

**DEPARTEMENT
BAU, VERKEHR UND UMWELT**

Abteilung Energie

Energiewirtschaft

4. November 2025

TECHNISCHER BERICHT

Geothermiefotenzial im Kanton Aargau

Zusammenfassung

Von November 2022 bis September 2025 wurde durch die Abteilung Energie des Departements Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) das Potenzial für Tiefengeothermie im Kanton Aargau basierend auf dem Muschelkalk-Aquifer als Zielschicht ermittelt.

Das Hauptziel dieser Arbeiten besteht in der Darlegung einer fachlichen Grundlage als Kataster mittels räumlicher Analyse über das geothermische Ressourcenpotenzial im Kanton Aargau. Dabei wird in einem im Zusammenhang mit Geothermie neuartigem Ansatz auch das wirtschaftliche Absatzpotenzial an der Oberfläche durch vorhandene Infrastrukturen, wie etwa Strom- und Fernwärmeleitungen sowie die Wärmenachfrage approximiert. Diese werden zusammen mit geologischen Gegebenheiten im Untergrund auf der Zielschicht des Muschelkalk-Aquifers zum Geothermiefotenzial kombiniert.

Die Ergebnisse attestieren dem Aargau ein intaktes Geothermiefotenzial, insbesondere in den südlichen Teilen des Kantons, wo der Muschelkalk auf Tiefen von nahezu vier Kilometer abtaucht und somit für die direkte Wärme- und Stromnutzung interessante Temperaturbereiche bietet.

Als eine mögliche Erweiterung des Katasters ist die Berücksichtigung eines weiteren geologischen Analysehorizonts – beispielsweise jene des kristallinen Grundgebirges – denkbar. Ein auf solche Gegebenheiten abzielendes Geothermieprojekt würde auch in Gebieten des Kantons auf Potenzial stossen, wo der Muschelkalk untief liegt oder gänzlich fehlt.

Die Eignungskarten des Ober- und Untergrundes, welche in Kombination das Geothermiefotenzial bestimmen, basieren auf Modellen und weisen entsprechende Unsicherheiten bezüglich Interpretation und Verlässlichkeit auf. Die Karten stellen deshalb eine erste Grundlage sowie ein nützliches Planungsinstrument dar, insbesondere in einer frühen Projektfindungsphase, ersetzen jedoch keine detaillierte projektspezifische Due Dilligence.

Autoren in alphabetischer Reihenfolge: Deininger Sebastian, Eggenberger Kurt, Lendenmann Delia

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
Abkürzungsverzeichnis	3
1. Einleitung	5
1.1 Ausgangslage und Motivation	6
1.1.1 Nationaler rechtlicher Rahmen	6
1.1.2 Kantonale Energiepolitik	7
1.2 Assoziierte Arbeiten	8
1.2.1 Nationale Wärmeflusskarte	8
1.2.2 Überarbeitung nationale Wärmeflusskarte	8
1.2.3 Kantonale Wärmeflusskarte	9
1.2.4 Geothermiekataster Kanton Waadt.....	9
1.3 Ziel und Zielgruppe des Produkts	9
1.4 Technologien.....	9
2. Umsetzung	10
2.1 Kollaboration	10
2.2 Rohdaten und Quellen	10
2.3 Methodik	12
2.3.1 Oberfläche.....	13
2.3.2 Untergrund	16
3. Ergebnisse und Diskussion	22
3.1 Oberfläche.....	22
3.2 Untergrund	24
3.3 Datenunsicherheiten	25
4. Schlussfolgerungen	27
5. Ausblick.....	28
Danksagung	29
Literaturverzeichnis	30
Anhang	31

Abkürzungsverzeichnis

BVU	Departement Bau, Verkehr, Umwelt
CKW	Centralschweizerische Kraftwerke AG
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EGS	Enhanced / Engineered Geothermal Systems
ESP-Klima	Entwicklungsschwerpunkt Klima-Projekt im Kanton Aargau
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FGS	Fachgruppe Georessourcen Schweiz der ETH Zürich
GER	Geneva Earth Resources
KIG	Klima- und Innovationsgesetz
kV	Kilovolt
MD	Mikro Darcy, Einheit zur Durchlässigkeit eines Gesteins
MWh	Megawattstunden
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NE3	Netzebene 3, entspricht dem Hochspannungsnetz (36kV bis 150 kV) für Strom in der Schweiz
NE5	Netzebene 5, entspricht dem Mittelspannungsnetz (1kV bis 36 kV) für Strom in der Schweiz
PFA	Play Fairway Analysis
SMA	Spatial Multicriteria Analysis (Räumliche Multikriterienanalyse)
Swisstopo	Bundesamt für Landestopografie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tiefe der obersten Muschelkalkgruppe einschließlich der obersten Stamberg-Formation („Oberer Muschelkalk“) anhand eines Querschnitts durch das Mittelland. ...	5
Abbildung 2: Verteilung der Temperaturwerte des oberen Muschelkalkes anhand des Modelles mit einem Gradienten von 39°C/km.	11
Abbildung 3: Output des Wärmebedarfs nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	14
Abbildung 4: Output des Fernwärmenetzes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	15
Abbildung 5: Output des Stromnetzes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	15
Abbildung 6: SMA für die kommerzielle Eignung für direkte Nutzung geothermischer Energie.	16
Abbildung 7: SMA für die kommerzielle Eignung für Stromproduktion geothermischer Energie.	16
Abbildung 8: Output der Permeabilität des Muschelkalkes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	17
Abbildung 9: Output der Deformationszone und Verwerfungen nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	18
Abbildung 10: Output der Temperatur des Muschelkalkes für die direkte Nutzung nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	19
Abbildung 11: Output der Temperatur des Muschelkalkes für die Stromproduktion nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.	20
Abbildung 12: Prozessierung Temperatur Muschelkalk.	20
Abbildung 13: SMA Eignung Untergrund für direkte Nutzung geothermischer Energie.	21
Abbildung 14: SMA Eignung Untergrund für Stromproduktion geothermischer Energie.	21
Abbildung 15: Ergebnis der SMA zur kommerziellen Eignung geothermischer Energie für die direkte Nutzung.	22
Abbildung 16: Ergebnis der SMA zur kommerziellen Eignung geothermischer Energie für die Stromproduktion.	23
Abbildung 17: Ergebnis der SMA zur Eignung des Untergrundes für direkte Nutzung geothermischer Energie.	24
Abbildung 18: Ergebnis der SMA zur Eignung des Untergrundes für die Stromproduktion geothermischer Energie.	25
Abbildung 19: Datenabdeckung durch Bohrlöcher und 2D-Seismiken im oberen Muschelkalk. Detailinformationen in Tabelle 4.	26
Abbildung 20: Differenzen Bohrlochdaten und GeoMol2021 im Muschelkalk.	31
Abbildung 21: Temperaturmodell mit Gradienten 39°C/km und Oberflächentemperatur von 12°C. ...	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inputdaten für die Berechnungen der Modelle ab Kapitel 2.3.	10
Tabelle 2: Deskriptive Statistiken Daten aus Tabelle 1.	11
Tabelle 3: Rechenschritte zur Aufbereitung der Inputdaten für die SMA.	13
Tabelle 4: Informationen zu den in Abbildung 19 dargestellten Bohrlochdaten.	34

1. Einleitung

Potenzialkarten für Geothermie (Geothermiekataster) sind ein Instrument zur Visualisierung und Bewertung des Potenzials im tiefen Untergrund. Sie enthalten Informationen zu bestehenden und geplanten Tiefengeothermieprojekten, geologischen Strukturen, Bohrdaten und Nutzungsmöglichkeiten. Ziel ist es, die Nutzung der Erdwärme systematisch zu fördern, die Planung zu erleichtern und die Transparenz gegenüber Behörden, Investoren und der Öffentlichkeit zu erhöhen.

Neben den geologischen Voraussetzungen, die das Reservoir definieren – das Wärmeangebot im Untergrund – sind auch die Gegebenheiten an der Oberfläche entscheidend für die Bewertung eines Standorts. Zu diesem Nachfragefaktor zählen insbesondere der lokale Wärmebedarf, die Verfügbarkeit und Ausbaubarkeit von Fernwärmenetzen sowie, je nach Projekt, die Anbindung an das Stromnetz zur Einspeisung von geothermisch erzeugtem Strom. Diese Elemente beeinflussen massgeblich die Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit eines Tiefengeothermieprojekts und werden daher im Rahmen der Potenzialkarten mitberücksichtigt.

Von November 2022 bis September 2025 wurde das Geothermiefotenzial in der Abteilung Energie des Departements Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) ermittelt. Dabei wurde in einer ersten Phase bis April 2024 durch die Sektion Energiewirtschaft in Zusammenarbeit mit Geneva Earth Resources (GER SA) sowie der Abteilung für Umwelt im Kanton Aargau ein erstes Modell zur Darstellung des geothermischen Potenzials in Form von Karten mittels Geodaten erarbeitet. Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen dieser Vorstudie wurde das Modell durch die Sektion Energiewirtschaft in einer zweiten Phase ab Mai 2024 verfeinert und erweitert. Der Aargau war bei diesem Projekt Pilotkanton des Bundes und wurde daher durch das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) während des gesamten Prozesses begleitet.

Die erarbeitete Potenzialabschätzung fokussiert auf die Zielschicht Muschelkalk-Aquifers, das heisst auf wasserführende Karbonatgesteine der Schinznach-Formation (Oberer Muschelkalk). Dieser geologische Horizont wurde bereits in diversen Projekten in der Schweiz und in Deutschland als eine geeignete Schicht für die geothermische Exploration identifiziert. Hiesige Beispiele dafür sind der Gemüseproduktionsbetrieb Grob Gemüse AG in Schlattigen, das Geothermieprojekt in Riehen, sowie das geplante Geothermieprojekt der CKW in der Luzernischen Gemeinde Inwil.

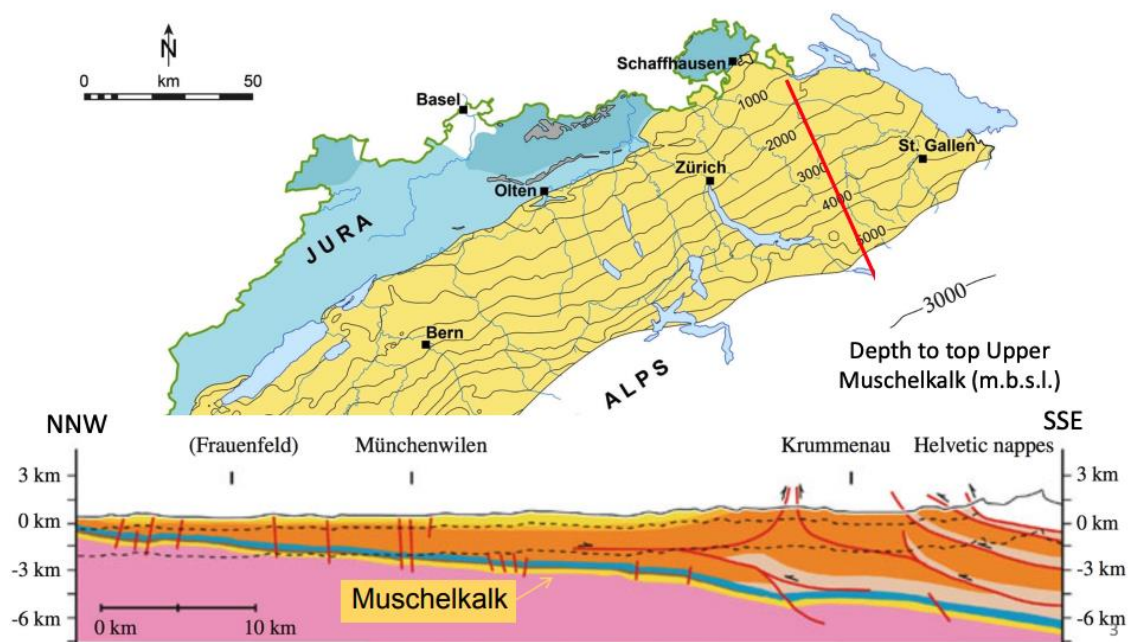


Abbildung 1: Tiefe der obersten Muschelkalkgruppe einschließlich der obersten Stamberg-Formation („Oberer Muschelkalk“) anhand eines Querschnitts durch das Mittelland. Quelle: Chevalier et al. (2010), modifiziert durch Diamond et al. (2019).

Die Schinznach-Formation im Schweizer Mittelland, früher auch als Oberer Muschelkalk bezeichnet (Abbildung 1), besteht aus Kalkstein und Mergel im unteren Teil sowie Dolomit im oberen Teil und wurde als bedeutender Grundwasserleiter mit geothermisch interessanten Reservoir-Eigenschaften erkannt (Chevalier et al., 2010). Die Oberkante des Muschelkalkes, welche zugleich Oberkante der Schinznach-Formation ist, erreicht ihren tiefsten Punkt mit rund 3'900 Metern im Süden des Kantons. Mit einer kontinuierlichen Abnahme der Tiefe von Süden her, tritt der Muschelkalk schlussendlich im Norden des Kantons an die Oberfläche. Die zahlreichen Thermalquellen in Kanton Aargau, auch kommerziell genutzte wie jene von Bad Schinznach, Baden und Bad Zurzach, sind ein sichtbares Zeichen für das Geothermiepotezial im Kanton und weisen auf funktionierende, von der Geologie dominierte, hydrothermale Systeme hin.

Das für die Potenzialabschätzungen vorwiegend genutzte und von swisstopo unterhaltene geologische Modell GeoMol21 wurde grösstenteils von 2D seismischen Linien hergeleitet und mit den vorhandenen Tiefenbohrungen kalibriert. Dabei wird darauf hingewiesen, dass der tiefe Untergrund in der Schweiz, im internationalen Vergleich, datenmässig schlecht abgedeckt ist.

Neben verschiedenen geologischen Faktoren, wie etwa der Tiefe des Muschelkalks oder wasserführenden Eigenschaften des Gesteins, welche in dieser Studie als "Eignung des Untergrundes" zusammengeführt wurden, sind auch strukturelle Faktoren an der Oberfläche entscheidend. Letztere sind als "wirtschaftliche Eignung" zu verstehen und zeigen die zur Einspeisung der Wärme beziehungsweise des Stroms vorhandene Infrastruktur sowie den grundsätzlichen regionalen Wärmebedarf auf.

Die Zusammenführung und Kontextualisierung der Ergebnisse stellen das Potenzial für tiefe Geothermie überblickartig dar. Als eine erste planerische Grundlage gibt sie Anhaltspunkte dafür, wo sich eine vertiefte Exploration anbieten könnte.

Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die vorliegende Potenzialabschätzung auf die tiefe Geothermie fokussiert. Von tiefer Geothermie wird ab einer Bohrtiefe von 500 Meter gesprochen. Eine [Eignungskarte für die Erdwärmenutzung der untiefen Geothermie](#) wurde im Kanton Aargau bereits umgesetzt.

1.1 Ausgangslage und Motivation

1.1.1 Nationaler rechtlicher Rahmen

Die Energieperspektiven 2050+, das Klima- und Innovationsgesetz (KIG), das Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien (sog. "Stromgesetz"), das CO₂-Gesetz sowie die Wärmestrategie und das übergeordnete Ziel der Energie-Versorgungssicherheit, stellen die zentralen Grundlagen für die Einbettung der Geothermie in das Schweizer Energiesystem dar. Geothermie bietet eine klimafreundliche, grundlastfähige und wetterunabhängige Alternative mit einem geringen CO₂-Fussabdruck und kann sowohl zur Wärmeversorgung als auch zur Stromproduktion eingesetzt werden. Die lokale Verfügbarkeit und die Unabhängigkeit von Importen machen Geothermie zu einem strategisch wertvollen Baustein für die Versorgungssicherheit.

Die Energieperspektiven 2050+ skizzieren verschiedene Szenarien für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2050. In diesen Szenarien wurde die Geothermie als wichtiger Pfeiler für die Dekarbonisierung des Strom- und Wärmebedarfs identifiziert. Sie soll bis 2050 mindestens ein Viertel des Wärmebedarfs – bestehend aus untiefer sowie tiefer Geothermie – der Schweiz decken und damit wesentlich zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen. Die Perspektiven betonen die Notwendigkeit eines breiten Technologiemies, wobei Geothermie durch ihre Grundlastfähigkeit und lokale Verfügbarkeit besonders zur Versorgungssicherheit beitragen kann.

Das KIG, welches am 1. Januar 2025 in Kraft trat, verankert das Netto-Null-Ziel bis 2050 rechtlich und schafft Förderinstrumente für klimafreundliche Technologien. Es sieht unter anderem finanzielle Unterstützung für erneuerbare Heizsysteme vor, zu denen auch geothermische Anlagen zählen. Unternehmen und Gemeinden können Fördermittel erhalten, wenn sie entsprechende Dekarbonisierungsfahrpläne vorlegen.

Das neue Stromgesetz, welches schrittweise zu Beginn 2025 beziehungsweise Beginn 2026 in Kraft trat, beziehungsweise in Kraft treten wird, stärkt die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Ausbau erneuerbarer Energien. Es definiert nationale Interessen für bestimmte Technologien und vereinfacht Planungs- und Bewilligungsverfahren. Auch wenn Geothermie primär im Wärmebereich wirkt, ist ihre Integration in Strom-Wärme-Kopplungssysteme und Netzstabilisierung insbesondere im Winterhalbjahr relevant.

Das revidierte CO₂-Gesetz konkretisiert die Reduktionsziele bis 2030 und fördert gezielt die direkte und indirekte Nutzung der Geothermie. Es unterstützt Unternehmen, die auf geothermische Wärme setzen. Damit wird Geothermie als strategisches Instrument zur Emissionsminderung anerkannt.

Schliesslich ist die Versorgungssicherheit ein übergeordnetes, energiepolitisches Ziel. Die Schweiz verfolgt dieses Ziel durch die Diversifizierung der Energiequellen und den Ausbau der inländischen Produktion. Die rechtlichen Zuständigkeiten zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie sind im Stromversorgungsgesetz geregelt, wobei Geothermie zunehmend als Teil der Lösung betrachtet wird.

1.1.2 Kantonale Energiepolitik

Der Kanton Aargau verfügt über besonders günstige geologische Voraussetzungen für die Nutzung der Geothermie. Mit einer überdurchschnittlich hohen terrestrischen Wärmestromdichte von über 100 Milliwatt pro Quadratmeter [mW/m²] bietet er aus dieser Perspektive gute Bedingungen für die Erschliessung von Tiefengeothermie. Diese Form der Energiegewinnung ist grundlastfähig, klimafreundlich und lokal verfügbar – Eigenschaften, die sie zu einem wertvollen Bestandteil einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung machen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Grossen Rat das (22.62) Postulat der FDP-Fraktion (Sprecher Gabriel Lüthy, Widen) vom 22. März 2022 betreffend Schaffung eines Geothermie-Katasters zur Identifizierung des Erdwärmepotenzials in den Aargauer Gemeinden eingereicht. Es fordert die Erstellung eines Geothermiekatasters, der das geothermische Potenzial systematisch erfasst und mit dem Wärmebedarf der Gemeinden verknüpft. Ziel ist es, eine strategische Grundlage für Investitionen und Projektentwicklungen zu schaffen und damit die Nutzung der Geothermie im Kanton gezielt voranzutreiben. Der Vorstoss orientiert sich an erfolgreichen Beispielen aus anderen Kantonen, etwa dem Kanton Waadt, der bereits einen solchen Kataster erarbeitet hat.

In der aktuellen kantonalen Energiestrategie, der energieAARGAU 2015, wurde die Geothermie zwar als Teil der erneuerbaren Energien anerkannt, konkrete Massnahmen zur Erschliessung des geothermischen Potenzials fehlen jedoch. Dies soll sich mit der Revision energieAARGAU 2025, welche sich bis Juni 2025 in öffentlicher Anhörung befand und im ersten Quartal 2026 durch den Grossen Rat verabschiedet werden soll, ändern. Die Geothermie wird hierbei als Teil eines vielfältigen Energieträgermixes anerkannt und insbesondere in den Handlungsfeldern zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und im Zusammenhang mit Speichertechnologien berücksichtigt. Die revidierte Strategie schlägt unter anderem auch eine Massnahme vor, um die lokale Nutzung geologischer Ressourcen wie der Geothermie zu fördern.

Auch durch die veränderten nationalen Grundlagen kommt der Geothermie im Kanton Aargau heute konzeptionell ein deutlich höherer Stellenwert zu als noch vor zehn Jahren. Die Forderung nach einem Geothermiekataster ist nicht nur technisch und wirtschaftlich begründet, sondern auch energiepolitisch sinnvoll. Der Regierungsrat hat sich daher in seiner Stellungnahme vom 8. Juni 2022 bereit erklärt, das (22.62) Postulat entgegenzunehmen. Der vorliegende technische Bericht beschreibt die Umsetzung eines Ansatzes im Sinne einer GIS¹-basierten Potenzialabschätzung.

¹ GIS-basierte Information bezieht sich auf Daten, die mithilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS) erfasst, verarbeitet, analysiert und dargestellt werden. GIS ist eine Technologie, die räumliche (geografische) Daten mit Attributinformationen verknüpft und es ermöglicht, diese visuell auf Karten darzustellen und räumlich zu analysieren.

Flankierend dazu befindet sich das (23.188) Postulat Thomas Baumann, Grüne, Suhr (Sprecher), Miro Barp, SVP, Brugg, Dr. Roland Frauchiger, EVP, Thalheim, Martin Brügger, SP, Brugg, Martin Bossert, EDU, Rothrist, Matthias Betsche, GLP, Möriken-Wildegg, Christian Keller, Grüne, Obersiggenthal, Andre Rotzetter, Mitte, Buchs, vom 13. Juni 2023 betreffend Risikoabsicherung bei mitteltiefer Erdwärmenutzung, in Bearbeitung. Neben dem GIS-basierten Geothermiepotezial, stellt die Risikoabsicherung eines der zentralen Themen bei der Förderung der Geothermie dar.

1.2 Assoziierte Arbeiten

Die erarbeiteten geothermischen Potenzialkarten des Kantons Aargau haben Pioniercharakter, da die in der Öl- und Gasexploration gängige Methodik der Play Fairway Analysis (PFA) erstmalig in der Schweiz auf die tiefe Geothermie angewandt wurde. Eine PFA beabsichtigt, Gebiete mit günstigen Bedingungen für die Geothermie zu identifizieren, ähnlich wie bei der Exploration nach Hydrokarbonaten. Ein Source-to-Sink Ansatz hilft dann, das Wärmereservoir in der Tiefe (Source) mit den Wärmeverbrauchern (Sink) zu verknüpfen. Dieser Ansatz unterscheidet sich vom bereits bestehenden Geothermiekataster des Kantons Waadt.

Der Geothermiekataster des Kantons Aargau steht zudem im Kontext mit weiteren regionalen Instrumenten, die ein geothermisches Potenzial beschreiben. Ein Beispiel hierzu ist die Karte des terrestrischen Wärmeflusses.

1.2.1 Nationale Wärmeflusskarte

Die Wärmeflusskarte der Schweiz von Medici und Rybach (1995) gilt bis heute als eine der zentralen Grundlagen für die geothermische Potenzialabschätzung in der Schweiz. Sie stellt die erste systematische Kartierung der terrestrischen Wärmestromdichte über die gesamte Schweiz dar.

Die Karte basiert auf der Auswertung von Temperaturmessungen in Tiefbohrungen sowie der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds. Für ihre Arbeit kombinierten die Autoren Daten aus verschiedenen Quellen, um ein möglichst flächendeckendes Bild zu erzeugen. Die Herausforderung bestand dabei in der lückenhaften Datengrundlage – im Vergleich zu anderen Staaten wurde in der Schweiz durch die Öl- und Gasexploration kaum Untergrundwissen geschaffen und somit ist die nationale Abdeckung mit Tiefenbohrungen sehr spärlich. Trotz der geringen Datendichte diente die Karte von Medici und Rybach über Jahrzehnte hinweg als Referenzwerk für die tiefe Geothermie in der Schweiz.

Ein erhöhter terrestrischer Wärmefluss gilt als Indikator für das geologische Geothermiepotezial, weil er darauf hinweist, dass aus dem Erdinneren überdurchschnittlich viel Wärme an die Oberfläche gelangt. Dies bedeutet, dass bereits in geringer Tiefe hohe Temperaturen vorhanden sein können, was die Nutzung geothermischer Energie wirtschaftlich attraktiv macht. Der Wärmefluss hilft somit, geeignete Bohrstandorte für geothermische Anlagen zu identifizieren.

Zudem kann ein erhöhter terrestrischer Wärmefluss auch mit zirkulierenden Fluiden im Untergrund zusammenhängen, da diese als Transportmedium für Wärme wirken. Solche natürlichen Konvektionsprozesse führen dazu, dass Wärme effizienter an die Oberfläche gelangt. Daher ist ein erhöhter Wärmefluss auch ein positiver Indikator für ein hydrothermales Geothermieprojekt, da er auf potenziell vorhandene, heisse und bewegliche Tiefenwässer hinweist, die für die geothermische Nutzung besonders geeignet sind.

1.2.2 Überarbeitung nationale Wärmeflusskarte

Im Zuge von Abklärungen der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) im Zusammenhang mit dem Geologischen Tiefenlager, hat sich die Datengrundlage seit der Arbeit von Medici und Rybach weiter verbessert. Zudem haben sich auch Modellierungsalgorithmen in den letzten Dekaden stark weiterentwickelt.

Deshalb entschied swisstopo 2024 eine Überarbeitung der Karte bei der Fachgruppe Georessource Schweiz (FGS) an der ETH Zürich in Auftrag zu geben, basierend auf neusten Daten, Erkenntnissen, Algorithmen und einer überarbeiteten Methodologie. Dabei sollen neue Modellierungstechniken verwendet und auch geologische Informationen miteinbezogen werden. Erste Resultate zeigen, dass sich der Kanton Aargau auch weiterhin durch eine positive Wärmeflussdichteanomalie auszeichnet, nun jedoch in einer länglichen Ausprägung, beeinflusst durch die Struktur des Nordschweizerischen Permokarbons im Untergrund.

1.2.3 Kantonale Wärmeflusskarte

Auch für die überarbeitete nationale Wärmeflusskarte bleibt die weiterhin geringe Datendichte eine Herausforderung. Aus diesem Grund initiierte der Kanton Aargau 2025 ein ESP Klima-Projekt, in welchem auch die Verwendung von Temperaturlogs aus Erdwärmesondenbohrungen für die Berechnung von Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeflussdichten geprüft werden soll. Der Kanton Aargau schreibt für Erdwärmesondenbohrungen tiefer als 100 Meter eine Ablenkungsmessung vor, was kantonale einzigartig ist. Im Zuge dieser Messung werden von Bohrfirmen oft gleich auch systematisch Temperaturlogs erhoben. So besteht ein Fundus von mehreren Tausend Temperaturlogs über den Kanton verteilt. Kann aufgezeigt werden, dass diese Bohrlochdaten auch für die Berechnung der Wärmeflussdichte benutzt werden können, ist das eine wichtige Erkenntnis. So können mit solchen Temperaturlogs viel detailliertere und statistisch relevantere Wärmeflusskarte im Aargau hergeleitet werden. Erste Resultate aus diesem kantonalen Projekt stimmen zuversichtlich.

Eine aktualisierte und empirisch möglichst gut abgestützte Wärmeflusskarte ist ein weiterer Hinweis auf die Eignung des Untergrundes für Geothermie in einer Region. Es ist deshalb geplant, die überarbeitete Karte aus dem ESP Klima-Projekt, sobald verfügbar, zusammen mit den geothermischen Potenzialkarten auf dem Geoinformationsportal des Kantons Aargau zu veröffentlichen.

1.2.4 Geothermiekataster Kanton Waadt

Der Kanton Waadt hat betreffend Potenzialabklärungen schon einiges an Pionierarbeit geleistet und verfügt über einen Kataster für die tiefe Geothermie. Dieser betrachtet das geologische Potenzial in Verbindung mit der Wärmenachfrage einzelner Gemeinden und bildet verschiedene geologische Horizonte ab. Ziel ist es auch hier, die geothermische Energie gezielt dort zu nutzen, wo ein hoher Bedarf besteht, etwa in dicht besiedelten Gebieten oder in der Nähe von geplanten oder bestehenden Fernwärmenetzen.

1.3 Ziel und Zielgruppe des Produkts

Das Hauptziel des vorliegenden Produkts ist die Darlegung einer fachlichen Grundlage mittels einer räumlichen Analyse über das geothermische Ressourcenpotenzial im Kanton Aargau. Dieses richtet sich in erster Linie an potenzielle Projektanten, Investoren sowie Experten aus Wissenschaft und Politik. Hierfür werden unterschiedliche Eignungskarten für die Geothermie erstellt, welche einerseits wichtige geologischen Parameter und andererseits bestehende Infrastrukturen und Wärmenachfrage hervorheben, um in kombinierter Betrachtung erste Anhaltspunkte für sinnvolle Standorte von möglichen Tiefengeothermieprojekten zu geben.

1.4 Technologien

Kommerzielle Projekte in der tiefen Geothermie lassen sich in zwei kommerziell zur Anwendung kommende Systeme einteilen – hydrothermale und petrothermale Systeme, auch EGS genannt.

Hydrothermale Systeme nutzen über Bohrungen an die Oberfläche geförderte natürlich vorkommende heisse Wässer oder Dampf aus durchlässigen Gesteinsschichten wie zum Beispiel dem Muschelkalk. Diese Form ist technisch etabliert, jedoch geografisch auf Gebiete mit entsprechenden Aquiferen beschränkt. Bruch- und Deformationszonen können die Durchlässigkeit der Gesteinsschichten erhöhen und stellen daher Regionen mit einer erhöhten Fündigkeitswahrscheinlichkeit dar.

Petrothermale Systeme hingegen erschliessen heisse, aber trockene und von Natur aus undurchlässige Gesteine – das Kristallin, aber auch Sedimente – indem durch hydraulische Stimulation künstlich ein durchlässiges Reservoir erzeugt wird. Die EGS-Technologie kann daher grundsätzlich überall zur Anwendung kommen. Häufig ist die Zielformation bei dieser Technologie jedoch das kristalline Grundgestein, welches im Kanton Aargau je nach Standort in unterschiedlicher Tiefe auftritt. Anvisiert werden Reservoirtemperaturen von über 150 °C, welche in der Schweiz zirka ab einer Tiefe von 4'000 Metern zu finden sind und sich auch für die Stromproduktion eignen. Im Gegensatz zu einem hydrothermalen Projekt hängt ein petrothermales Projekt von der Stimulierbarkeit des Reservoirgesteins ab.

Die für die vorliegende Potenzialstudie verwendete geologische Schicht des Muschelkalks ist ein bekannter Aquifer und somit primär ein Zielhorizont für ein hydrothermales Projekt. Je nach Frakturierung, Temperaturverhältnissen und geomechanischen Eigenschaften könnte er aber auch für petrothermale Projekte in Frage kommen.

2. Umsetzung

2.1 Kollaboration

Für die vorliegende Studie flossen diverse Datengrundlagen und Fachwissen ein, beispielsweise über die Grundlagenarbeit durch swisstopo, die Geneva Earth Ressources (GER), die Geo Explorers AG, die GEOLOGICA sowie durch die Nagra – siehe auch Kapitel 2.2 und Anhänge.

Die finale Ausarbeitung der Studie erfolgte federführend durch die Sektion Energiewirtschaft der Abteilung Energie des Kantons Aargau und baut auf gemeinsamen Grundlagenarbeiten mit GER auf. Anfänglich wurde das Projekt eng durch swisstopo begleitet, während Geo Explorers die Studie mit Fact Sheets zum Muschelkalk ergänzte und GEOLOGICA als externer Berater das Temperaturmodell erweiterte. Mit der Nagra konnte insbesondere der methodische Gewichtungsansatz für die Potenzialkarten diskutiert und verfeinert werden.

2.2 Rohdaten und Quellen

Der Datenbezug erfolgte durch swisstopo in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau und der Nagra unter Vereinbarung der Geheimhaltung. In diesem Kapitel werden alle Datensätze und Indikatoren aufgeführt, die zur Umsetzung des GIS-Datenmodelles benötigt wurden. Weitere Daten aus Grundlagenarbeiten der GER sowie Bohrlochdaten sind im Anhang aufgeführt.

Datenbeschreibung	Datentyp	Datenquelle
Wärmebedarf Wohn- und Dienstleistungsgebäude	Vektor, Hektarraster 100m x 100m	BFE
Fernwärmenetze ²	Vektor, Linien	Diverse EVU
Stromnetz auf Netzebene 3 und 5 ³	Vektor, Linien	Diverse EVU
Temperaturmodell Muschelkalk (siehe Anhang)	Raster	GER
Permeabilität	Grafik in Bericht	Diamond et. al
Verwerfungen im Muschelkalk aus GeoMol 2021	Vektor, Polygone	swisstopo
Deformationszone im Muschelkalk aus GeoMol 2021	Vektor, Polygone	swisstopo
Atlas Nagra 2D-Seismik	Web Feature Service (WFS)	Nagra
Atlas Nagra Bohrlöcher	WFS	Nagra

Tabelle 1: Inputdaten für die Berechnungen der Modelle ab Kapitel 2.3.

³ Hinweis: Die Daten bilden die NE 5 sowie die Fernwärmenetze im Kanton Aargau zu einem grossen aber nicht ganz vollständigen Anteil ab.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den wichtigsten Kennzahlen der verwendeten Variablen. Hierbei wurde eine Beobachtung als eine Rasterzelle (100mx100m) angenommen, um die räumliche Information anhand üblicher statistischer Kennzahlen darzustellen.

	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Temperaturmodell [°C]	65.6	12	166.7	31.5
Wärmebedarf Wohn- und Dienstleistungsgebäude [MWh/a]	285.6	50	34'563.7	439.9

Daten	Ausdehnung	
	[km]	[m ²]
Stromnetz Ebene 3	946.204	
Stromnetz Ebene 5	1325.971	
Fernwärmenetz	584.476	
Verwerfungen im Muschelkalk	3.657	
Deformationszone im Muschelkalk		540.760

Tabelle 2: Deskriptive Statistiken zu den Daten aus Tabelle 1.

Abbildung 2 gibt einen Überblick zu den geschätzten Temperaturen im Bereich des Muschelkalks im Aargau. Die Verteilung zeigt, dass sich ein grösserer Anteil des Kantons für Geothermieprojekte im Bereich des Muschelkalks zur direkte Wärmegewinnung eignen können (Temperaturen um die 60 °C), ein geringerer, aber dennoch substanzieller Anteil auch für die Stromproduktion (Temperaturen über 100 °C) geeignet ist.

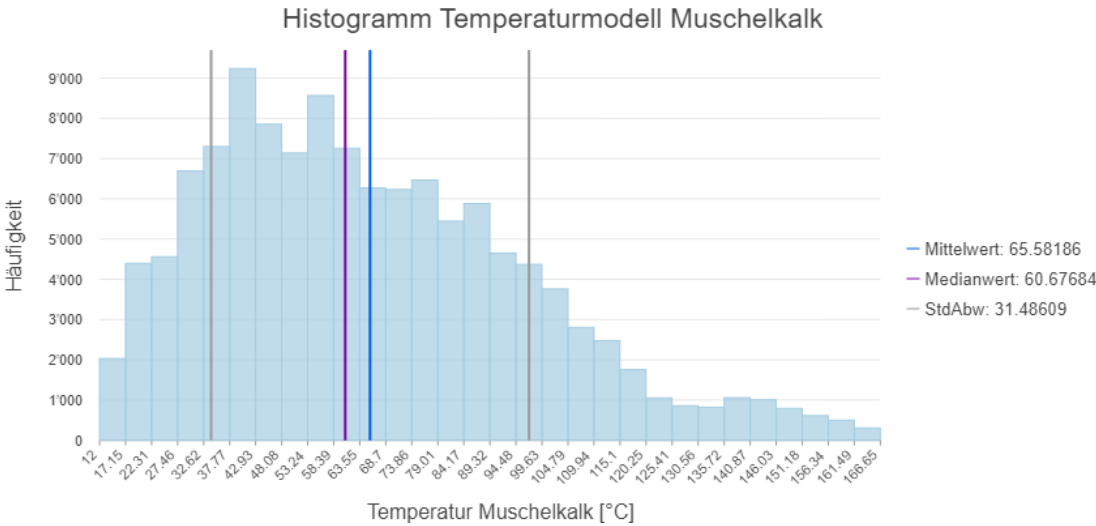


Abbildung 2: Verteilung der Temperaturwerte des oberen Muschelkalkes im Aargau anhand des Modelles mit einem Gradienten von 39°C/km.

Datentransformation

Die Inputdaten (Tabelle 1) wurden in Vorarbeiten transformiert, um für die folgenden Analysen verwendet werden zu können.

- Das aus GeoMol 2021 extrahierte Temperaturmodell für den oberen Muschelkalk wurde als XYZ-Gitter mit einer nominalen Auflösung von 100mx100m geliefert, wobei sich die Oberflächen entlang der Überschiebungsbrüche überlappen. Der Datensatz wurde mit einem einfachen IDW-Interpolationsalgorithmus als Rasteroberfläche interpoliert. Die Erweiterung eines Temperaturmodelles, das den Nordwesten des Kantons beinhaltet, ist im Anhang aufgeführt.

- Der 2D-Atlas sowie die Bohrlöcher der Nagra wurde von einem WFS in ein Shapefile konvertiert.
- Die verwendeten Fernwärmedaten wurden im Zuge der vorliegenden Studie bei den grösseren Elektrizitätsunternehmen des Kantons eingeholt. Sie unterliegen teilweise dem Datenschutz und werden daher als Rohdaten nicht abgebildet. Im Kapitel 3.2.1 werden jedoch die prozessierten Inputdaten aufgeführt. Dasselbe Prinzip gilt für das Stromnetz der Netzebene 5, da diese ebenfalls direkt von diversen Energieversorgungsunternehmen (EVU) bereitgestellt wurden.

2.3 Methodik

Um das Geothermiepotezial im Kanton Aargau auf der Zielschicht des Muschelkalks zu bewerten, wird die Methodik einer Play Fairway Analysis (PFA) angewendet. Die PFA ist ein in der Öl- und Gasindustrie häufig verwendetes Vorgehen, welches darauf abzielt, Explorationsrisiken zu reduzieren und die vielversprechendsten Gebiete zu identifizieren. Unter dem Begriff "Play" ist ein geographisch und stratigraphisch abgegrenztes Gebiet zu verstehen, in dem gemeinsame geologische Faktoren vorliegen, die das Vorkommen von Ressourcen begünstigen (Madritsch, 2023). In erster Linie spiegeln die "Plays" strukturelle, geologische Situationen im Untergrund wider, die für geothermische Vorkommen potenziell günstig sind. Aufgrund vergleichbarer Ziele und Herausforderungen, besteht ein grosses Transferpotenzial der verwendeten Ansätze aus der Öl- und Gasindustrie bei der geothermischen Potenzialermittlung und Projektplanung.

In einer PFA für Geothermieprojekte bezeichnet die Source-to-Sink-Terminologie die konzeptionelle Darstellung des geologischen Systems, das für die geothermische Nutzung relevant ist. Dabei wird das System in drei Hauptkomponenten unterteilt: Quelle (Source), Transportweg (Pathway) und Senke (Sink). Die Quelle ist dabei die Wärmequelle im Untergrund, der Transportweg die Durchlässigkeit des Gesteins und die Strukturen, die den Wärmetransport ermöglichen und die Senke der Nutzungsort der geothermischen Energie – also dort, wo die Wärme gebraucht wird. Das können Fernwärmenetze, industrielle Prozesse oder Stromerzeugungsanlagen sein. In der PFA wird analysiert, ob die geothermische Ressource in räumlicher Nähe zu einem ausreichend grossen Wärmebedarf liegt und ob die Infrastruktur vorhanden ist. Sie hilft, die Gesamtkohärenz des geothermischen Systems zu bewerten, indem zentrale Fragen wie die nach genügend vorhandener Wärme im Untergrund, dem Vorhandensein geeigneter Transportwege sowie der Nutzung am Zielort beantwortet werden. Durch eine solche ganzheitliche Betrachtung können Risiken minimiert und mögliche Standorte priorisiert werden.

Anhand des beschriebenen Ansatzes wurden Potenzialgebiete mittels einer GIS-basierten räumlichen Multikriterienanalyse (spatial multicriteria analysis, SMA) identifiziert. Dabei werden mehrere Geodaten-Ebenen aggregiert und unterschiedlich gewichtet, um die geothermische Eignung eines Standorts zu ermitteln (Boggia, 2018).

Die Daten wurden mittels der Software ArcGIS Pro (Esri) prozessiert und befinden sich im Koordinatenreferenzsystem EPSG:2056 - CH1903+ / LV95.

Die in der Analyse verwendeten Datensätze lassen sich in die beiden Kategorien *Oberflächenelemente (Senke)* und *Untergrundelemente (Quelle)* einteilen und werden in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 erläutert. In den beiden Kapiteln wird jeweils zwischen der Eignung für direkte Wärmenutzung und Stromerzeugung unterschieden. Somit differenzieren auch die Endergebnisse in unterschiedlichen Darstellungen zwischen den beiden Nutzungstypen der Geothermie.

Eine Aufbereitung der Inputdaten ist notwendig, um die gewichtete Potenzialkarte für die Eignung an der Oberfläche sowie im Untergrund zu berechnen. Die verwendeten Rechenoperatoren zur Vorbereitung der räumlichen Multikriterienanalyse sind für die Oberflächen- und Untergrundelemente mehrheitlich deckungsgleich und sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Schritt	Werkzeug	Beschreibung
1	Rasterisierung der Vektordaten	Wandelt Inputdaten in Rasterdaten um, da dieses Format für die SMA und die Erstellung einer PFA notwendig ist.
2 (optional)	Reklassifizierung	Klassifiziert Werte um. Wurde hier für den Wärmebedarf benötigt, um Rasterzellen > 700MWh herauszufiltern.
3	Euklidische Entfernung ³	Für jede Zelle wird die Distanz zur nächsten Quelle berechnet. Die maximale Distanz variiert je nach Datensatz.
4	Normalisierung	Normalisiert den jeweiligen Wertebereich der Daten zwischen 1 und 10, welches ein Mass für die Favorabilität, bzw. Eignung darstellt. Die Berechnung wird mit dem Raster Calculator anhand folgender Formel durchgeführt. $R_{norm} = (b - a) * \left(\frac{x - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \right) + a$ a Oberer Normalisierungswert (10) b Unterer Normalisierungswert (1) x Inputraster Rmin Unterer Wert Inputraster Rmax Oberer Wert Inputraster

Tabelle 3: Rechenschritte zur Aufbereitung der Inputdaten für die Multikriterienanalyse (SMA)

2.3.1 Oberfläche

Für die Erstellung einer Eignungskarte für geothermische Energie an der Oberfläche werden folgende Inputdaten (Vektordateien) verwendet:

- Wärmebedarf
- Stromnetz auf Netzebene 3 und 5
- Fernwärmenetze

In den Abbildungen 3 bis 5 sind die Daten aufgeführt, welche die oben aufgeführten Schritte durchlaufen haben und den Input für die gewichtete Potenzialkarte darstellen. Bei der Darstellung der Daten handelt es sich bewusst um die prozessierten Inputdaten, da die Rohdaten teilweise einem Datenschutz unterliegen. Alle Inputdaten weisen eine Rasterzellgrösse von 100m x 100m auf.

³ Die räumliche Nähe zum Energiebedarf (geografischer Raum, in dem Energie nachgefragt wird) dient als Mass für die wirtschaftliche Rentabilität der Investition in eine geothermische Anlage. Beispielsweise wirkt sich die räumliche Nähe einer Stromleitung auf Netzebene 3 (oder alternativ Netzebene 5) für ein Geothermieprojekt zur Stromerzeugung kostenseitig günstig aus.

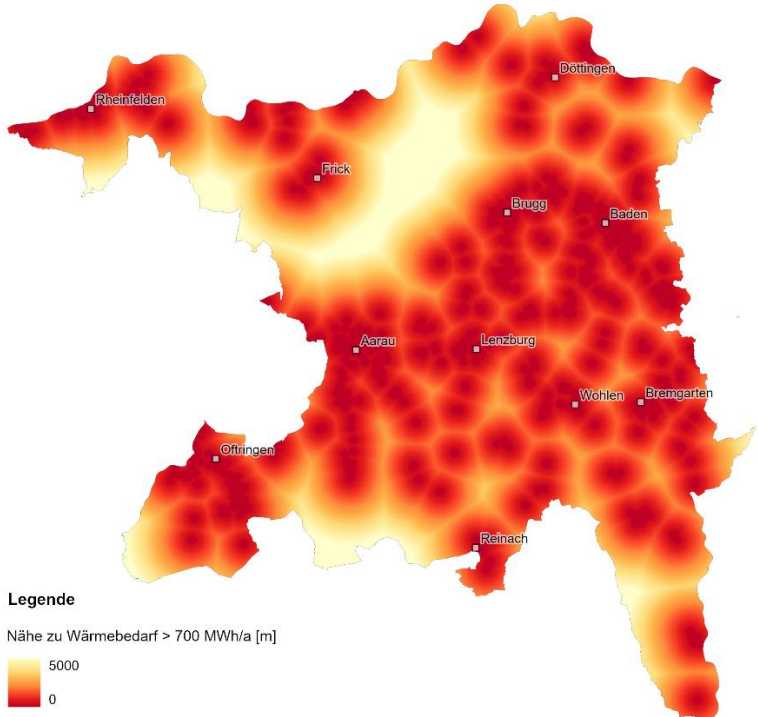
Darstellung Wärmebedarf nach Datentransformation	Beschreibung
 Legende Nähe zu Wärmebedarf > 700 MWh/a [m] 5000 0	Eine Reklassifizierung (s. Schritt 2 in Tabelle 3) wurde durchgeführt, um alle Zellen mit einem Wärmebedarf > 700 Megawattstunden (MWh) herauszufiltern. Dafür wurde das Attribut <i>needtotal</i> verwendet, welches den totalen Wärmebedarf der Bereiche Wohnen und Dienstleistungen [MWh/ a] darstellt. Der Wert gilt gemäss Richtlinien des BFE als Startpunkt für eine wirtschaftlich rentable Wärmeversorgung. Die euklidische Entfernung wurde mit einer Maximaldistanz von 5'000 m gerechnet. <i>Zur Darstellung:</i> Die Verteilung des Wärmebedarfs hängt stark von der Bevölkerungsdichte ab und ist in Städten wie beispielsweise Aarau, Baden oder Lenzburg oder wirtschaftlichen Entwicklungsschwerpunkten wie dem Sisslerfeld oder Birrfeld am höchsten. Der nördliche und südliche Teil des Kantons weisen den niedrigsten Gesamtenergiebedarf auf.

Abbildung 3: Output des Wärmebedarfs nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

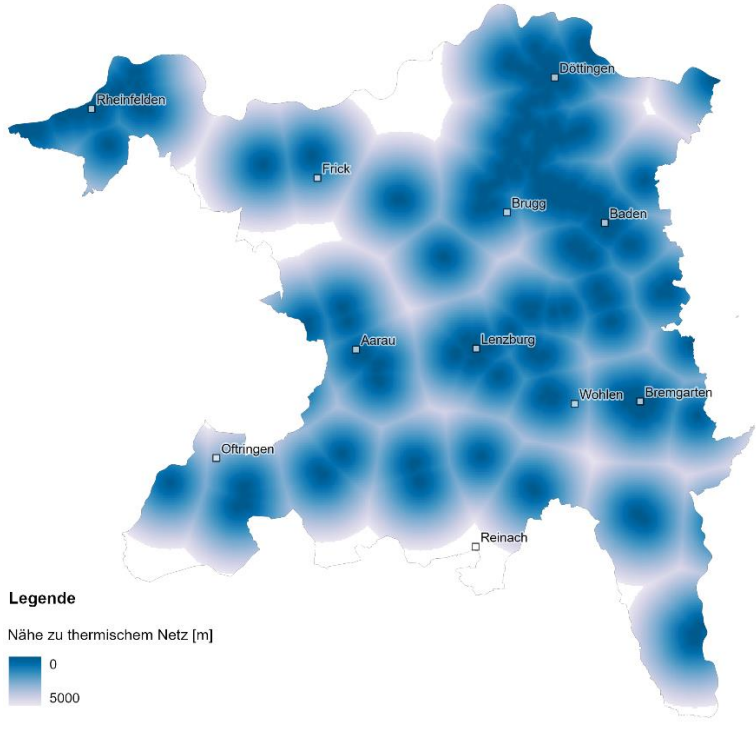
Darstellung Fernwärmenetz nach Datentransformation	Beschreibung
	Hier wurde keine Reklassifizierung vorgenommen. Die euklidische Entfernung wurde mit einer Maximaldistanz von 5'000 m gerechnet. <i>Zur Darstellung:</i> Die Verteilung der Fernwärmenetze ist besonders dicht im Raum zwischen Döttingen, Brugg und Baden und korreliert somit mit dem Wärmebedarf. Die Darstellung der Fernwärmenetze bezieht sich nur auf jene, die dem Kanton zugestellt wurden.

Abbildung 4: Output des Fernwärmenetzes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

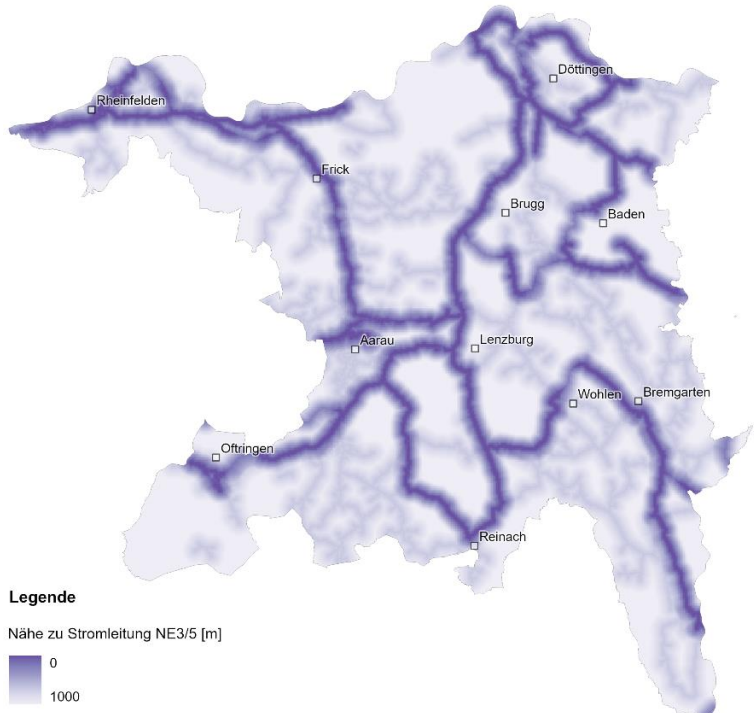
Darstellung Stromnetz nach Datentransformation	Beschreibung
	Vorab wurden die beiden Layer Netzebene 3 und Netzebene 5 unterschiedlich gewichtet und aufsummiert: <pre> graph TD NE3[NE 3] --> W3((0.7)) NE5[NE 5] --> W5((0.3)) W3 --> Sum{+} W5 --> Sum Sum --> Output[Output] </pre> <i>Zur Darstellung:</i> In der Grafik werden Stromleitungen der Netzebene 3 (NE 3) hervorgehoben, da sie höher gewichtet sind. Die höhere Gewichtung folgt aus der Präferenz zur Einspeisung in NE 3. Die Daten der Netzebene 5 (NE 5) sind feinmaschiger über den Kanton verteilt und bieten eine alternative Einspeisemöglichkeit, sollte NE 3 nicht verfügbar sein.

Abbildung 5: Output des Stromnetzes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

Kommerzielle Eignung an der Oberfläche

Die in den Abbildungen 3 bis 5 aufgeführten Inputdaten werden mit Gewichten versehen und in einer Multikriterienanalyse aufsummiert. Der schematische Prozess wird exemplarisch für die direkte Nutzung von Wärme in Abbildung 6 sowie zusätzlich mit Stromerzeugung in Abbildung 7 dargestellt. Der Unterschied im Prozess liegt darin, dass für die Potenzialkarte mit der Möglichkeit zur Stromerzeugung zusätzlichen zum Wärmebedarf und den Fernwärmenetzen auch die Stromleitungen miteinbezogen werden. Bei der direkten Nutzung in der Abbildung 6 werden keine Gewichte verwendet.

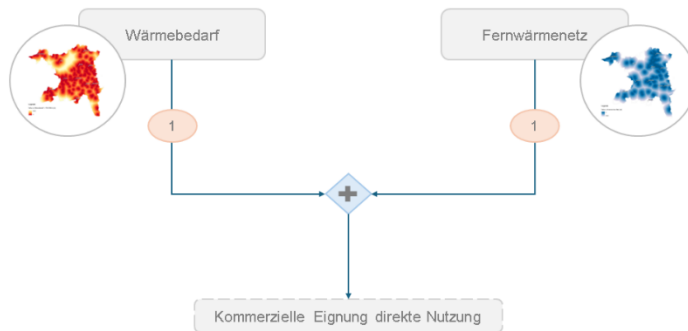


Abbildung 6: SMA für die kommerzielle Eignung für direkte Nutzung geothermischer Energie.

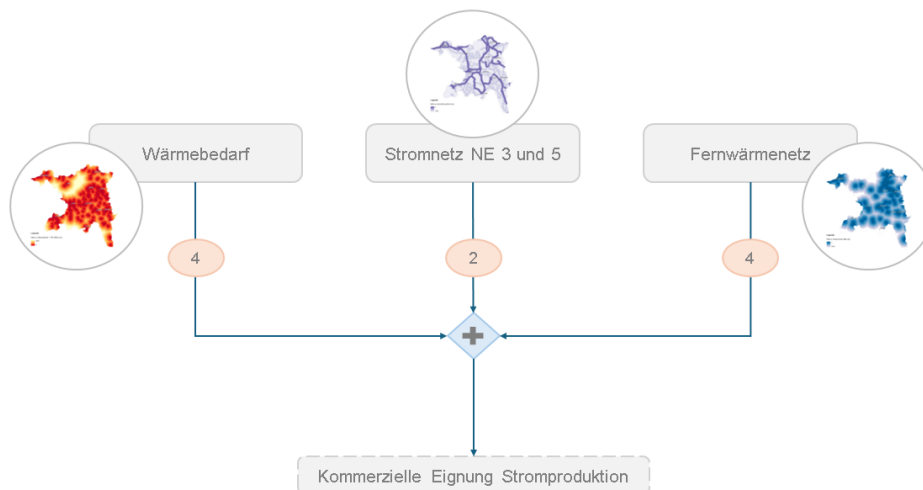


Abbildung 7: SMA für die kommerzielle Eignung für Stromproduktion geothermischer Energie.

2.3.2 Untergrund

Die Erstellung der Potenzialkarte für Geothermie im Untergrund basiert auf Inputdaten auf der Ebene des oberen Muschelkalk-Aquifers. Folgende Daten sind dabei in das Modell des Untergrundes eingeflossen:

- Temperatur
- Verwerfungen
- Deformationszone
- Permeabilität

Analog zu den Oberflächenparametern zeigen die Abbildungen 8 bis 11 die überarbeiteten Inputdaten auf, die anhand der Schritte in Tabelle 3 berechnet wurden. Unter Permeabilität wird die Durchlässigkeit von Wasser im Muschelkalk verstanden. Die Permeabilität des Muschelkalkes im Kanton Aargau verhält sich identisch zur Porosität. Aus diesem Grund wurde die Porosität nicht zusätzlich in das Modell aufgenommen.

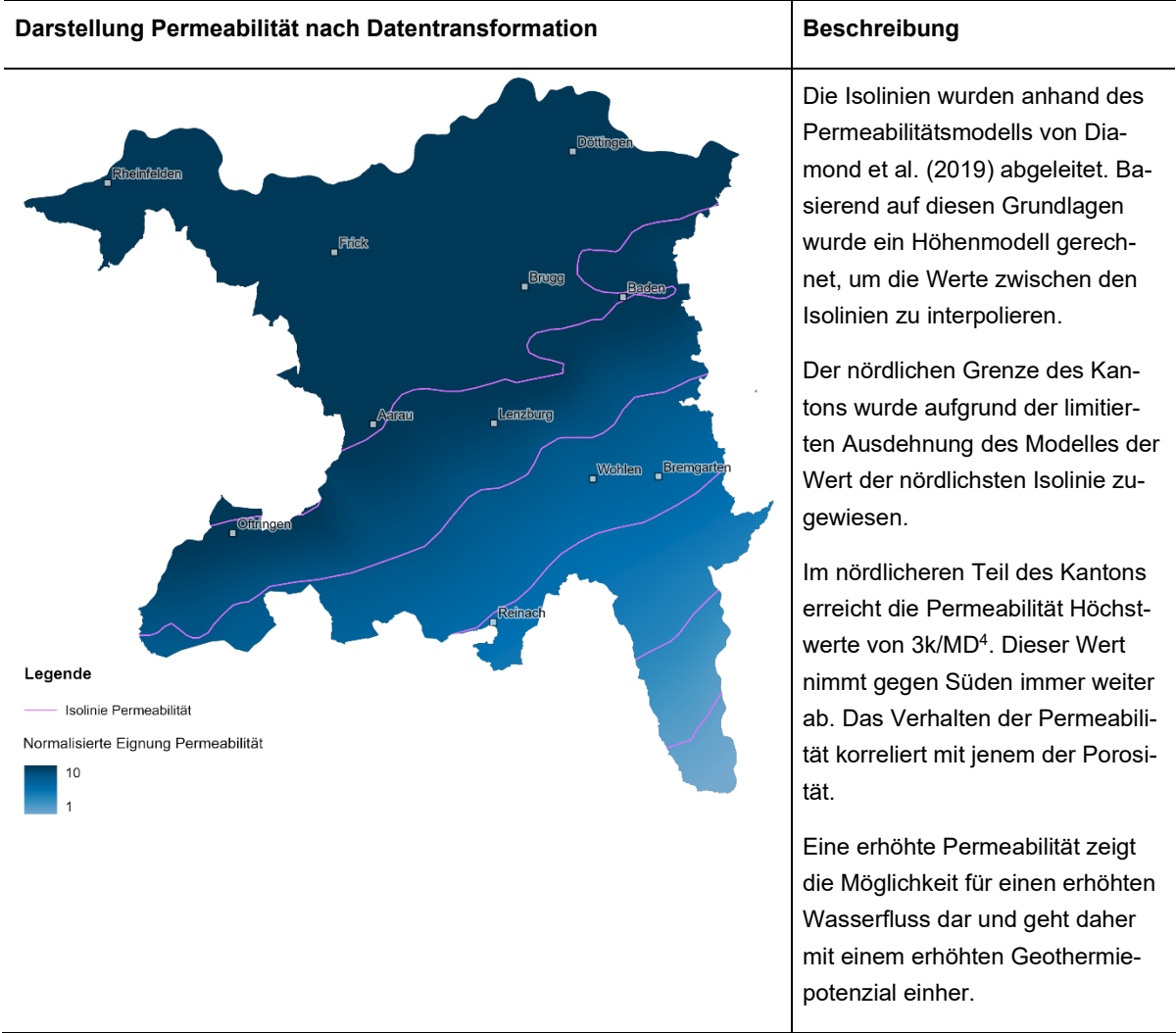
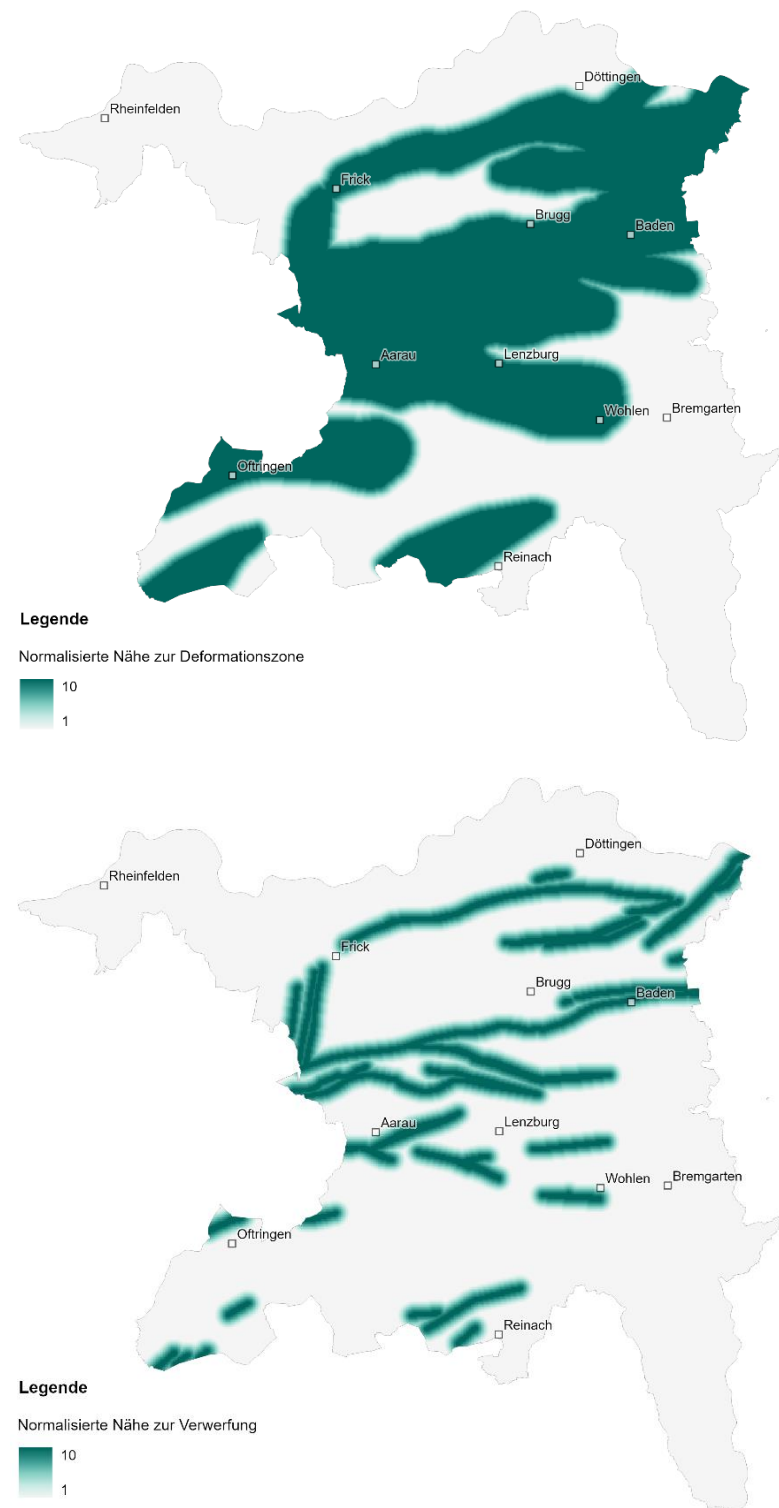


Abbildung 8: Output der Permeabilität des Muschelkalkes nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

⁴ Eine Permeabilität = 1 Darcy bedeutet, wenn 1 cm³ Wasser in einer Sekunde durch ein Gesteinsstück mit dem Volumen von 1 cm³ durchfließt.

Darstellung Deformationszone und Verwerfungen nach Datentransformation

Beschreibung



Die Verbreitung und genaue Lokalisierung von Schadenszonen wie Verwerfungen und Deformationszonen bringt einige Unsicherheiten mit sich. Um diese zu minimieren, wurde ein Puffer von 2 Kilometern um die vermuteten Strukturen gelegt.

Zur Linderung eines harten Überganges zwischen den Strukturen (sehr geeignet) und der restlichen Fläche des Kantons (nicht geeignet), wurde innerhalb eines Kilometers eine lineare Abnahme der Eignung festgesetzt.

Verwerfungen und Deformationszonen zeigen aufgrund der erhöhten Wasserwegsamkeit ein höheres Potenzial für Geothermie auf.

Abbildung 9: Output der Deformationszone und Verwerfungen nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

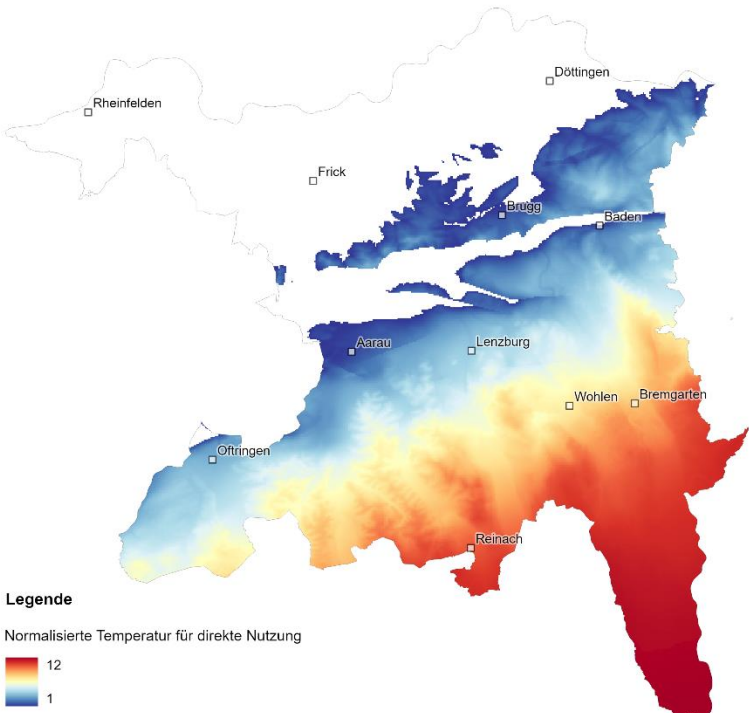
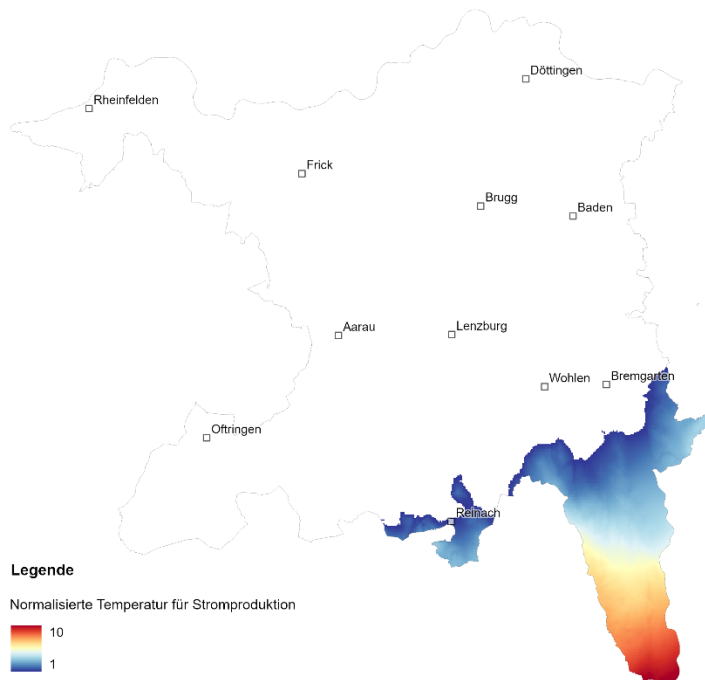
Darstellung Temperatur direkte Nutzung nach Datentransformation	Beschreibung
 Legende Normalisierte Temperatur für direkte Nutzung 12 1	Das verwendete Temperaturmodell wurde von GER zur Verfügung gestellt und befindet sich mit den Ausführungen zur Erstellung im Anhang (Abbildung 21). Das Temperaturmodell für die direkte Nutzung wurde von 40°C – 100°C in einer linearen und ab 100°C in einer logarithmischen Skala behandelt. Der Grund dafür ist erstens das Erfordernis von mindestens 40°C für die direkte Nutzung von geothermischer Energie und deren Verteilung an Wärmebezügler. Zweitens erreicht die Temperatur bei 100°C ihre volle Ausnutzung für die direkte Nutzung, weshalb diesem Wert eine Eignung von 10 zugewiesen wird. Ab 100°C wird eine logarithmische Skala angewendet, um dem abnehmenden Grenznutzen höherer Temperaturen Rechnung zu tragen. Der schematische Prozess wird in Abbildung 12 aufgezeigt.

Abbildung 10: Output der Temperatur des Muschelkalkes für die direkte Nutzung nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

Darstellung Temperatur für Stromproduktion nach Datentransformation

Beschreibung



Das Temperaturmodell für die Stromproduktion reicht von 100°C bis 166.6 °C, da Temperaturen ab 100°C für die Stromerzeugung genutzt werden können. Im Vergleich zur direkten Nutzung beinhaltet es ganzheitlich eine lineare Verteilung der Werte.

Beide Modelle beinhalten einen Gradienten von 39°C/km und eine Oberflächentemperatur von 12°C.

Abbildung 11: Output der Temperatur des Muschelkalkes für die Stromproduktion nach Prozessierung anhand der Schritte in Tabelle 3.

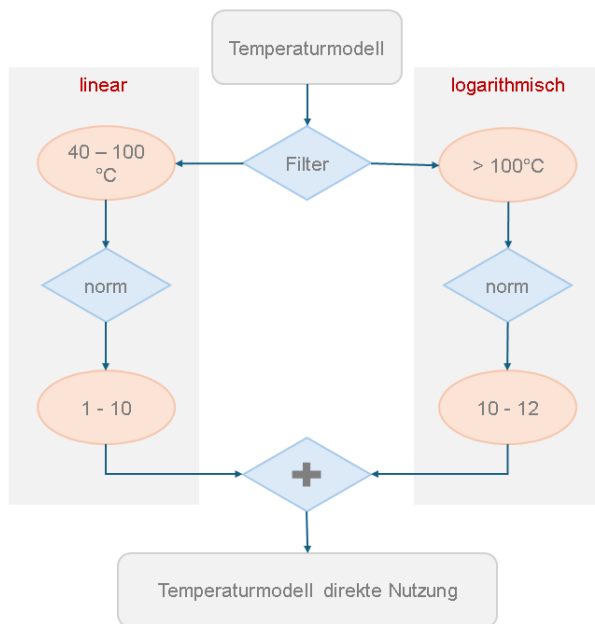


Abbildung 12: Prozessierung Temperatur Muschelkalk.

Eignung des Untergrundes

Analog zur kommerziellen Eignung an der Oberfläche werden die anhand der Abbildungen 8 bis 11 aufbereiteten Inputdaten mit Gewichten versehen und je für die direkte Nutzung sowie für die Stromproduktion nach dem Prinzip der SMA aufsummiert.

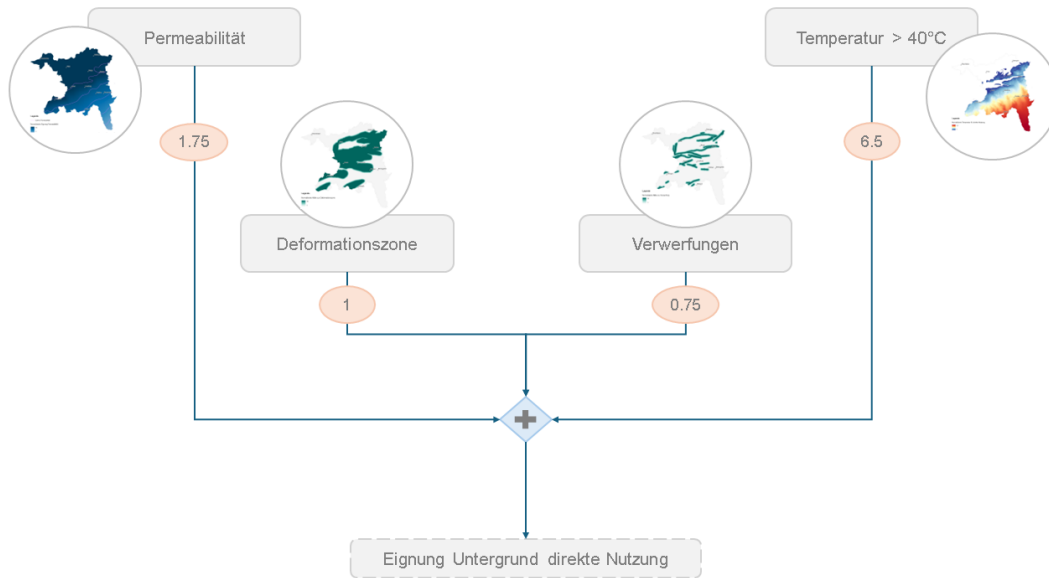


Abbildung 13: SMA Eignung Untergrund für direkte Nutzung geothermischer Energie.

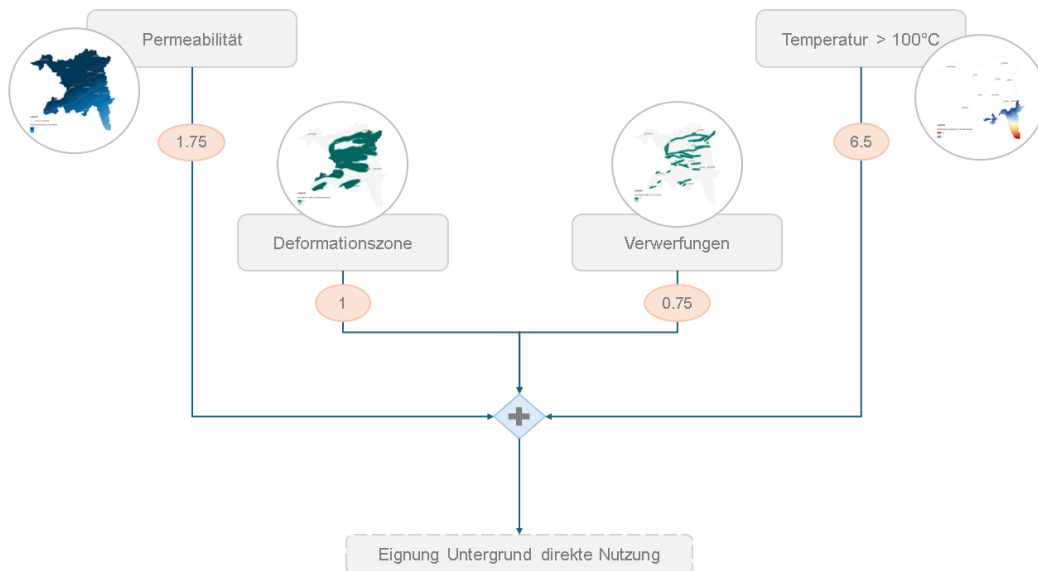


Abbildung 14: SMA Eignung Untergrund für Stromproduktion geothermischer Energie.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die erarbeiteten Eignungskarten zeigen Gebiete, die anhand der verwendeten Kriterien für die geothermische Exploration mehr oder weniger gut geeignet sind.

3.1 Oberfläche

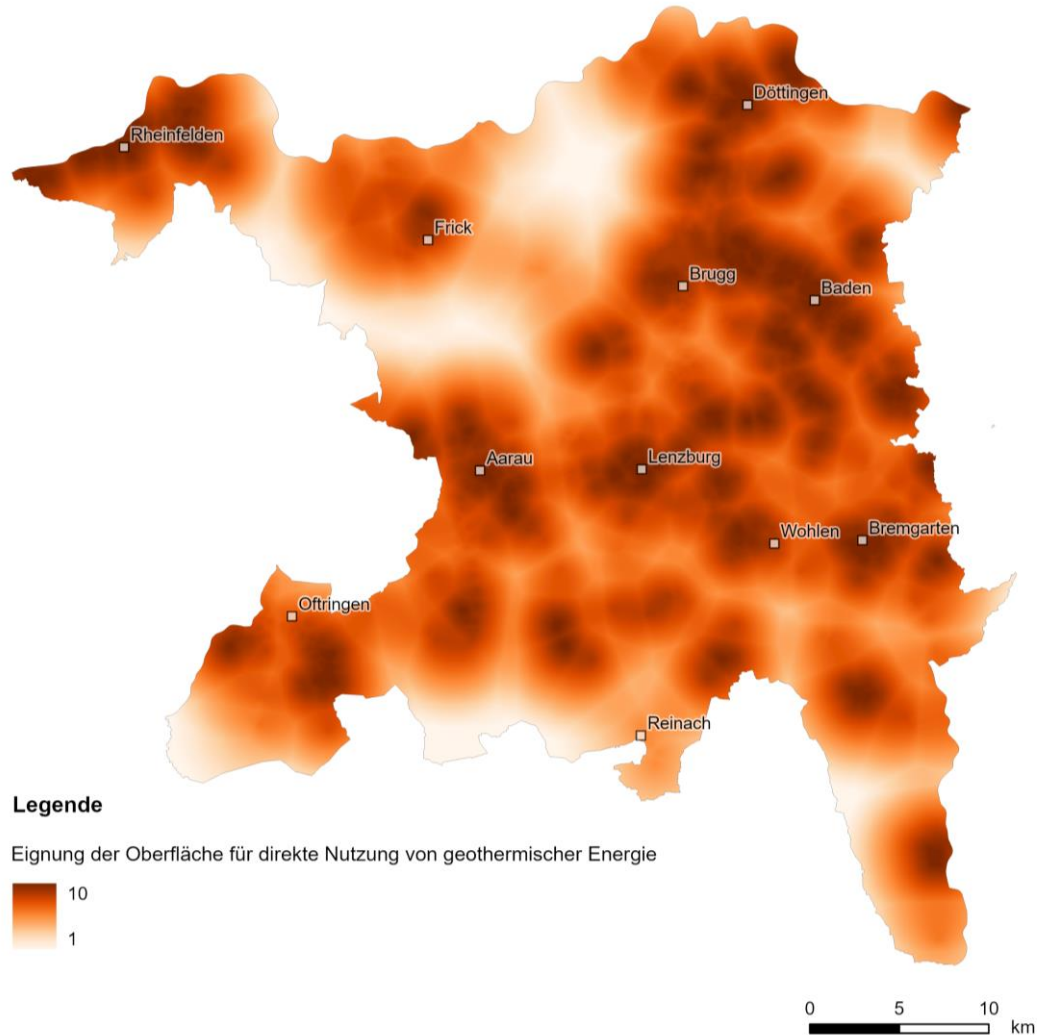


Abbildung 15: Ergebnis der SMA zur kommerziellen Eignung geothermischer Energie für die direkte Nutzung.

In Abbildung 15 wird das Ergebnis der SMA aus dem Kapitel 2.3.1 dargestellt, das die Eignung der Oberfläche (kommerzielle Eignung) für die direkte Nutzung von geothermischer Energie darstellt. Die hervorgehobenen, dunkleren Strukturen zeigen die Zentren des Energiebedarfs sowie eine hohe Möglichkeit zur Einspeisung von geothermischer Energie in bestehende Fernwärmenetze. Vor allem im Norden und Nordwesten des Kantons gibt es Gebiete, in denen eine Einspeisung aufgrund einer zu hohen Distanz zu einem bestehenden Netz nur schwer möglich ist.

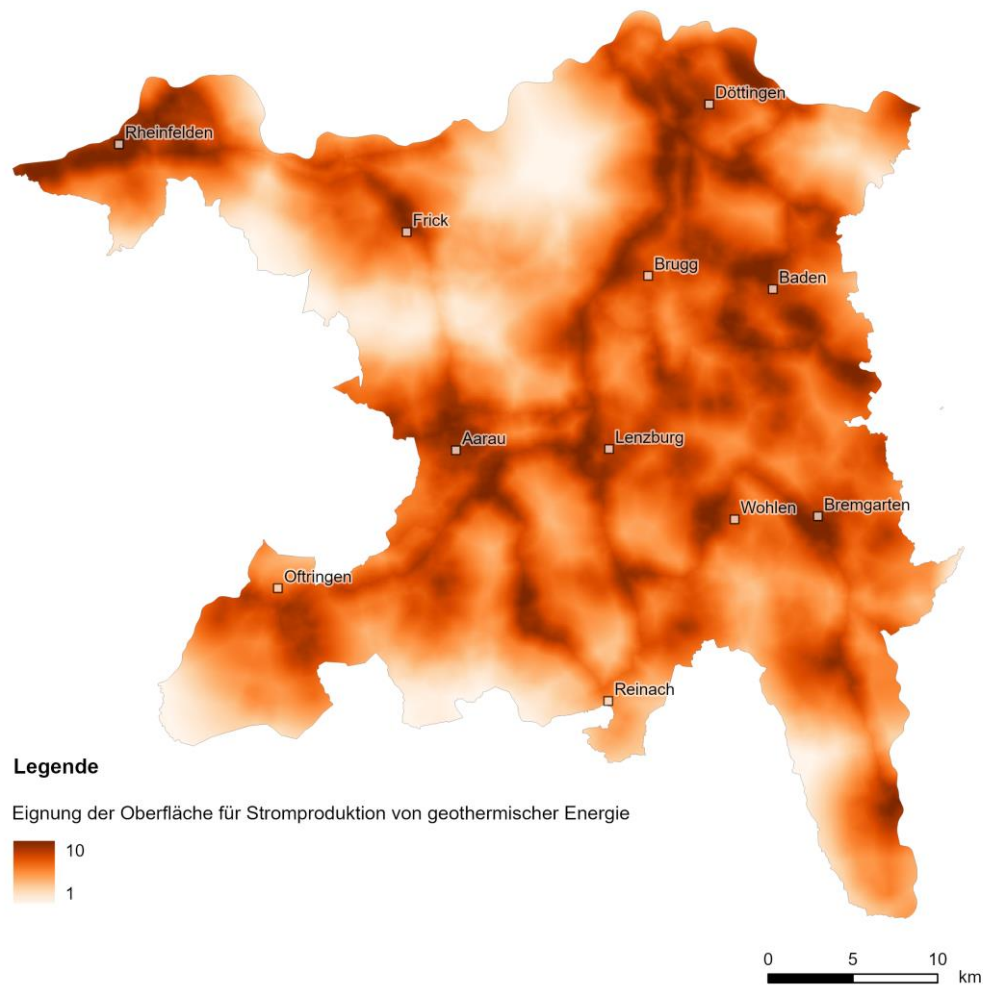


Abbildung 16: Ergebnis der SMA zur kommerziellen Eignung geothermischer Energie für die Stromproduktion.

Die hohen Eignungswerte in Abbildung 16 weisen auf nahegelegenen Wärmebedarf, Vorhandensein eines bestehenden Wärmenetzes sowie zusätzlich die Nähe zu einem bestehenden Stromnetz auf der Netzebene 3 und 5 hin. Die Potenzialgebiete wie auch Gebiete mit mangelnder Infrastruktur im Norden decken sich mit dem Abbild für die direkte Nutzung (Abbildung 15).

3.2 Untergrund

Das Ergebnis in Abbildung 17 zeigt die Eignung des Untergrundes für die direkte Nutzung geothermischer Energie. Die Eignung nimmt gegen Süden des Kantons stark zu. Dies ist auf die starke Gewichtung des Temperaturmodelles sowie dem Temperaturverlauf des Muschelkalkes zurückzuführen. Die Temperatur ist abhängig von der Tiefe des Muschelkalkes und nimmt gegen Süden zu. Ab 100°C nimmt die Eignung der Temperatur für die direkte Nutzung nicht mehr linear, sondern logarithmisch zu. Die sichtbaren Strukturen sind auf die Deformationszone sowie die Verwerfungen zurückzuführen. Allgemein sind die Bedingungen im Süden des Kantons am besten, allerdings befindet sich dort der Muschelkalk auf dem tiefsten Niveau im Kanton.

Auch die Deformationszonen und Verwerfungen zeigen Potenziale im südlichen Teil des Kantons. Jedoch muss hierbei darauf hingewiesen werden, dass nicht alle Bereiche des Kantons gleich ausführlich geologisch untersucht sind. Es ist somit wahrscheinlich, dass sich auch an anderen Orten geologische Strukturen finden lassen, welche die Tiefengeothermie begünstigen könnten.

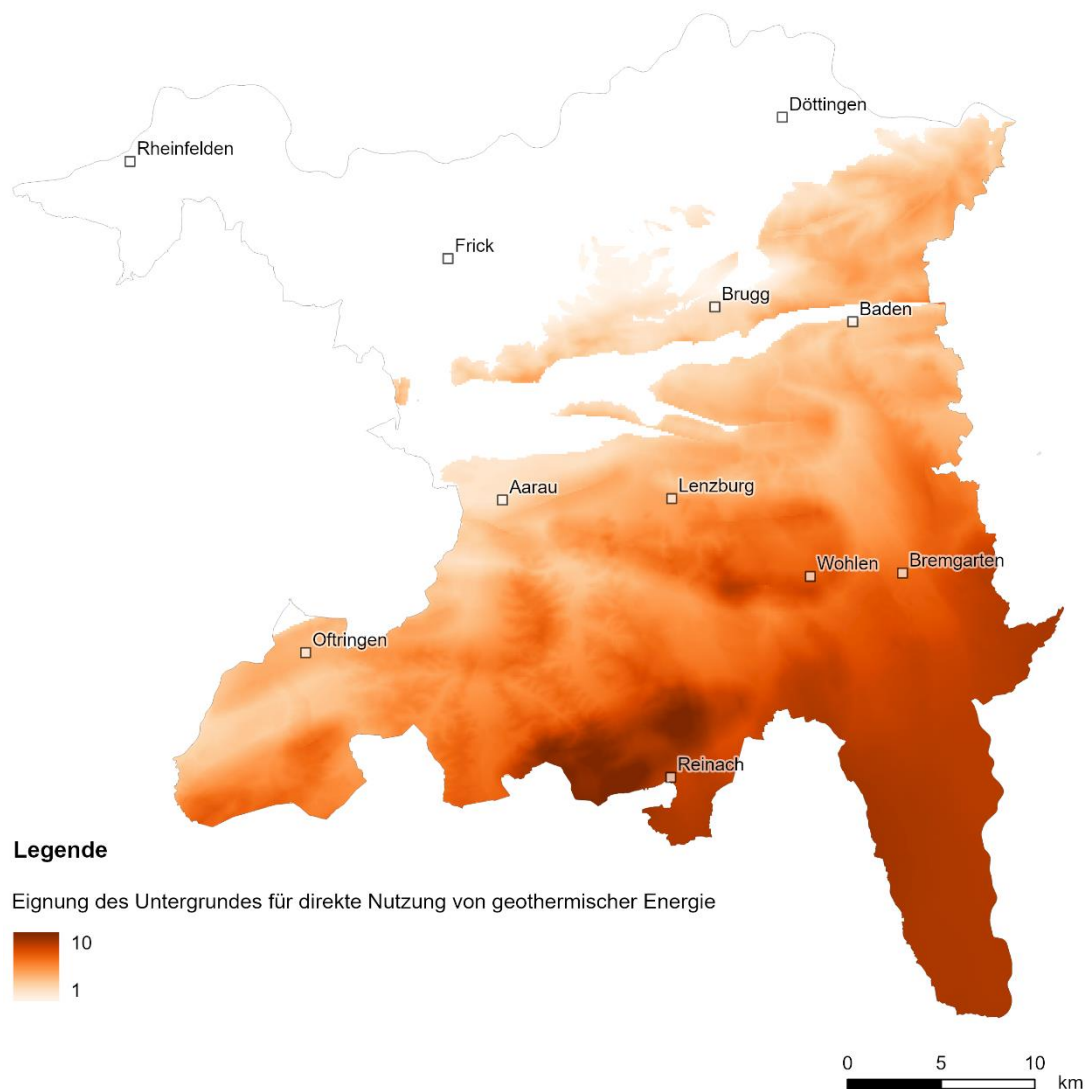


Abbildung 17: Ergebnis der SMA zur Eignung des Untergrundes für direkte Nutzung geothermischer Energie.

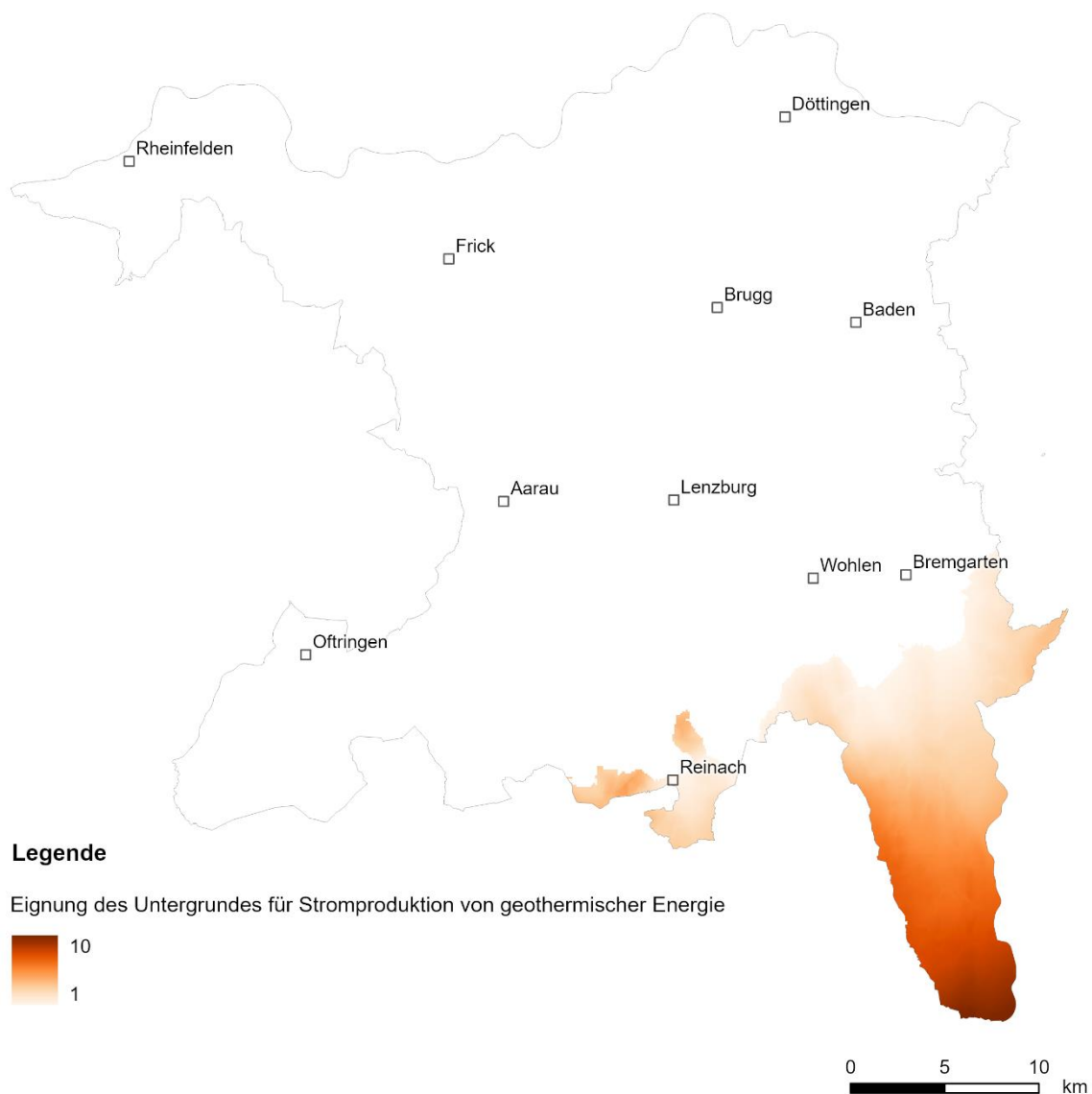


Abbildung 18: Ergebnis der SMA zur Eignung des Untergrundes für die Stromproduktion geothermischer Energie.

Analog zur Abbildung 17 zeigt Abbildung 18 die Eignung für die Stromproduktion auf. Da für die Stromproduktion eine Temperatur des Muschelkalkes von über 100°C vorausgesetzt wird, beschränkt sich die Eignung auf das Freiamt.

3.3 Datenunsicherheiten

Der tiefe Untergrund für die geothermische Nutzung bleibt in grossen Teilen des Kantons Aargau noch wenig verstanden, trotz einiger engmaschiger regionaler Analysen. Zudem sind nicht alle im Rahmen diverser Projekte gesammelten Explorationsdaten frei zugänglich, was die Datenabdeckung weiter erschwert.

Das Temperaturmodell wurde durch GER anhand des GeoMol 2021 sowie der Bohrlochdaten erstellt. Das definierte "best-case"-Szenario wurde anhand eines Temperaturgradienten von 39°C/km definiert. Dieser Annahmewert basiert auf den Temperaturgradienten von existierenden Tiefenbohrungen und repräsentiert kein exaktes Abbild der Realität.

Die Permeabilität des Oberen Muschelkalks konnte im Aargau nur anhand von einzelnen Bohrlöchern bestimmt werden, hauptsächlich im Raum Brugg und im Unteren Aaretal wo dieser oberflächennah zu finden ist (siehe Abbildung 19). Für repräsentative modellierte Reservoireigenschaften wie jene der Permeabilität wurde deshalb im Zuge des Katasters auf die Arbeit von Diamond et al.

(2019) zurückgegriffen. Diese Werte sind in der Abwesenheit von Tiefenbohrungen allerdings auch mit grossen Unsicherheiten versehen. Weiterführende hydrochemische Daten wurden nicht ins Modell einbezogen.

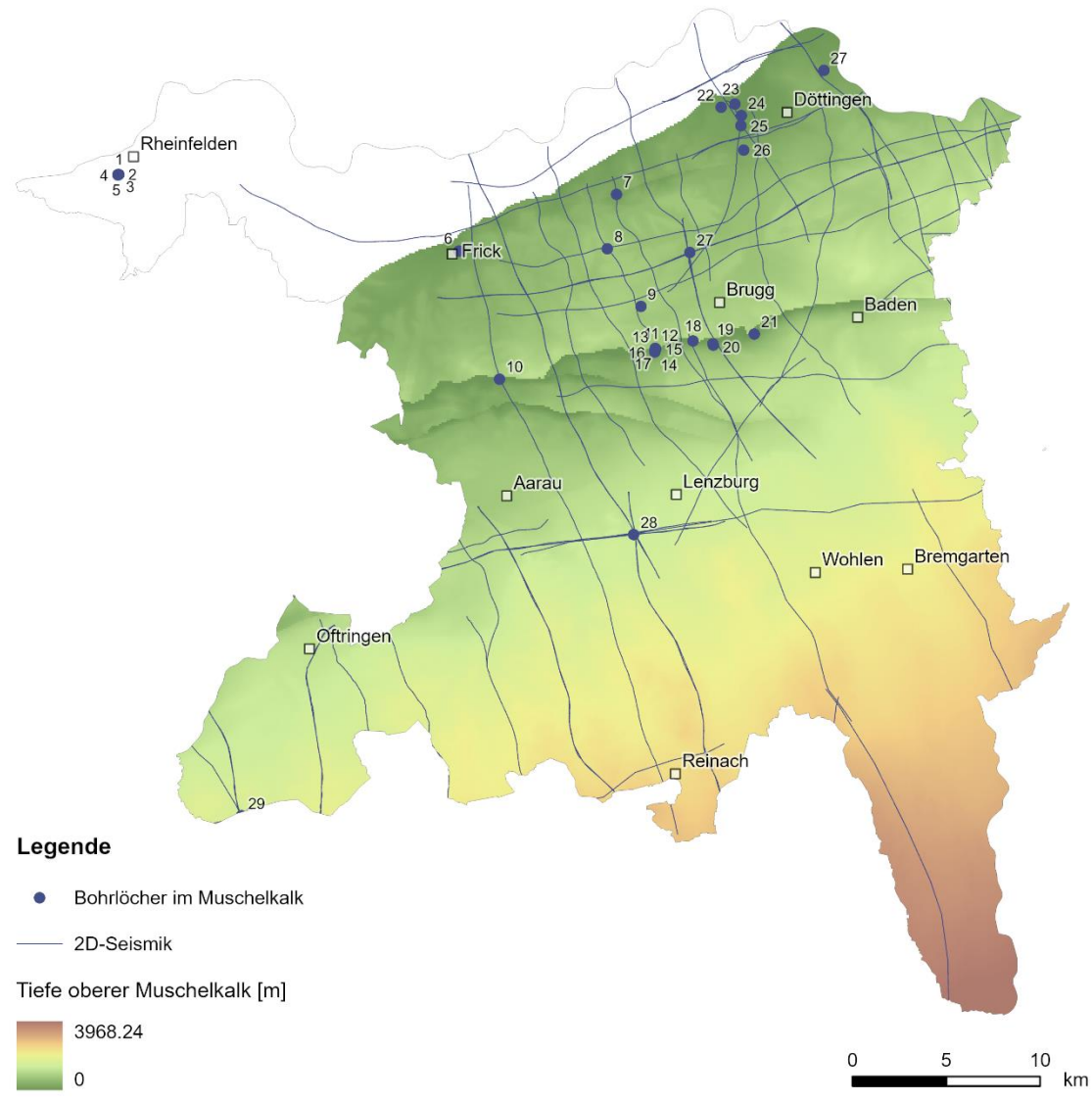


Abbildung 19: Datenabdeckung durch Bohrlöcher und 2D-Seismiken im oberen Muschelkalk. Detailinformationen in Tabelle 4.

Die Abdeckung durch Bohrlochdaten sowie 2D-Seismiken im oberen Muschelkalk wird in Abbildung 19 dargestellt. Detailinformationen zu den Bohrlochinformationen sind Tabelle 4 im Anhang A2 zu entnehmen. Das als Hintergrund dargestellte Höhenmodell des Muschelkalkes dient als Interpretation zur Komplexität der Geologie. Die Kantonsfläche verzeichnet insgesamt 29 Bohrlöcher sowie eine aufsummierte Anzahl von 877 Kilometern 2D-Seismik Linien.

In geologisch homogenen Gebieten kann die 2D-Seismik auch gute Resultate erzielen. Ist der Untergrund jedoch heterogen ist die 3D-Seismik der Industriestandard. Mit der 3D-Seismik können geologische Strukturen besser verortet, die laterale Auflösung signifikant verbessert und die Unsicherheiten so als Ganzes gesenkt werden. Eine 3D-Seismik ist jedoch im Vergleich zu einer 2D-Seismik auch mit signifikanten Mehrkosten verbunden.

4. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Potenzialabschätzung ist eine erste Grundlage, um sich an die geologischen und petrophysikalischen Eigenschaften im Untergrund auf Stufe des Muschelkalk-Aquifers sowie die bestehenden Oberflächengegebenheiten anzunähern. Der Kataster schafft eine methodische Basis, um aufzuzeigen, wo im Kanton anhand der benutzten Modelle erhöhtes Potenzial für die Gewinnung von geothermischer Energie besteht. Zu diesem Zweck wurde eine Eignungskarte des Untergrundes (Geologie) wie auch der Oberfläche (Infrastruktur) mittels Gewichtung von verschiedenen relevanten Parametern hergeleitet. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Eignungskarten auf Modellen beruhen, welche stets eine Vereinfachung der Realität darstellen. Jene des Untergrundes stützt sich beispielsweise stark auf Modelle ab, die nur auf weitmaschiger 2D-Seismik und wenigen Tiefenbohrungen erarbeitet werden konnten. Das ist weit entfernt von einem Idealfall mit kontinuierlicher 3D-Seismik über das ganze Kantonsgebiet und mit zahlreichen Bohrlöchern zur Kalibration der Modelle – ein Fall wie er zum Beispiel in reifen Öl- und Gasprovinzen zu finden ist.

Da die für die Studie gewählte Gesteinsschicht des Muschelkalks jedoch eher homogen und gleichmässig nach Süden hin abtaucht, fallen diese Limitationen weniger ins Gewicht. Durch das Abtauchen des Muschelkalks nimmt dessen Temperatur entsprechend zu und wird so auch von geothermischer Seite interessanter. Eine tiefere Bohrung bedeutet aber auch höhere Investitionskosten und deshalb ein höheres finanzielles Risiko. In Norden des Kantons hingegen ist der Muschelkalk erodiert oder liegt so untief, dass er für die direkte Wärmeengewinnung als irrelevant einzustufen ist – deshalb auch die datenfreien Gebiete auf den geologischen Eignungskarten. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Gebiete im Norden des Kantons für eine geothermische Nutzung grundsätzlich uninteressant wären. Umso mehr, da die Wärmenachfrage in den Städten und wirtschaftlichen Entwicklungsschwerpunkten entlang des Hochrheins vorhanden ist. Da in diesen Gebieten das kristalline Grundgebirge nahe an die Oberfläche reicht, liegt es auf der Hand, in diesen Regionen ein petrothermales Geothermieprojekt zu verfolgen, da in solchem Gestein kaum mit natürlich vorkommenden Wässern zu rechnen ist. In solchen Projekten wird nicht nach einer wasserführenden Schicht gesucht, sondern in eine Tiefe gebohrt, bis die erwünschte Temperatur gefunden wird. Im Anschluss dazu wird in Zieltiefe das bohrlochumgebende Gestein stimuliert, um so künstliche Fliesswege zu schaffen. Solche petrothermale Geothermieprojekte sind auch im übrigen Kantonsgebiet denkbar.

Die Eignungskarten der Oberfläche sind massgeblich beeinflusst durch den lokalen Wärmebedarf und die vorhandene Infrastruktur zur Einspeisung der geförderten Wärme und des eventuell produzierten Stroms. Auch diese Modelle sind wiederum mit Unsicherheiten verbunden, da teils nur ältere und unvollständige Datensätze vorhanden sind. Zudem bildet die Eignungskarte nur den Ist-Zustand ab und berücksichtigt geplante, aber noch nicht realisierte Bau- und Infrastrukturprojekte nicht. Aus der Karte zeigt sich, dass Eignungsgebiete mit den bevölkerungsreichen Regionen, schwergewichtig entlang der Limmat und der Aare und um die südlichen regionalen Zentren korrelieren. Auch der Raum Frick und die Region um Rheinfelden dem Rhein entlang zeichnen sich durch eine hohe Eignung aus. Wie bereits vorgängig erwähnt, müsste hier jedoch eine alternative Zielschicht gewählt werden.

Werden die beiden Eignungskarten, welche zusammen den Geothermiekataster definieren, kombiniert betrachtet, so erscheinen mögliche Geothermiestandorte rund um die grösseren Zentren südlich des Juras als attraktiv. Projektstandorte entlang der Limmat und der Aare mit Zielhorizont Muschelkalk dürften sich ausschliesslich für die Wärmenutzung eignen, dafür aber auch mit untieferen und deshalb kostengünstigeren Bohrungen einhergehen. Ganz im Süden des Kantons ist auch eine Stromproduktion in der Tiefe des Muschelkalks denkbar, bedingt aber auch eine tiefere und somit teurere Bohrung.

Ob bei einem Tiefengeothermieprojekt schlussendlich eine genügend hohe Schütttrate⁵ gefunden wird, um das Geothermieprojekt ökonomisch zu betreiben, ist Teil des Fündigkeitsrisikos. Es besteht bis zur abgeteuften Bohrung keine Sicherheit über diese. Deshalb ist es zielführend, Geothermieprojekte möglichst so zu planen, dass bei Bedarf in einem Kaskadenansatz weitere "Plays" verfolgt werden können. Liefert das erste Play nicht die gewünschte Schütttrate, so bohrt man weiter zum zweiten Play, und so weiter. Zudem besteht auch die Möglichkeit, ein ursprünglich als hydrothermales mittels Stimulation in ein petrothermales Projekt weiterzuentwickeln.

Eine solche Eventualitätsplanung muss jedoch von Anfang an in die Planungen eingehen und vor den eigentlichen Bohrarbeiten in Angriff genommen werden. Hieran wird ebenfalls deutlich, wie wichtig eine möglichst gute Kenntnis des Untergrundes ist. Der Geothermiekataster soll helfen, potenziell interessante Gebiete für die tiefe Geothermie zu identifizieren. Er ersetzt hingegen keine projektspezifische Due Diligence.

5. Ausblick

Die bisherigen Arbeiten zum Geothermiepotezial im Kanton Aargau fokussieren auf den Muschelkalk-Aquifer als Zielschicht im Untergrund. Diese Entscheidung beruht auf geologischen, technischen und wirtschaftlichen Überlegungen: Der Muschelkalk-Aquifer hat sich auch in der Schweiz durchaus als Schicht erwiesen, die eine geothermische Nutzung ermöglichen kann. Zudem liegen zu dieser Schicht für die gewählte Methodik benötigte Modellinformationen vor.

Eine mögliche Erweiterung des Katasters kann in der Berücksichtigung von weiteren Zielschichten, wie etwa dem Kristallin, bestehen. Im Gegensatz zum sedimentären Muschelkalk ist das magmatische Kristallin eine undurchlässige Gesteinsschicht. Deshalb kommen in einer solchen Umgebung hauptsächlich petrothermale Systeme zur Anwendung, die darauf abzielen, ein künstliches Flie遳 regime auf Zieltiefe zu schaffen. Diese Systeme sind technisch komplexer und oft mit grossen Bohrtiefen verbunden, verschaffen aber auch eine grössere Standortunabhängigkeit und bringen die Aussicht auf eine zusätzliche Stromproduktion.

Mit der skizzierten Erweiterung kann zudem ein Beitrag an die Risikosteuerung und -minimierung geleistet werden, indem beispielsweise ein ursprünglich als hydrothermal konzipiertes Projekt mit einem petrothermalen Ansatz weiterverfolgt werden kann.

Weiter liesse sich der Geothermiekataster auch mit Erkenntnissen aus Geospeicherpotenzialstudien kombinieren. Geospeicher versprechen, thermische Energie zu speichern – auch saisonal – und stellen so einen weiteren Baustein in einem integrierten Energiesystem dar.

Es ist geplant, zukünftige Erkenntnisse dem Geothermiekataster laufend zuzuführen, um den Informationsgehalt im Sinne von Synergien zu verbessern und zu kontextualisieren.

⁵ Die Schütttrate bezeichnet in der Geothermie die Menge an Thermalwasser, die pro Zeiteinheit aus einer Förderbohrung gewonnen wird – zum Beispiel gemessen als Liter pro Sekunde (l/s) oder Kubikmeter pro Stunde (m³/h).

Danksagung

Wir danken allen an der Erarbeitung beteiligten Organisationen, insbesondere swisstopo, Geneva Earth Resources (GER), Geo Explorers AG, GEOLOGICA sowie Michael Ruff und Jens Becker von der Nagra an dieser Stelle für ihren wertvollen Beitrag. Ein besonderer Dank geht an Herfried Madritsch von swisstopo für seine Unterstützung bei der Konzeption und der Durchführung des Vorhabens, sowie dem Herstellen wichtiger Kontakte zu Vertretern weiterer Organisationen.

Literaturverzeichnis

Boggia, A., Massei, G., Pace, E., Rocchi, L., Paolotti, L., & Attard, M. (2018). Spatial multicriteria analysis for sustainability assessment: A new model for decision making. *Land Use Policy*, 71, 281-292.

Chevalier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. (2010). Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J Geosci* 103, 427–455. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0030-4>

Diamond, L., Aschwanden L., Adams A. & Egli. D. (2019). Revised Potential of the Muschelkalk Formation (Central Swiss Plateau) for CO₂ Storage and Geothermal Energy. Presented at the SCCER-SoE Annual Conference 2019 (http://static.seismo.ethz.ch/sccer-soe/Annual_Conference_2019/AC19_S3a_08_Diamond.pdf)

Madritsch, H. (2023). Play-based exploration (PBE). (https://geothermie-schweiz.ch/wp_live/wp-content/uploads/2023/04/20230405_03_ERFA-PBE_Swisstopo.pdf)

Medici, F., Rybach, L. (1995). Geothermal Map of Switzerland 1995 (Heat Flow Density). *Materiaux pour la Geologie de la Suisse. Geophysique Nr. 30*. Zürich, 36p.

Moscariello, A. & Guglielmetti, L. (2020). The GeoT-Play project: an innovative workflow to assist the exploration and development of geothermal resources. Presented at the 18th Swiss Geoscience Meeting, Zurich 2020 (https://geoscience-meeting.ch/sgm2020/wp-content/uploads/abstracts/Moscariello_Andrea_08-28-20-10-46-47.pdf)

Anhang

A1: Grundlagenarbeiten der GER

Alle Grundlagenarbeiten, die für die vorliegende Studie von Relevanz sind, werden hier aufgeführt.

Ausführungen Temperaturmodell:

Das Temperaturmodell, welches als Inputdatei für weitere Berechnungen in Kapitel 2.3.2 diente, wurde von GER berechnet und bereitgestellt. Aufgrund des fehlenden nordwestlichen Teils im GeoMol 2021, wurde eine neue Berechnung der Temperatur des oberen Muschelkalkes durch GER vorgenommen. In einem ersten Schritt wurde die Temperatur gegen die Tiefe im GeoMol 2021 geplotet. Das lineare Verhältnis zwischen Temperatur und Tiefe resultiert in folgender Gleichung: $y = 0,03x + 22,53$ (x = Tiefe, y = Temperatur), was einem geothermischen Gradienten von $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ sowie einer Oberflächentemperatur von $22,53^{\circ}\text{C}$ entsprechen würde.

Ein Vergleich des GeoMol 2021 Modells mit den Bohrlochtemperaturen im oberen Muschelkalk zeigen auf, dass die erwähnte Oberflächentemperatur zu hoch ist. Die Unterschiede sind in der Grafik 23 ersichtlich. Demnach wurde das neue Temperaturmodell basierend auf den Bohrlochdaten erstellt, damit es repräsentativ für die Oberflächentemperatur und den geothermischen Gradienten ist.

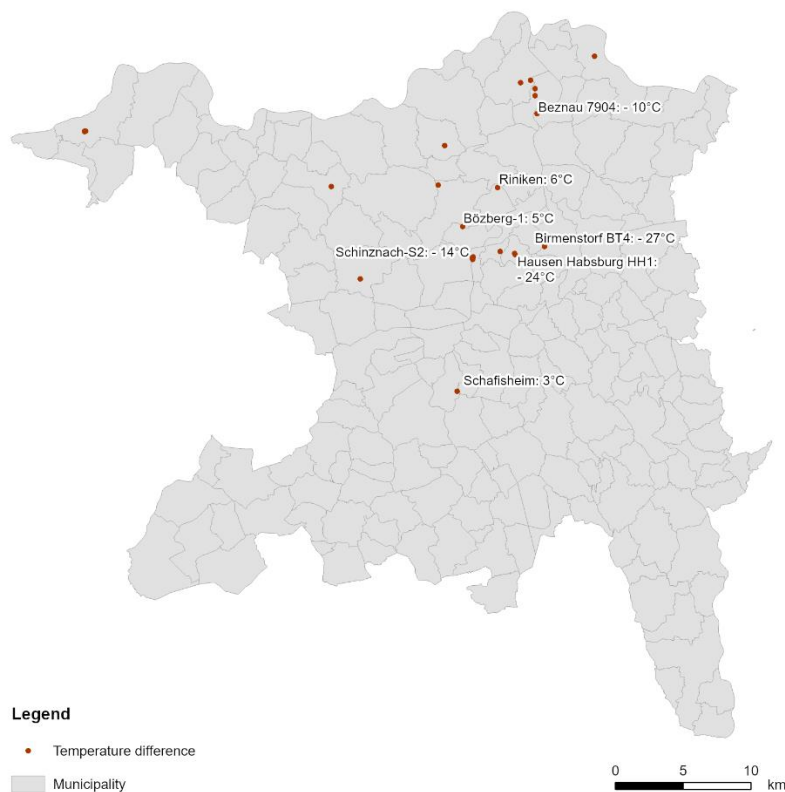


Abbildung 20: Differenzen Bohrlochdaten und GeoMol2021 im Muschelkalk.

Für die Modellierung wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt mit folgenden Szenarien:

- Geothermischer Gradient wurde auf $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ gesetzt mit Oberflächentemperaturen von 10, 15 und 25°C .
- Oberflächentemperatur wurde auf 12°C festgelegt mit Gradienten von 33, 39 und 45°C .

Die Temperaturmodelle wurden mit folgender Rasterberechnung erstellt:

$$\text{Raster Temperaturmodell} = \text{Oberflächentemperatur} + \text{Tiefe Muschelkalk} + \text{geothermischer Gradient}$$

Anhand des Vergleiches der erstellten Temperaturmodelle mit den Bohrlochtemperaturen sowie dem GeoMol 2021 zeigt das Modell mit einem geothermischen Gradienten von 39°C sowie einer Oberflächentemperatur von 12°C die beste Korrelation. Dieses "best-case" Szenario diente als Inputdatei für die vorliegende Studie (Abbildung 21). Im weiss dargestellten nordwestlichen Teil des Kantons werden keine Daten dargestellt (NODATA), da der Muschelkalk die Oberfläche durchdringt und eine Temperatur von < 12°C aufweist.

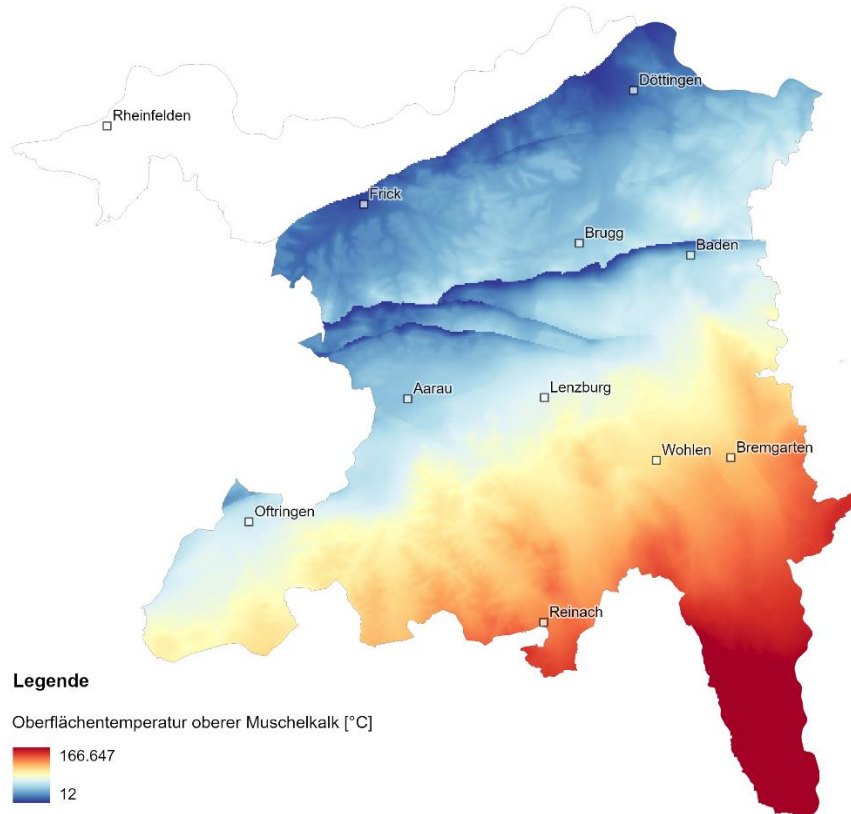


Abbildung 21: Temperaturmodell mit Gradienten 39°C/km und Oberflächentemperatur von 12°C.

A2: Aufführung Bohrlochdaten

Bohrloch-Nr	Name	Oberkante Bohrung [m.ü.M.]	Tiefe Top Muschelkalk ab Oberkante Bohrung [m]	Gemessene Temperatur Top Muschelkalk [°C]
1	Neubau Wasserreservoir SB303	349	11	0
2	Neubau Wasserreservoir SB301	352	8	0
3	Neubau Wasserreservoir SB402	359	10	0
4	Neubau Wasserreservoir SB304	352	6	0
5	Neubau Wasserreservoir SB401	364	14	0
6	Frick 5	346	150	0
7	11-NS-AZ-29	426	56	0
8	Bözberg-2	624.33	748.27	0
9	Bözberg-1	513.29	813	47.02
10	Densbüren-Asp	517	39	13.7
11	Schadenfall Bad Schinznach B1	342	6	0
12	Schadenfall Bad Schinznach B2	342	6	0
13	Schadenfall Bad Schinznach B3 S	342	6	0
14	Schinznach-S2	342	72	32
15	Schadenfall Bad Schinznach B4 S	342	7	0
16	Schadenfall Bad Schinznach B5	343	8	0
17	Schadenfall Bad Schinznach B6	343	6	0
18	AZ 3D15-12	451	70	0
19	Hausen Habsburg HH1	380	281	24.15
20	EWS Hausen-Habsburg	381	2	0
21	Birmenstorf BT4	344	134	22.61
22	Kiesprospektion Hinterbaenkler SB4	367	55	0
23	Kiesprospektion Hinterbaenkler SB2	345	55	0
24	Kies Schlattboden SB1	348	30	0
25	Böttstein	347	122	17.34
26	Beznau 7904	326	220	23.41

27	Zurzach Z3	346	211	0
27	Riniken	385	616	45
28	Schafisheim	421	1228	68.25
29	Pfaffnau-1	500	1546	0

Tabelle 4: Informationen zu den in Abbildung 19 dargestellten Bohrlochdaten.