-Württemberg eine geologisch-geothermische Vorstudie zu erstellen.

Dazu wurde ein Monte-Carlo-Simulator entwickelt und getestet, der es erlaubt, auf der Basis von vorhandenen geologischen und petrophysikalischen Daten (z.B. Mächtigkeit verschiedener Formationen, Verteilung der Permeabilitäten in unterschiedlichen Formationen) erste Prognosen über die mögliche Nutzung des Untergrundes in verschiedenen Tiefen rasch und kostengünstig abschätzen zu können. Die Ergebnisse sollen im nächsten Schritt in ein entsprechendes GIS System integriert werden.

GIS-basierter Potenzial-Atlas für die Tiefe Geothermie in Baden-Württemberg

Die Wahl des geothermischen Konzepts zur effektiven Nutzung des Untergrunds durch die Tiefe Geothermie hängt vom geologischen Aufbau des Erdkörpers unter dem Kraftwerksstandort ab. Daher ist die Erkundung der Standortfaktoren essenziell für die Realisierung von Geothermieprojekten. Im Bereich der oberflächennahen Geothermie liefert das ThermoMap-Projekt, von EuroGeoSurveys, wichtige Daten für eine flächendeckende Abschätzung des geothermischen Potentials. Dabei steht die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds in einer Tiefe von bis zu 10 Metern in Fokus der Visualisierung. Die Heat Road MapEuropa (<https://heatroadmap.eu/peta4/>) zeigt grob aufgelöst die Temperaturen für 1 bzw. 2 km Tiefe im Untergrund.

Die Potenzialanalyse von LFZG-SENG, ausgearbeitet von Dr. Ernst Kiefer, betrachtet die geologischen Standortfaktoren zum Aufbau des tiefen, geologischen Untergrunds unter der Landesflächen von Baden-Württemberg und erlaubt es, die möglichen geothermischen Nutzungshorizonte für einzelne Regionen standortgenau zu identifizieren, um eine Planung geothermischer Anlagen zu ermöglichen. Die Karten können daher auch Stadtwerke in einem Frühstadium der Planung unterstützen, z.B. bei der Entscheidung ob sich Geothermie an einem Standort in Form von oberflächennaher Geothermie, Tiefer Geothermie oder Wärmespeichern anbietet. Die ersten Ergebnisse wurden im 1. Quartal 2023 veröffentlicht.

Motivation und Anforderungen für den Aufbau des Geo-Informationssystems

Das Landesforschungszentrum Geothermie führte in den vergangenen Jahren zahlreiche Öffentlichkeitsveranstaltungen durch und betrieb Messestände (Stuttgart, Karlsruhe, Offenburg) zum Thema „Tiefe Geothermie“, um die Risiken und Chance der breiten Öffentlichkeit vorzustellen. Dabei tauchten stets die gleichen Fragen auf, die den konkreten Wohnort betreffen: Welche geothermischen Konzepte können an meinem Heimatort wirtschaftlich realisiert werden? Da Personen aus dem gesamten Bundesland auf das LFZG zukamen, war schnell klar, dass neben den geothermischen Konzepten vor allem auch für die Regionalgeologie und die lokalen geothermischen Randbedingungen eine Plattform geschaffen werden muss, um auch Lösungsansätze vor Ort anbieten zu können.

Als ein Lösungsansatz bietet sich dazu ein geographisches Informationssystem (GIS) an. Es gibt bereits Informationssysteme, beispielsweise das ISONG für die oberflächennahe Geothermie. Was aber für die Tiefe Geothermie benötigt wird, ist ein Informationssystem, welches die Baden-Württemberg-typische Geologie bis zum Top Basement abbildet und ein vereinfachtes Vorprofil für mögliche Geothermie-Bohrungen zurückgibt. Außerdem muss es schnell, robust und preiswert sein. Zudem soll eine Abfrageplattform geschaffen werden, die auch der breiten Öffentlichkeit eine Möglichkeit zu Abfrage bietet.

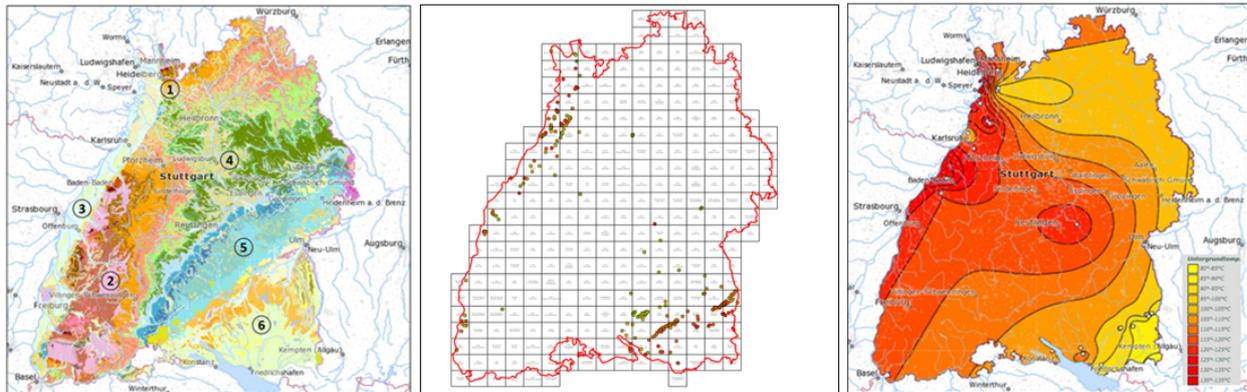


Abb. 1: Datenquellen des GIS-Systems. Informationen zu Tiefen Geothermie gehen im Wesentlichen auf 3 Quellen zurück: Die geologische Kartierung der Tagesoberfläche (Grafik links) deckte die Landesflächen von Baden-Württemberg vollständig ab. Die Kartierung stützt sich auf die Geologische Karte 1:25.000 (Grafik Mitte), die mehr als 300 Kartenblätter umfasst. Hinzukommen Tiefbohrungen aus der Kohlenwasserstoffexploration und -produktion (Punktdaten). Aus mehreren Tausend Flach- und Tiefbohrungen wurden Temperaturdaten gewonnen, aus welchen geothermischen Karten für Tiefen bis zu 2500 m berechnet werden konnten (Grafik links für die Tiefe von 2500 m unter Gelände). Die Farbskalen illustrieren die heißeren und kühleren Gebiete im Untergrund von Baden-Württemberg und damit die geothermischen Potenziale.

Verfügbarkeit der Informationen

Die Geologie in den verschiedenen Landesteilen ist durch die lange Kartiergeschichte sehr gut bekannt (Abb. 1), so dass wir überall schnell in die Tiefe sehen können. Nahezu die gesamte Landesfläche ist historisch durch eine geologische Karte 1:25.000 kartiert. Die meisten Kartenblätter sind mit Erläuterungen ausgestattet. Dahinter stehen die Kartierberichte, welche alle geologischen und hydrogeologischen Informationen in hoher, räumlicher Auflösung darstellen. Mit beiden Informationsquellen lässt sich die Oberflächengeologie in die Tiefe extrapolieren, um Voraussagen über mögliche geothermische Reservoirs zu ermöglichen. Zusätzlich stehen Daten aus Tausenden von Flach- und Tiefbohrungen zur Verfügung, insbesondere im Oberrheingraben und im Molassebecken, die auf die Kohlenwasserstoffindustrie zurückgehen. Aus Bohrungs- und Temperaturdaten wurden auch Temperaturkarten für bestimmte Tiefenstufen abgeleitet, aus welchen sich für jeden Landesteil ein lokaler Gradient berechnen lässt.

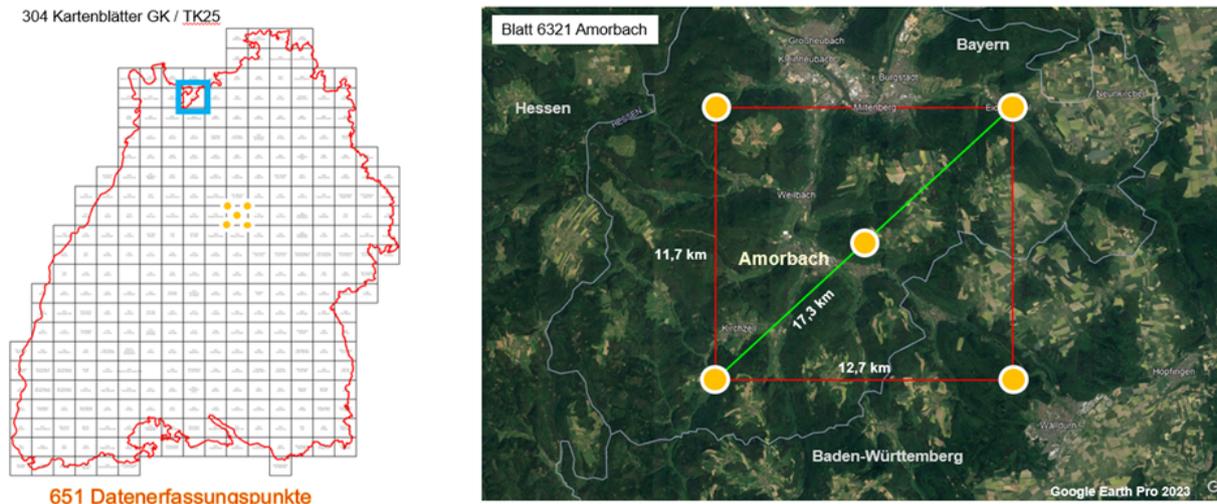


Abb.2: Datenerfassung für die Raster-Datenbasis. Die Datenbasis des GIS-Systems beruht auf digitalisierten Punktdaten, die an den Eck- sowie dem Mittelpunkt jeder der 304 verwendeten Kartenblätter der GK25 aufgenommen wurden. Daraus ergeben sich insgesamt 651 Datenerfassungspunkte, die sich durch ihre geographischen Koordinaten unterscheiden. Für jedem Punkt werden mehrere geologische und geothermische Informationen in der DB abgelegt.

Abbildung der Informationen im GIS-System

Dazu wurde ein Raster-basiertes GIS gewählt, um die gesamte GK25 in einem Punktgitter (Abb. 2) zu diskretisieren. Dieses besitzt eine 5-Punkt-Geometrie, mit jeweils einem Datenerfassungspunkt an jeder Ecke einer geologischen Karte 1:25.000 (GK25), sowie einem zusätzlichen Punkt in der geometrischen Mitte. Insgesamt ergeben sich so 651 Datenerfassungspunkte, an welchen die geologischen und geothermischen Informationen digitalisiert und in einer EXCEI-Datenbank abgelegt wurden. Folgende Datensätze wurden bisher digital erfasst, um eine erste lauffähige Test-Version des GIS-Systems zu erhalten:

- Topographische Höhe (m ü. NN)
- Temperatur (°C) in 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m und 2500 m Tiefe
- Geothermischer Gradient (°C/100 m): Berechnung anhand der Temperaturkarten
- Mächtigkeit: Oberkarbon-Rotliegend (Rotliegend-Tröge)
- Mächtigkeit: Buntsandstein
- Mächtigkeit: Muschelkalk
- Mächtigkeit: Keuper
- Mächtigkeit: Lias
- Mächtigkeit: Dogger
- Mächtigkeit: Malm
- Mächtigkeit: Känozoikum

Die Digitalisierung weiterer geologischer und geothermischer Datensätze sind geplant. Bereits in der GIS-Datenbank digital vorhanden sind auch die 11.000 Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg mit geographischen Koordinaten und der Bevölkerungszahl, die Wasserschutzgebiete als Ausschlussflächen für Aufsuchungstätigkeiten, die Topographie in hoher Auflösung, die Gewässer und Flussläufe, sowie die politischen Grenzen von Bundesland, RPs, und Landkreisen.

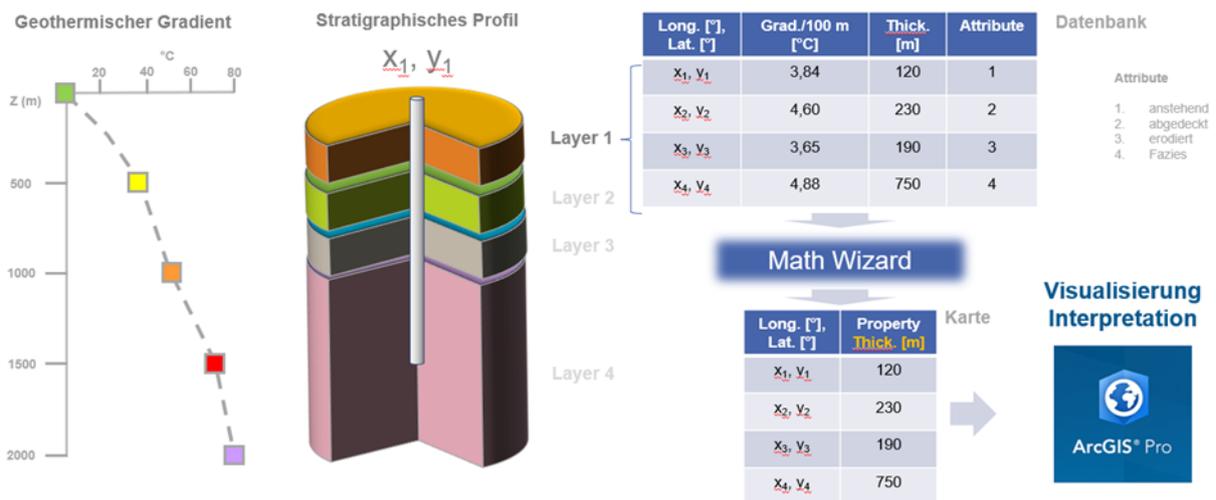


Abb. 3: Raster-Datenverarbeitung- Schemazeichnung. Eingangsparemeter ist der geothermische Gradient, das stratigraphische Profil, das in die Datenbank überführt wird, aus der die Resultate nach Abfragen visualisiert werden.

Raster-Datenverarbeitung und Datenanalyse

Im ersten Schritt werden die geothermischen Karten diskretisiert und an jedem der 651 Datenerfassungspunkte der geothermische Gradient berechnet. Im zweiten Schritt entwickelten wir aus der Geologie an der Tagesoberfläche und den Mächtigkeitskarten für jeden der 651 Datenerfassungspunkte ein geologisches Profil, d.h die geologische Schichtenfolge wird nach Mächtigkeiten der einzelnen Formation übereinandergestellt. Beide Informationsgruppen fließen in eine Datenbank ein. Da Baden-Württemberg ein Schichtstufenland und großen Grundgebirgsaufbrüche aufweist, werden noch Zusatzinformationen benötigt, um zu filtern, welche Formationen an einem bestimmten Ort direkt an der Tagesoberfläche ansteht, ob sie erodiert ist oder von jüngeren Deckschichten abgedeckt sind. Die Idee dahinter ist, nur Standort für die Tiefe Geothermie in Betracht zu ziehen, die durch jüngere Deckschichten vom Grundwasserbereich getrennt sind. Dazu verwenden wir zusätzlich zur Mächtigkeit einer Formation noch Attribute, welche durch einfache Ganzzahlen abgebildet werden. Diese Attribute dienen später bei der Kartenberechnung als Filterkriterien.

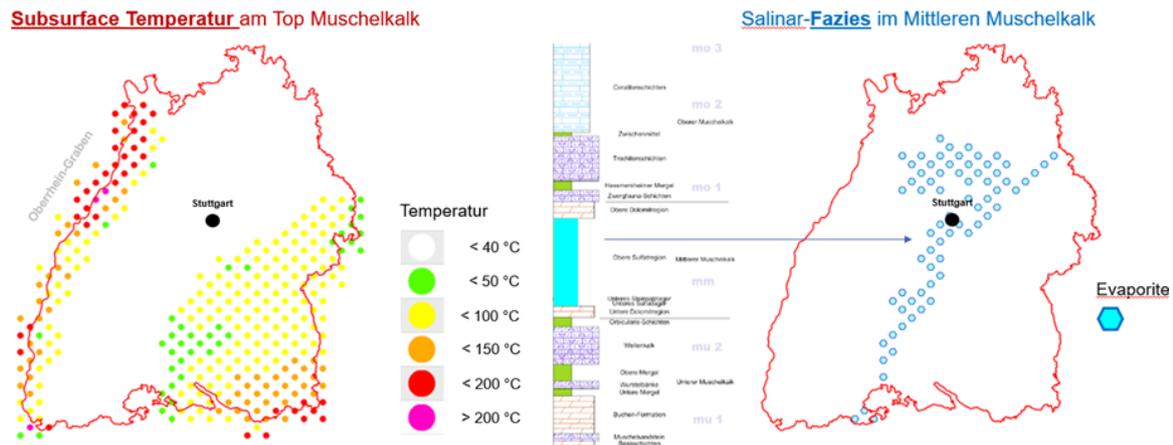


Abb. 4: Muschelkalk als Reservoir für die Tiefe Geothermie. Farblich dargestellt sind alle Koordinatenpunkte, an welchen das potenzielle Muschelkalk-Reservoir durch mindestens eine Deckschicht vom Grundwasserbereich abgetrennt ist. Die Farben kodieren die Prognose für die Reservoirtemperatur. Die nicht dargestellten Koordinatenpunkte sind entweder erodiert oder besitzen keine schützende Deckschicht. Die rechte Karte zeigt die Koordinatenpunkte an welchen im Mittleren Muschelkalk (siehe Profil) verschiedene Evaporite erwartet werden können, die Wärme besonders effektiv zur Tagesoberfläche leiten. Diese Lokationen wurden durch ein Attribut indiziert und werden so bei der Abfrage erkannt.

Sobald die geothermischen und geologischen Informationen digitalisiert und in der Datenbank strukturiert sind, kann man mit einem Rechenwerk Informationen gewinnen und daraus neue Karten berechnen. Beispiel für eine Abfrage in der Datenbank: Ausgabe aller Koordinatenpunkte, an welchen das Buntsandstein-Reservoir mindestens eine geologische Deckschicht aufweist und eine Temperatur größer als 75 °C besitzt. Das Rechenwerk berechnet danach eine neue Karte mit den Punkten, an welchen die Abfragekriterien zutreffen. Zusätzlich lassen sich die Temperaturen als Farbcode darstellen. Die Karte wird im nächsten Schritt in **ArcGIS** Pro als Punktraster-Layer geladen und mit Hilfe der grafischen Werkzeuge visualisiert. Schließlich kann nach Überlagerung mit anderen GIS-Layern die Interpretation erfolgen.

Abbildungen 3 und 5 zeigen Beispiele für die aus den Datenbankinformationen neu berechneten Karten. An ihnen sind alle Punkte in Baden-Württemberg visualisiert, an welchen der Muschelkalk überdeckt ist und eine Reservoir-Temperatur größer 40 °C zu erwarten ist. An allen weiß erscheinenden Punkten wurde der Muschelkalk erodiert oder liegt an der Tagesoberfläche an und steht daher für eine geothermischen Nutzung nur eingeschränkt zur Verfügung. Die zweite Karte beleuchtet einen faziellen Aspekt des Muschelkalks, nämlich die Lokationen, an welchen Evaporite im Untergrund auftreten. Aus dem dort erhöhten Wärmefluss ergeben sich möglicherweise neue Nutzungsmöglichkeiten.

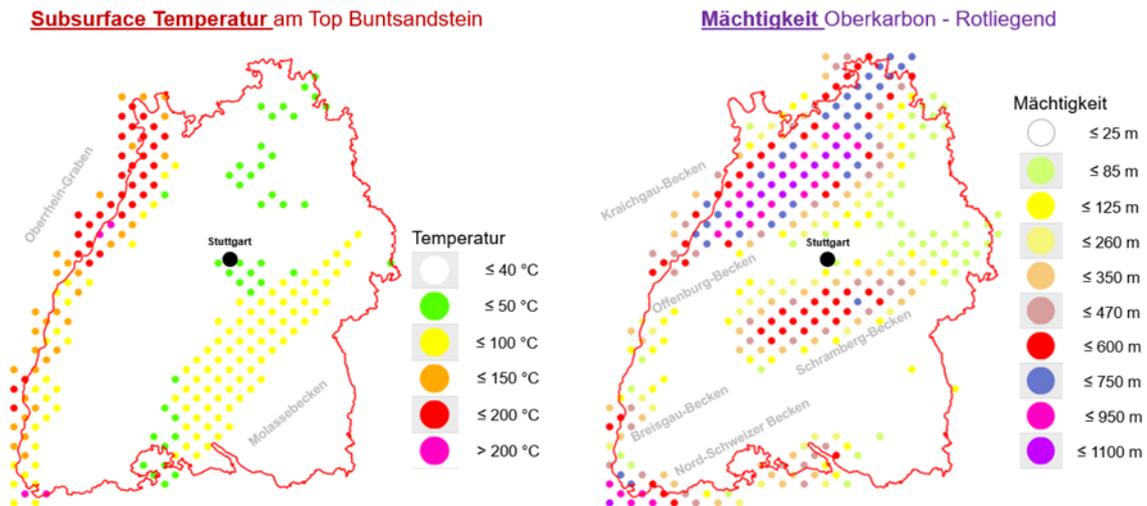


Abb. 5: Buntsandstein und Jungpaläozoikum als Reservoir für die Tiefe Geothermie. Das Buntsandstein-Reservoir (Karte links) kann vor allem im Oberrheingraben und unter dem Vorland der Schwäbischen Alb für die Tiefe Geothermie entwickelt werden. In den Gebieten um den Schwarzwald und dem Odenwald ist der Buntsandstein entweder erodiert oder die Bedeckung fehlt. Im südöstlichen Molassebecken ist der Buntsandstein nicht vorhanden. Oberkarbon und Rotliegend konzentrieren sich auf Grabenstrukturen im kristallinen Basement. Sehr mächtig sind die Ablagerungen im Kraichgau-Trog (-Becken), im Schramberg-Trog und im Breisgau-Trog im südlichen Oberrheingebiet.

Das zweite Kartenbeispiel (Abb. 5, links) zeigt die Lokationen in Baden-Württemberg, an welchen der Buntsandstein als tiefes, mesozoisches Geothermie-Reservoir entwickelt werden könnte. Die Farben zeigen die erwarteten Untergrundtemperaturen an. Aber auch unterhalb des Buntsandstein-Reservoirs können noch verborgene Potenziale vorhanden sein, die bisher noch kaum untersucht wurden. Die Karte (Abb. 5, rechts) zeigt die sogenannten Rotliegend-Tröge in Baden-Württemberg. Dabei handelt es sich um jungpaläozoische, tektonische Gräben, die noch vor der Transgression des Zechsteins entlang von alten Störungszonen einbrachen. Die Gräben sind mit bis zu 1.000 m mächtigen Rotsedimenten und Vulkaniten gefüllt und weisen wahrscheinlich hohe Wärmepotenziale auf, da sie tief in die Erdkruste eingeschnitten sind. Interessant ist, dass sie auch aus dem Oberrheingraben bekannt sind und auch im nördlichen Baden-Württemberg auftreten, wo flachere Reservoirs wegen zu geringer Überdeckung ausfallen. Aus den wenigen Tiefbohrungen, die das Rotliegend erschließen, ist bekannt, dass die feinkörnigen Sedimente zwar kaum Matrixporosität aufweisen, aber wegen der hohen Kompaktion stark geklüftet sein können. Dies bedingt die Möglichkeit einer klufftgebundenen Thermalwasserführung.

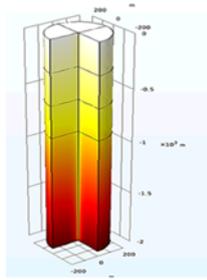
Heat-in-Place

Monte Carlo Simulator **KASIMIR**

$$H_0 = V * [(1 - \phi) * \rho_m * c_m + \phi * \rho_f * c_f] * (T_r - T_0)$$

Parameter als Mean & Std. Dev.

(Agemar et., 2018)



(COMSOL Modell cf. Müller, 2022)

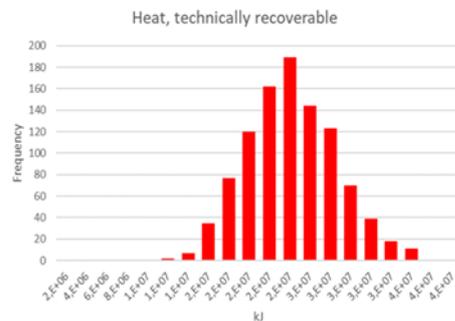


Abb. 6: Quantitative Potenzialanalyse. Eine von zahlreichen Möglichkeiten, das geothermische Potenzial in einem Reservoir zu berechnen, ist die Heat-in-Place-Kalkulation nach Agemar *et al.* (2018). Der deterministische Ansatz für einen Zylinder (links) wurde zu dem Monte-Carlo-Simulator KASIMIR weiterentwickelt, welche die Größe Heat-in-Place eines Gesteinskörper als Gauss-Verteilung (Mitte) darstellt. Diese kann zusätzlich in einem Wahrscheinlichkeitsgitter (rechts) dargestellt werden.

Quantitative Potenzialanalyse: Abschätzung der Energiemenge

Zur Abschätzung der Energiemenge, die zumindest theoretisch an einer Lokalität geschöpft werden könnte, werden in der Literatur ganz verschiedene mathematisch-physikalische Ansätze vorgeschlagen. Eine sehr einfache Betrachtungsweise ist die Berechnung der der Heat-in-Place in Kilojoule (KJ). Dabei wird die Wärmemenge in einem Gesteinsvolumen bestimmt. Ein Teil davon kann durch eine Erdwärmebohrung aus dem Gesteinsvolumen abgeführt und technisch genutzt werden. Dazu wurde der einfache Ansatz von Agemar *et al.* (2018) herangezogen (Abb.6) der zusätzlich zur spezifischen Wärmekapazität der Gesteinsmatrix auch die spezifische Wärmekapazität des im Porenraum vorhandenen Fluids (Tiefengrundwasser) berücksichtigt. Zusätzlich kann zukünftig ein Ausbeutefaktor eingeführt werden um für eine Energieentnahme (z.B. Brunnen) nur den Teil der Wärme den Berechnungen zugrunde zu legen der durch einzelne Maßnahmen aus dem Gesteinsvolumen gewinnbar ist.

Für den Ansatz von Agemar *et al.* (2018) kann zunächst eine deterministische Lösung gefunden werden. Dazu wird für jeden Parameter ein fester Wert eingesetzt und man erhält eine einzige Lösung. In einem größeren Gesteinsvolumen im Untergrund unterliegen die Werte (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Porosität) räumlichen Schwankungen, bzw. sie können nicht unbedingt exakt angegeben werden. Dennoch kann man für jeden Parameter eine Schwankungsbreite innerhalb gewisser Grenzen angeben. Dazu drücken wir die Eingangswerte in Form eines Mittelwertes (Mean) und der Standardabweichung aus und verwenden dazu eine sogenannte Monte-Carlo-Simulation. Dabei werden die Werte mit Hilfe eines Zufallsgenerators geringfügig variiert und nach dem genannten Formelansatz berechnet. Wiederholt man den Rechenprozess rekursiv, erhält man das Ergebnis, Heat-in-

Place, als Gauss-Verteilung. Damit ist der Lösungsansatz probabilistisch. Der MC-Simulator wurde in EXCEL programmiert und für die Heat-in-Place-Berechnung erfolgreich getestet.

Die Bezeichnung für den Simulator KASIMIR steht für **K**arlsruhe **S**imulator für geothermal **A**nalysis of **M**inerals und **R**ocks. Der Simulator kann die Berechnung in kurzer Zeit mehrere Tausend Mal durchführen. Man kann das Ergebnis in einem Wahrscheinlichkeitsgitter abbilden und die Wahrscheinlichkeit für das Wärmepotenzial in einer bestimmten Größenordnung grafisch darstellen.

Aktuell gibt es mit diesem MC-Prototyp noch keinen flächendeckenden Berechnungen für ein bestimmtes Geothermie-Reservoir (Buntsandstein, Muschelkalk), deren Ergebnisse man im vorgestellten GIS-System darstellen könnte. Diese Ausbauschnitt ist für die nächste Zukunft geplant.

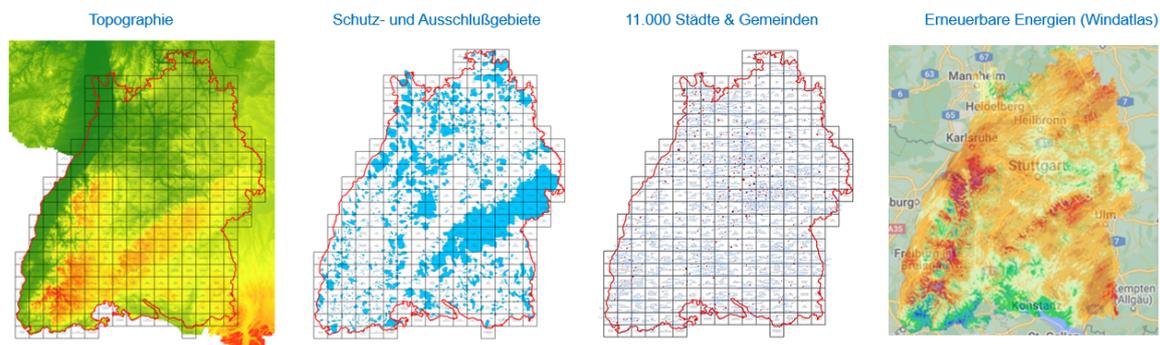


Abb. 7. Zusatzinformationen für das Geothermie-GIS. Das Nutzungspotenzial der Tiefen Geothermie orientiert sich nach den Verbrauchskennzahlen aber auch nach der Verfügbarkeit anderer, erneuerbarer Energieformen. Dazu sollen weitere Informations-Layer in das Geothermie-GIS eingeführt werden. Wichtig sind die Topographie (1. Karte von links), die Wasserschutzgebiete (2) und FFH-Gebiete als Ausschlussflächen, die Besiedlungsdichte (3), sowie Energiedichtekarten für Solar- und Windenergie (4).

Die bisherigen Erfahrungen bestätigen, dass das GIS-System robust ist und sehr schnell arbeitet, sofern die Digitalisierung vorher sorgfältig vorgenommen wurde. Informationslücken gibt es in den Randgebieten an der Landesgrenze, die man aber mit einigem Aufwand beheben kann. Insbesondere im Oberrheingebiet, wo wir große Potenzial erwarten, müssen noch Ergänzungen vorgenommen und Daten aus Frankreich und Rheinland-Pfalz herangezogen werden. Möglicherweise weist auch das derzeit verwendete 5-Punkt-Raster eine zu geringe Auflösung auf und muss verdichtet werden. Zur Entwicklung konkreter Geothermie-Projekte brauchen wir aber auch noch andere, nicht-geologische Informationen wie Topographie, Ausschlussgebiete, Siedlungsgrößen- und -dichten, sowie Informationen über die Verfügbarkeit anderer, erneuerbare Energieformen; als Beispiel hier der Windatlas.

Weiteres Vorgehen und Ausblick

Langfristig sollen die Datenbasis, das Rechenwerk und die Potenzialkarten an das LGRB überführt werden, damit sie dort wie das System ISONG als Online-Plattform der allgemeinen Öffentlichkeit, den Genehmigungsbehörden und den Trägern öffentlicher Belange für eigene Analysen zur Verfügung gestellt werden können.

Veröffentlichung der Ergebnisse

Vortrag auf der GeoTHERM 2023: GIS-basierter Potenzial-Atlas für Tiefe Geothermie in Baden-Württemberg (GIS-based atlas of deep geothermal potentials in the federal state of Baden-Württemberg) durch Ernst Kiefer, LFZG - Landesforschungszentrum Geothermie (LFZG), Baden-Württemberg, im Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch die Publikationen und Transferaktivitäten können die Ergebnisse in der Wissenschaft genutzt, für die Information der Öffentlichkeit eingesetzt und zur Beratung von Bürgern, Träger öffentlicher Belange, Behörden und Ministerien verwendet werden. Aufbauend auf den Ergebnissen können Geothermievorhaben sicherer, effektiver und nachhaltiger entwickelt, gebaut und betrieben werden. Diese Potenzialkarten sind die Grundlage, um die Möglichkeiten zur Nutzung der Geothermie in Abhängigkeit von der Region für z. Bsp. für Stadtwerke darzulegen. Derzeit bestehen noch sehr heterogene Erwartungen im Hinblick auf die geothermische Nutzung. Mit Hilfe der Karten kann relativ einfach erklärt werden, welche geothermische Nutzung überhaupt in Frage kommt.

Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Projektergebnisse können auch im Hinblick auf weitere Nutzungen des Untergrunds angewendet werden. Dazu gehört z.B. die Nutzung für die Lagerung radioaktiven oder auch anderer Abfälle. Dies gilt z. B. für die Mächtigkeit der verschiedenen Formation, die Verteilung der petrophysikalischen Parameter. Als projektfremde Anwendung können die Potenzialkarten auch für die geologische CO₂-Speicherung und die Untertage-Speicherung von Wasserstoff aber auch klassisch von Erdgas verwendet werden.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Vorhaben wurden im Wesentlichen Personalmittel für die Forschungsaktivitäten (s.o.) und den Wissenstransfer (insbesondere Grafikerin) eingesetzt, sowie Logging-Equipment und Dienstreisen finanziert.

Ohne die Förderung hätten die oben diskutierten und hier zusammengefassten Aufgaben nicht im beschriebenen Umfang durchgeführt werden können.

Literatur

Agemar, T., Weber, J. und I. Moeck (2018): Assessment and Public Reporting of Geothermal Resources in Germany: Review and Outlook, **Energies* 2018, 11(2), 332; <https://doi.org/10.3390/en11020332>

Informationssystem oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg (ISONG) (lgrb-bw.de)

Referenzen aus der Arbeitsgruppe:

Publikationen (peer review)

- Ahlers, S.; Henk, A.; Hergert, T.; Reiter, K.; Müller, B.; Röckel, L.; Heidbach, O.; Morawietz, S.; Scheck-Wenderoth, M.; Anikiev, D. (2021) *3D crustal stress state of Germany according to a data-calibrated geomechanical model*, *Solid Earth*, 12 (8), 1777–1799. doi:10.5194/se-12-1777-
- Ahlers, S.; Röckel, L.; Hergert, T.; Reiter, K.; Heidbach, O.; Henk, A.; Müller, B.; Morawietz, S.; Scheck-Wenderoth, M.; Anikiev, D. (2022) *The crustal stress field of Germany: a refined prediction*, *Geothermal Energy*, 10 (1), Art.Nr. 10. doi:10.1186/s40517-022-00222-6
- Breuer, S.; Schilling, F. (2020), *Quartz single crystal thermal diffusivity measurements by laser flash method: from -120 °C through the α - β phase transition to 800 °C* - Daten
doi:10.5445/IR/1000119716
- Breuer, S.; Schilling, F. R. (2021) *Anisotropic thermal transport properties of quartz: from -120 °C through the α - β phase transition*. *European journal of mineralogy*, 33 (1), 23–38.
doi:10.5194/ejm-33-23-2021
- Breuer, S.; Schwotzer, M.; Speziale, S.; Schilling, F. R. (2020) *Thermoelastic properties of synthetic single crystal portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Temperature-dependent thermal diffusivity with derived thermal conductivity and elastic constants at ambient conditions*. *Cement and concrete research*, 137, Art. Nr.: 106199. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106199
- Chaparro, M. C.; Klose, T.; Hirsch, A.; Schilling, F.; Butscher, C.; Blum, P. (2021) *Modelling of wellbore cement alteration due to CO_2 -rich brine interaction in a large-scale autoclave experiment*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 110, Art.-Nr.: 103428.
doi:10.1016/j.ijggc.2021.103428
- Danisi, R. M.; Schilling, F. R. (2021) *Dehydration and lithium ion-exchange of the open framework vanadium silicate VSH-16Na*. *Microporous and mesoporous materials*, 319, Article no: 111064.
doi:10.1016/j.micromeso.2021.111064
- Huttenloch, P.; Zorn, R.; Steger, H.; Schilling, F.; Hater, W. (2021) *Performance of corrosion inhibitors on carbon steel in the geothermal environment of the Upper Rhine Graben (URG) depending on inhibitor concentration, temperature and hydrodynamic conditions - A laboratory study*. *Geothermics*, 92, Article no: 102047. doi:10.1016/j.geothermics.2021.102047
- Ismail-Zadeh, A.; Adamia, S.; Chabukiani, A.; Chelidze, T.; Cloetingh, S.; Floyd, M.; Gorshkov, A.; Gvishiani, A.; Ismail-Zadeh, T.; Kaban, M. K.; Kadirov, F.; Karapetyan, J.; Kangarli, T.; Kiria, J.; Koulakov, I.; Mosar, J.; Mumladze, T.; Müller, B.; Sadradze, N.; Safarov, R.; Schilling, F.; Soloviev, A. (2020) *Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus*, *Earth science reviews*, 207, Article: 103222. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103222
- Klose, T.; Chaparro, M. C.; Schilling, F.; Butscher, C.; Klumbach, S.; Blum, P. (2021) *Fluid Flow Simulations of a Large-Scale Borehole Leakage Experiment*. *Transport in porous media*, 136, 125–145. doi:10.1007/s11242-020-01504-y
- Morawietz, S.; Heidbach, O.; Reiter, K.; Ziegler, M.; Rajabi, M.; Zimmermann, G.; Müller, B.; Tingay, M. (2020) *An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions*, *Geothermal Energy*, 8 (1), Art. Nr.: 25. doi:10.1186/s40517-020-00178-5
- Niederhuber, T.; Kruszewski, M.; Röckel, T.; Rische, M.; Alber, M.; Müller, B. (2022) *Stress orientations from hydraulic fracturing tests in the Ruhr area in comparison to stress orientations from borehole observations and earthquake focal mechanisms*, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 173 (4), 625–635.
doi:10.1127/zdgg/2022/0352

- Otten, C., Dassler, B., Teitz, S., Iannotta, J., Eichinger, F., Seibt, A., Kuhn, D., and Würdemann, H. (2021) *Interactions between the calcium scaling inhibitor NC47.1 B, geothermal fluids, and microorganisms – results of in situ monitoring in the Bavarian Molasse Basin (Germany) and accompanying laboratory experiments*, Advances in Geosciences. DOI: 10.5194/adgeo-54-217-2021
- Röckel, L.; Ahlers, S.; Müller, B.; Reiter, K.; Heidbach, O.; Henk, A.; Hergert, T.; Schilling, F. (2022) *The analysis of slip tendency of major tectonic faults in Germany*, Solid Earth, 13 (6), 1087–1105. doi:10.5194/se-13-1087-2022
- Gudehus, G., Lempp, C., Röckel, L.; Müller, B. I. R.; Ahlers, S.; Reiter, K.; Hergert, T.; Henk, A.; Heidbach, O.; Schilling, F. (2022) *3D fault sets of Germany and adjacent areas*, data-set published under doi:10.5445/IR/1000143465
- Scheffzük, C., Müller, B.I., Schilling, F.R. (2022) *Depletion-induced seismicity in NW-Germany: lessons from comprehensive investigations*. Acta Geotechnica. DOI: 10.1007/s11440-022-01513-9

Tagungsbeiträge

- Allgaier, F.; Busch, B.; Niederhuber, T.; Müller, B.; Hilgers, C. (2021) *Fracture network characterization and DFN modelling of the Upper Carboniferous, Ruhr Area, Germany*, GeoKarlsruhe (DGGV 2021), Karlsruhe, Deutschland, 19.–24. September 2021
- Allgaier, F.; Niederhuber, T.; Quandt, D.; Busch, B.; Müller, B.; Hilgers, C. (2021) *Integrating digitized fracture data in geological 3D models, Upper Carboniferous, Ruhr area, Germany*, DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung "Shaping the Energy Transition with Upstream and Storage Technologies" (2021), Online, 21. April 2021
- Kiefer, Ernst (2023) *GIS-basierter Potenzial-Atlas für Tiefe Geothermie in Baden-Württemberg (GIS-based atlas of deep geothermal potentials in the federal state of Baden-Württemberg)* Vortrag auf der GeoTHERM 2023:
- Niederhuber, T.; Müller, B. I. R.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F.; Aberle, B. (2022) *Geomechanics in Underground Technologies for Renewable Energy supply: The example of Enguri power tunnel leakage*, DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung 2022 – Geo-Energy-Systems and Subsurface Technologies – Key Elements towards a Low Carbon World (2022), Celle, Deutschland, 15.–16. Juni 2022
- Niederhuber, T.; Müller, B. I. R.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F.; Aberle, B. (2022) *Geomechanical explanation of the Enguri power tunnel leakage*, EGU21: European Geosciences Union General Assembly (EGU 2022), Wien, Österreich, 23.–27. Mai 2022. doi:10.5194/egusphere-egu22-11830
- Niederhuber, T.; Müller, B.; Müller, L.; Röckel, T.; Schilling, F.; Allgaier, F.; Rische, M. (2021), *Slip tendency of faults and pore pressure evolution in the "Wasserprovinz Haus Aden" – Ruhr area*, GeoKarlsruhe (DGGV 2021), Karlsruhe, Deutschland, 19.–24. September 2021
- Niederhuber, T.; Müller, B.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F. (2021) *Numerical modeling of the stress state around the Enguri power tunnel*, GeoKarlsruhe (DGGV 2021), Karlsruhe, Deutschland, 19.–24. September 2021
- Silva P.N., R.V.Erhan, C.Scheffzük and J.A.C.P.Gomes. *Preliminary study of residual stress distribution in high strength steel wires at EPSILON neutron diffractometer*. Condensed Matter Researches at IBR-2 neutron source, 12 - 16 October 2020, Dubna
- Schilling F.R., B.I.R.Müller, V.V.Sikolenko, *EPSILON - German time-of-flight high resolution diffractometer at the high flux pulsed IBR-2 reactor: current state and scientific applications*. German Neutron Scattering Conference, 8 - 10 December 2020, Garching
- Stricker, K. R.; Schimschal, S.; Müller, B.; Wessling, S.; Bender, F.; Kohl, T. (2021) *New insights on the origin of borehole breakouts from LWD observations*, 14. Celle Drilling - International Conference and Exhibition for Advanced Drilling Technology (2021), Online, 14. September 2021