

Landesweite Ermittlung des Erdwärmesonden-Potenzials für die kommunale Wärmeplanung in Baden-Württemberg

Dokumentation

12/2022

Impressum

Herausgeberin

KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH

www.kea-bw.de

Redaktion

Dr. Max Peters

KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH

Autoren:

Dr. Max Peters

KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH

Dr. Johannes Miocic

Energy and Sustainability Research Institute Groningen, Universität Groningen (NL)

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff

Institut für Gebäude- und Energiesysteme IGE, Hochschule Biberach

Unter Mitwirkung von:

Dr. Volker Armbruster

Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Die Ermittlung des landesweiten Erdwärmesonden-Potenzials für die kommunale Wärmeplanung haben folgende Institutionen freundlicherweise durch die Lieferung von Geodaten unterstützt: das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL), die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) und das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Die genannten Institutionen übernehmen keinerlei Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Datengrundlage.

Rückmeldungen und Hinweise zum methodischen Vorgehen sowie zum digitalen Kartenmaterial können direkt an die KEA-BW gerichtet werden.

Kontakt: waermewende@kea-bw.de

Karlsruhe im Dezember 2022

Inhalt

Disclaimer	4
1. Hintergrund kommunale Wärmeplanung	5
2. Potenzialermittlung im Zuge der kommunalen Wärmeplanung	7
3. Dokumentation der Berechnung des technischen Potenzials von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg	11
3.1 Datengrundlagen	11
3.2 Methodisches Vorgehen.....	12
Platzierung von Erdwärmesonden in Bezug auf Infrastruktur/Bebauung	12
Berücksichtigung geologischer und wasserwirtschaftlicher Restriktionen für Sondenplatzierung	14
Berechnung der Interaktion zwischen Erdwärmesonden.....	14
Berechnung der Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Erdwärmesonden.....	15
3.3 Darstellung der Ergebnisse	16
Potential auf Flurstückebene:	16
Potential als Raster:	16
Exkurs: Landesweites Potenzial von Erdwärmesonden für die Wärmewende	18
Literaturangaben	19

Disclaimer

Verwendungszweck: Die KEA-BW stellt allen nach dem Klimaschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg (**KSG BW**) zur Erstellung und Fortschreibung eines kommunalen Wärmeplans verpflichteten großen Kreisstädten und Stadtkreisen sowie den freiwillig wärmeplanenden Gemeinden und Planungskonvois, und Dienstleistungsunternehmen im Auftrag dieser Gemeinden in Baden-Württemberg Daten zur Abschätzung des Erdwärmesonden-Potenzials zur Verfügung. Die Bereitstellung der Daten für die Gesamtfläche Baden-Württembergs erfolgt nur nach Unterzeichnung einer mit der KEA-BW geschlossenen **Nutzungsvereinbarung**. Damit verpflichten sich die Nutzerinnen und Nutzer zur Verwendung der Daten allein zum Zwecke der Erstellung oder Fortschreibung eines kommunalen Wärmeplans.

Anwendungshinweise: Bei der Ermittlung des technischen Potenzials von Erdwärmesonden für die kommunale Wärmeplanung wurden maßgeblich die Restriktionen berücksichtigt, die dem Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (**ISONG**) des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau zugrunde liegen. Hierbei handelt es sich um Bohrtiefenbegrenzungen aufgrund des Grundwasserschutzes. In Gebieten, in denen sulfatgesteinsführende Formationen (Grabfeld-Formation und Diemel-Formation des Mittleren Muschelkalks) im Untergrund verbreitet sind, wurde das Potenzial nur bis zum Top der jeweiligen Formation berechnet (weitere Bohrtiefenbegrenzungen). In Gebieten, in denen Erdwärmesonden-Bohrungen aufgrund von komplexen geologischen Verhältnissen und möglicher Gefahren im Einzelfall zu beurteilen sind, wurde kein Potenzial berechnet. Eine Ausnahme bilden Teilflächen dieser Gebiete, in denen eine unkritische Bohrtiefe angegeben werden kann. Die geologischen Daten haben eine Unschärfe und sind nicht flurstücks-scharf.

Weitere Restriktionen bestehen im Zusammenhang mit Schutzgebieten und Zustrombereichen genutzter Grundwasserfassungen. Der zugrundeliegende Datensatz der Wasser- und Heilquellenschutzgebiete wurde von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Stand April 2022) bezogen. Zu beachten ist, dass Wasser- und Heilquellenschutzgebiete Änderungen unterliegen.

Über die konkrete Genehmigungsfähigkeit von Erdwärmesonden-Vorhaben entscheidet jeweils die zuständige Genehmigungsbehörde (Umweltamt des jeweiligen Stadt- oder Landkreises). Daher ersetzt die hier vorgestellte Methodik weder eine sorgfältige Antragsstellung noch die behördliche Prüfung der Genehmigungsfähigkeit im Zuge eines Genehmigungsverfahrens.

Datenschutzhinweis: Die bereitgestellten Ergebnisse sind als mathematische Werte anzusehen, die durchaus von den realen Werten abweichen können. Durch die Vielzahl an Daten, die in die Berechnung mit eingeflossen sind, kann das daraus resultierende Ergebnis nur ein Schätzwert sein. Daher handelt es sich nicht um personenbezogene Daten, auch wenn die Daten teilweise flurstücks-scharf dargestellt sind. Statistisch errechnete Daten fallen selbst nicht unter die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO).

Haftungsausschluss: Die KEA-BW gemeinsam mit ihren Projektpartnern aus den zuständigen Behörden des Landes sowie die wissenschaftlichen Partner haben die Daten mit größter Sorgfalt zusammengestellt und weiterverarbeitet. Die Autoren übernehmen keinerlei Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Ergebnisse. Haftungsansprüche gegenüber den Autoren sind ausgeschlossen.

1. Hintergrund kommunale Wärmeplanung

Der kommunale Wärmeplan ist ein zentrales Instrument für eine klimaneutrale Stadtentwicklung und für das Erreichen des klimaneutralen Gebäudebestands aller Kommunen in Baden-Württemberg spätestens bis zum Jahr 2040.

Mit dem Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg (KSG BW) gibt das Land Baden-Württemberg allen Gemeinden die Chance, einen kommunalen Wärmeplan zu erstellen und fortzuschreiben. Die großen Kreisstädte und Stadtkreise müssen bis zum 31. Dezember 2023 einen kommunalen Wärmeplan vorlegen. Zusätzlich steht allen Gemeinden und Planungskonvois ein [Förderprogramm](#) für die freiwillige kommunale Wärmeplanung zur Verfügung.

Das KSG BW macht Wärmeplanung mit der Verpflichtung zur Erstellung und Fortschreibung eines kommunalen Wärmeplans für Stadtkreise und Große Kreisstädte zum Teil der kommunalen Daseinsvorsorge. Kommunale Wärmeplanung im Sinne des KSG BW ist ein strategischer Planungsprozess mit dem Ziel der klimaneutralen Wärmeversorgung bis zum Jahr 2040. Die Erstellung eines kommunalen Wärmeplans ist Bestandteil dieses Prozesses. Ein kommunaler Wärmeplan umfasst vier Elemente, die der [Handlungsleitfaden Kommunale Wärmeplanung](#) des Umweltministeriums detailliert beschreibt. Es handelt sich um folgende vier Elemente:

1. Bestandsanalyse

Erhebung des aktuellen Wärmebedarfs und -verbrauchs und der daraus resultierenden Treibhausgas-Emissionen, einschließlich Informationen zu den vorhandenen Gebäudetypen und den Baualtersklassen, der Versorgungsstruktur aus Gas- und Wärmenetzen, Heizzentralen und Speichern sowie Ermittlung der Beheizungsstruktur der Wohn- und Nichtwohngebäude.

2. Potenzialanalyse

Ermittlung der Potenziale zur Energieeinsparung für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme in den Sektoren Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie und öffentliche Liegenschaften. Erhebung der lokal verfügbaren Potenziale erneuerbarer Energien, der Kraft-Wärme-Kopplung und Abwärmepotenziale.

Hier kommt der bereitgestellte Datensatz zum Erdwärmesonden-Potenzial zur Anwendung.

3. Aufstellung Zielszenario

Entwicklung eines Szenarios zur Deckung des zukünftigen Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien, Kraft-Wärme-Kopplung und Abwärme zur Erreichung einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Dazu gehört eine räumlich aufgelöste Beschreibung der dafür benötigten zukünftigen Versorgungsstruktur im Jahr 2040 mit einem Zwischenziel für das Jahr 2030.

4. Wärmewendestrategie

Formulierung eines Transformationspfads zur Umsetzung des kommunalen Wärmeplans mit ausgearbeiteten Maßnahmen, Umsetzungsprioritäten und Zeitplan für die nächsten Jahre und einer Beschreibung möglicher Maßnahmen für die Erreichung der erforderlichen Energieeinsparung und den Aufbau der zukünftigen Energieversorgungsstruktur.

Der Prozess der kommunalen Wärmeplanung führt Potenziale und Bedarfe systematisch zusammen. Auf diese Weise lassen sich Einsatzmöglichkeiten der Energiequellen im künftigen Energiesystem definieren und lokal umsetzen. Nicht nur in Neubauten wird der oberflächennahen Geothermie künftig eine wichtige Rolle zukommen, sei es beispielsweise durch die Erschließung der Erdwärmepotenzials mittels einzelner Erdwärmesonden-Anlagen, durch Kalte Nahwärmenetze oder Niedertemperatur-Wärmenetze mit zentraler Großwärmepumpe mit einer oberflächennahen geothermischen Wärmequelle.

Bei der nachfolgenden Einbindung des kommunalen Wärmeplans in die weiteren kommunalen Planungsaufgaben sollten sich die Beteiligten der Wärme- und Stadtplanung regelmäßig abstimmen. Ein kommunaler Wärmeplan wirkt dabei als Routenplaner. Denn seine Ergebnisse und Handlungsvorschläge dienen dem Gemeinderat, den Fachabteilungen, Energieunternehmen wie allen Ausführenden als Grundlage für die weitere Stadt- und Energieplanung. Während des gesamten Prozesses gilt es, die Inhalte anderer Vorhaben innerhalb der Kommune, etwa die der Flächennutzungs- oder Bebauungsplanung, aber auch der Regionalplanung, zu berücksichtigen und gegenseitig abzugleichen.

Der kommunale Wärmeplan stützt sich auf den jeweils aktuellen Kenntnisstand zu Rahmenbedingungen, Flächenverfügbarkeit, Technologie- und Kostenentwicklungen. Für Planungsgrundlagen für oberflächennahe Geothermie-Anlagen (Quellerschließung, Sole-Wasser oder Wasser-Wasser-Wärmepumpen sowie Kalte Nahwärmenetze oder Niedertemperatur-Wärmenetze mit zentraler Großwärmepumpe) sei hier auf die entsprechenden Einträge im [Technikkatalog zur Unterstützung der kommunalen Wärmeplanung](#) des Landes hingewiesen. Bei der Weiterentwicklung der Wärmewendestrategie mit Fortschreibung des kommunalen Wärmeplans müssen entsprechend auch die zugrundeliegenden Annahmen aktualisiert werden. Im Laufe der Jahre werden somit die notwendigen Schritte zur Zielerreichung immer konkreter und der Transformationspfad immer genauer quantifiziert.

Die hier vorgestellte Dokumentation der landesweiten Ermittlung des technischen Potenzials von Erdwärmesonden für die kommunale Wärmeplanung hält Angaben zur Datengrundlage und Methodik für Fachplanerinnen und Fachplaner kommunaler Wärmepläne bereit.

2. Potenzialermittlung im Zuge der kommunalen Wärmeplanung

Bei der Erstellung eines kommunalen Wärmeplans erfolgt nach dem ersten Schritt der Erhebung der Energiebedarfe des Gebäudebestands, dann im zweiten Schritt die gebietsscharfe Ermittlung sämtlicher Potenziale an erneuerbaren Energien und Abwärme auf dem Gebiet der Kommune. Dabei werden zunächst konsequent alle technischen Potenziale bestimmt. Das heißt, es werden zunächst alle Wärmequellen und Erzeugungsflächen basierend auf Verfügbarkeit und gültigem Planungs- und Genehmigungsrecht ausgewiesen. Annahmen zur technisch-wirtschaftlichen Effizienz kommen dann in einem folgenden Schritt der Wärmeplanung zum Tragen.

Das technische Potenzial (siehe *Abbildung 1*) ist der Teil des theoretischen Potenzials, der sich unter Berücksichtigung einer Anzahl an Ausschlusskriterien wie beispielsweise Flächenverfügbarkeit auf dem Gebiet der Kommune erschließen lässt. Es ist somit die Obergrenze des maximal möglichen Nutzungspotenzials. Ob ein solches Potenzial erschließbar, also real nutzbar ist, zeigt die technisch-wirtschaftliche Beurteilung bei der Ausweisung von Eignungsgebieten für Wärmenetze oder Einzelversorgung. Die Potenzialerhebung erfolgt grundsätzlich unabhängig von der Einteilung der Kommune in Einzelgebiete oder Quartiere und unabhängig von der Ausweisung von möglichen Versorgungsgebieten. Diese Vorgehensweise ist wichtig, da sich der Raumbezug im Energiesystem der Zukunft dynamisch anhand der Entscheidung für einen Transformationspfad hin zum Zielszenario 2040 ergeben wird. Möglicherweise ergibt die Erhebung der theoretischen oder technischen Potenziale einen Überschuss auf der Wärmeangebotsseite. Bereits genutzte Potenziale sind bei der Potenzialerhebung zu berücksichtigen. Diese Anlagen besitzen in aller Regel Bestandsschutz.

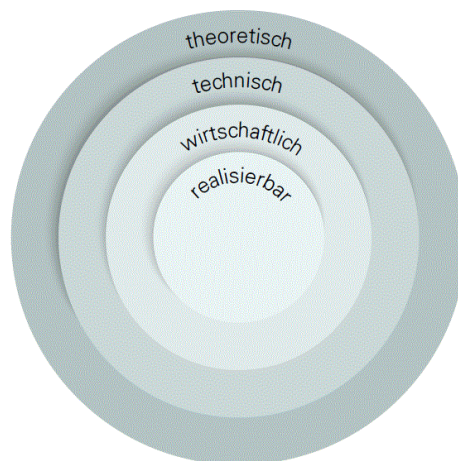


Abbildung 1: Beziehung zwischen theoretischem, technischem, wirtschaftlichem und realisierbarem Potenzial. Die Potenzialanalyse der erneuerbaren Energien im Zuge der kommunalen Wärmeplanung weist technische Potenziale aus. Ob und wie sie wirtschaftlich erschlossen werden können, zeigen detaillierter der Teilgebiets Steckbrief und Maßnahmenkatalog. Bildnachweis: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

In der Praxis haben sich Indikatorenmodelle bewährt. Ziel dieser Methodik ist die automatisierte Bestimmung geeigneter Gebiete, vor allem von flächenintensiven erneuerbaren Energiequellen oder solchen, die amtlichen Restriktionen (zum Beispiel zur Bohrtiefe) unterliegen.

In einem Katalog fasst das Planungsteam bekannte Ausschlusskriterien aufgrund von genehmigungsrechtlichen Anforderungen und Grenzwerten der Effizienz der Wärmequellenerschließung zusammen und implementiert diese in die Flächenfindung beziehungsweise Potenzialermittlung.

Abbildung 2 zeigt dies schematisch am Beispiel der Ermittlung der Potenzialgebiete für oberflächennahe Geothermie:

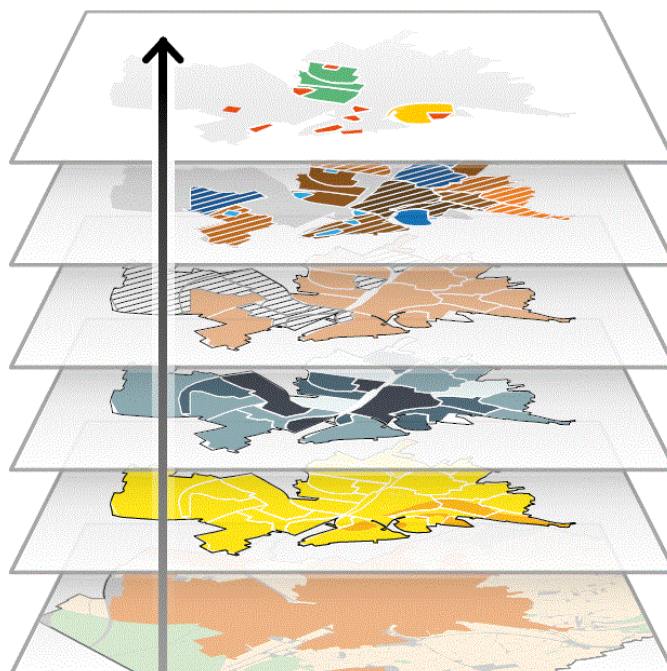


Abbildung 2: Beispielhaftes Vorgehen bei einem Indikatormodell am Beispiel der Ermittlung der Potenzialgebiete für die oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden) hin zur Zonierung in Eignungsgebiete für die zentrale und dezentrale Wärmeversorgung: 1. Erfassung der Siedlungsstruktur und Ausschluss aller bebauten Gebiete, 2. Erfassung der geothermischen Wärmeentzugsleistung unter Berücksichtigung von Ausschlussgebieten, zum Beispiel Wasser- und Heilquellenschutzgebiete, 3. Ermittlung des bebauten Flächenanteils je Flurstück, 4. Evtl. Ausschluss gewisser Großverbraucher in Gewerbe- und Industriegebieten (im Datensatz wurden diese Gebäude *nicht* ausgeschlossen), 5. Selektion der Gebäude mit Baujahr 60-er und 70-er Jahre, 90-er Jahre sowie Bauentwicklungsgebiete und 6. Ermittlung der Potenzialgebiete für oberflächennahe Geothermie nach Priorität der Realisierbarkeit. Quelle: Smart Geomatics Informationssysteme GmbH.

Oberflächennahe geothermische Anlagen machen sich das durch die Erdwärme und durch solare Einstrahlung kontinuierlich erwärmte Erdreich und Grundwasser zunutze. Dabei unterscheidet man zwischen Erdwärmesonden, Erdwärme-/Horizontalkollektoren und geothermischen Brunnenanlagen, die das Grundwasser erschließen. Diese Dokumentation legt den Fokus auf die Potenzialermittlung für Erdwärmesonden-Anlagen im Zuge der kommunalen Wärmeplanung.

Jede geothermische Nutzform muss sich an den örtlichen Gegebenheiten zur geologischen und hydrogeologischen Situation orientieren. **Daher ersetzt die hier vorgestellte Methodik zur Potenzialabschätzung keine sorgfältige Antragsstellung und Prüfung der Genehmigungsfähigkeit durch ein Genehmigungsverfahren.** Schwierige Untergrundverhältnisse führen zu erhöhten Anforderungen an die Planung und Ausführung der Bohrung.

Das Informationssystem **ISONG** bietet Datengrundlagen zum geothermischen Potenzial und zu Einschränkungen und Risiken bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Erdwärmesonden und Flächenkollektoren (siehe Kartendarstellungen und Standortauskunft in **ISONG**). Das Informationssystem des Landes bildet die Anforderungen bei der Herstellung von Erdwärmesonden, wie sie in den Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden des Umweltministeriums Baden-Württemberg (siehe Literatur) aufgeführt sind, flächenbezogen ab.

Die in ISONG für Erdwärmesonden enthaltenen Bohrtiefenbegrenzungen aufgrund des Grundwasserschutzes wurden für die Auswertungen zur kommunalen Wärmeplanung berücksichtigt.

In Gebieten, in denen sulfatgesteinsführende Formationen (Grabfeld-Formation und Diemel-Formation des Mittleren Muschelkalks) im Untergrund verbreitet sind, wurde das Potenzial nur bis zum Top der jeweiligen Formation berechnet (weitere Bohrtiefenbegrenzungen). In Gebieten, in denen Erdwärmesonden-Bohrungen aufgrund von komplexen geologischen Verhältnissen und möglicher Gefahren im Einzelfall zu beurteilen sind, wurde *kein* Potenzial berechnet (Ausnahme bilden Teilflächen dieser Gebiete, in denen eine unkritische Bohrtiefe angegeben werden kann). Die geologischen Daten haben eine Unschärfe und sind nicht flurstückscharf.

Weitere Restriktionen bestehen im Zusammenhang mit Schutzgebieten und Zustrombereichen genutzter Grundwasserfassungen. Der zugrundeliegende Datensatz der Wasser- und Heilquellenschutzgebiete wurde von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Stand April 2022) bezogen. Zu beachten ist, dass Wasser- und Heilquellenschutzgebiete Änderungen unterliegen können. Räumliche Auskünfte über Wasserschutzgebiete gibt der Staatlich-Kommunale Datenverbund für Baden-Württemberg (SKDV BW) oder landesweit der interaktiven Dienst UDO ([Umwelt-Daten und -Karten Online](#)).

Die wasserwirtschaftliche Genehmigungsfähigkeit von Erdwärmesonden in Wasser- und Heilquellenschutzgebieten sowie im Zustrombereich von Mineralwassernutzungen ist im [Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden](#) des Landes Baden-Württemberg beschrieben. Je nach Lage in einer Schutzgebietszone können Erdwärmesonden nicht genehmigungsfähig beziehungsweise mit Einschränkungen genehmigungsfähig sein. Das bedeutet in der Regel, dass ausschließlich Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit verwendet werden kann.

Das bereits erschlossene Potenzial der oberflächennahen Geothermie kann durch Abfrage bei den Versorgern (installierte Sole-Wasser-Wärmepumpen), über Auskünfte des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) oder das ISONG Portal (Layer unter *Geothermische Nutzungen*) ermittelt werden.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die bei der Ermittlung des geothermischen Potenzials für Erdwärmesonden berücksichtigten Restriktionen: Bohrtiefenbegrenzung, Schutzgebiete von Grundwassernutzungen (Wasser- und Heilquellenschutzgebiete, Zustrombereiche von Mineralwassernutzungen) und Gebiet mit Einzelfallbeurteilung in Baden-Württemberg.

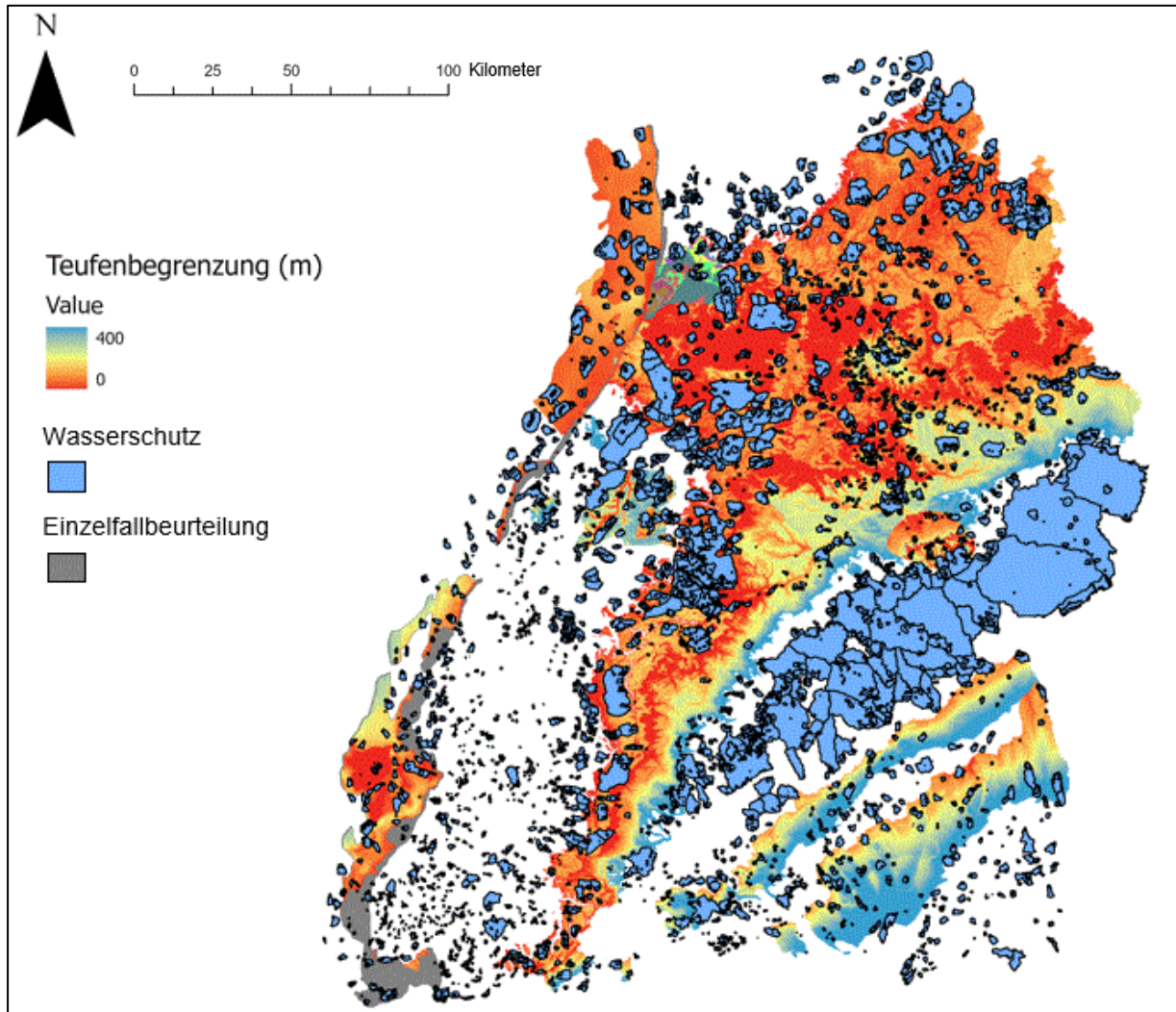


Abbildung 3: Überblick über diverse Bohrtiefenbeschränkungen und sämtliche Wasserschutzgebiete in Baden-Württemberg. Gebiete mit Einzelfallbetrachtung (grau) wurden in dieser Studie explizit ausgelassen. Datengrundlage: ISONG.

3. Dokumentation der Berechnung des technischen Potenzials von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg

Die im Folgenden vorgestellte Methodik löst das im [Handlungsleitfaden Kommunale Wärmeplanung](#) vorgestellte Verfahren ab (siehe darin Kapitel 3.3.2). Die hier bereitgestellten Daten bieten damit eine einheitliche Planungsgrundlage zur Ermittlung des technischen Potenzials für Erdwärmesonden im Zuge der Erstellung eines kommunalen Wärmeplans in Baden-Württemberg. Grundsätzlich ließe sich das hier vorgestellte Verfahren, bei Verfügbarkeit der notwendigen (hydro-)geologischen und geothermischen Eingangsparameter, auf andere Gebiete übertragen.

3.1 Datengrundlagen

Folgende Daten bilden die Grundlagen zur Ermittlung des technischen Potenzials von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg:

- Liegenschaftskarte aus ALKIS:
 - Flurstücke (Wohnbaufläche & Flächen gemischter Nutzung (als Rechteck bzw. geschlossenes Polygon))
 - Gebäudeumrisse (als Rechteck bzw. geschlossenes Polygon)
- Hydrogeologische, geologische Einschränkungen (Auszug aus der Datengrundlage von ISONG¹):
 - Bohrtiefenbegrenzung (Grundwasserschutz und Sulfatgesteine)
 - Gebiete mit Einzelfallbeurteilung (keine Potenzialberechnung, ggf. bis zur unkritischen Bohrtiefe)
- Schutzgebiete von Grundwassernutzungen:
 - Wasser- und Heilquellenschutzgebiete
 - Zustrombereiche von Mineralwassernutzungen
- Geothermische Daten
 - Geothermische Wärmestromdichte („Terrestrischer Wärmefluss“)
 - Mittlere jährliche Oberflächentemperatur
 - Wärmeleitfähigkeiten in Anlehnung an die geothermische Effizienz nach ISONG

Für die zugrunde gelegten mathematischen und geothermischen Grundlagen zur Potenzialermittlung sei hier auf die Arbeit von [Miocic & Krecher \(2022\)](#) verwiesen.

¹ Weiterführende Erläuterungen zu ISONG finden sich in der [Dokumentation des LGRB](#), siehe Literaturliste.

3.2 Methodisches Vorgehen

Für die Berechnung des oberflächennahen Geothermiepotentials wurden vier Schritte durchgeführt, die im Folgenden weiter detailliert beschrieben werden:

1. Platzierung von Erdwärmesonden in Bezug auf Infrastruktur/Bebauung
2. Berücksichtigung geologischer und wasserwirtschaftlicher Restriktionen für die Platzierung der Erdwärmesonde(n)
3. Berechnung der Interaktion zwischen Erdwärmesonden
4. Berechnung der maximal möglichen Wärmeentzugsleistung (kW) sowie des energetischen Potenzials (geothermische Ergiebigkeit) (kWh/a) (nur Heizen) der Erdwärmesonden jedes Flurstücks (Berechnung basierend auf GEO-HAND^{light}, siehe auch Koenigsdorff & Van de Ven, 2019).

Die folgende Schilderung veranschaulicht einige der Berechnungsschritte anhand eines Auszugs aus dem landesweiten Datensatz (siehe auch *Abbildung 4*):

Platzierung von Erdwärmesonden in Bezug auf Infrastruktur/Bebauung

Für die Platzierung der Erdwärmesonden auf Flurstücken wurde das vom Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg (LGL) zur Verfügung gestellte Liegenschaftskataster (ALKIS) genutzt. Folgende Schritte wurden mit den ALKIS Daten in QGIS v3.24 durchgeführt:

1. Auswahl aller Flurstücke (UIS_0100000048600001) mit der Flächenbezeichnung „Wohnbaufläche“ (41001) und „Fläche gemischter Nutzung“ (41006) ("OBJEKTART" = 41001 oder "OBJEKTART" = 41006)
2. Auswahl aller in 1. ausgewählten Flächen mit Wohnhäusern („Gebäudefunktions ID“ = 1010)
3. Ein Buffer von 2 m um alle Gebäude (= Mindestabstand Erdwärmesonden von Gebäuden)
4. Subtraktion der Gebäudefläche + Buffer von den in 2. ausgewählten Flächen
5. Zufällige Verteilung von Erdwärmesonden auf den in 4. erhaltenen Flächen (QGIS: *Random Points in Polygons*, *Random seed* = 1, *Maximum number of search attempts* = 20) unter Einhaltung folgender Kriterien:
 - Mindestabstand von 10 m zwischen einzelnen Erdwärmesonden, auch zu Erdwärmesonden auf benachbarten Flurstücken
 - Modell 1: Eine Erdwärmesonde pro Flurstück
 - Modell 2: Maximale Anzahl von Erdwärmesonden pro Flurstück (bis zu max. 20 Erdwärmesonden)
 - Transformation aller Polygone und Punktdaten in ETRS 1989 UTM Zone 32N.

Eine etwaige Reduzierung der unter Punkt 4. oben ermittelten Freiflächen, beispielsweise durch den Bewuchs von Bäumen oder sonstigen nicht in der Liegenschaftskarte verzeichneten ungeeigneten Flächen („Schwimmbekken“, „Gartenhaus“ etc.), kann hier nicht weiter berücksichtigt werden. Sie erfordert eine für den Zweck der kommunalen Wärmeplanung ungeeignete Granularität und muss bei der Detailplanung, die immer der kommunalen Wärmeplanung folgt, berücksichtigt werden.

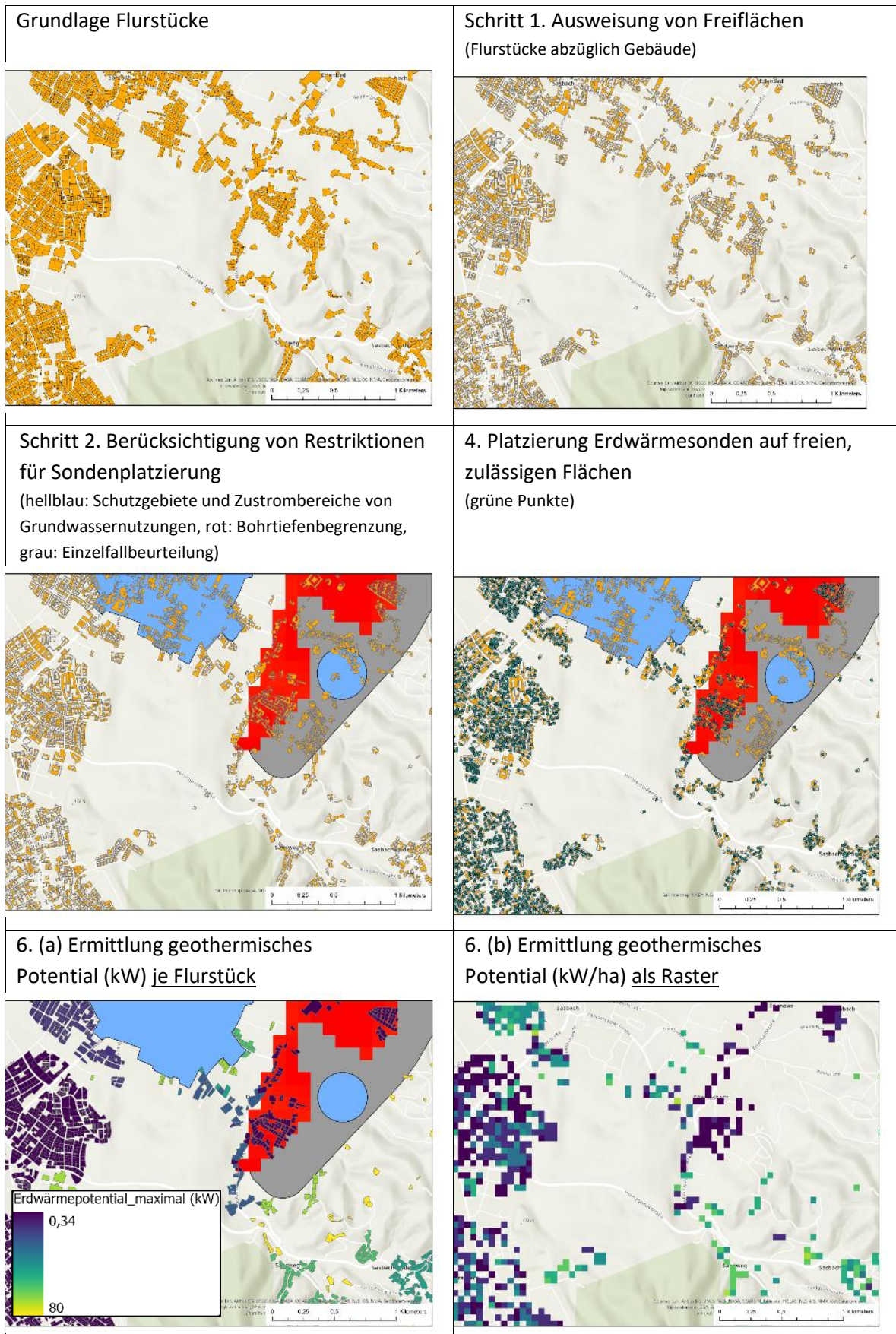


Abbildung 4: Graphische Übersicht über das methodische Vorgehen der Ermittlung des oberflächennahe Geothermipotentials (Schritte 3. bis 5. wurden hier aus Gründen der Darstellung ausgespart). Erläuterungen siehe Text.

Berücksichtigung geologischer und wasserwirtschaftlicher Restriktionen für die Platzierung der Erdwärmesonde(n)

Sämtliche Punktdaten und Flurstückdaten wurden dann nach *ArcGIS Pro* 2.9.3 transformiert, um die geologischen und wasserwirtschaftlichen Einschränkungen zu berücksichtigen:

1. Transformation aller von LGRB und LUBW erhaltenen Daten in ETRS 1989 UTM Zone 32N
2. „*Spatial Selection*“ aller Erdwärmesonden-Punkte sowie Flurstücke die innerhalb („*within*“) von Schutzgebieten von Grundwassernutzungen (Wasser- und Heilquellenschutzgebiete und Zustrombereiche von Mineralwassernutzungen) liegen, in denen Erdwärmesonden nicht genehmigungsfähig sind, und Löschung dieser Punkte
3. Berechnung der maximalen Bohrlochtiefe auf Grundlage der vom LGRB gelieferten Daten für alle Erdwärmesonden-Punkte und Flurstücke (minimale Tiefe je Flurstück, falls das Flurstück in mehrere Rasterfelder fällt)
4. Löschung aller Erdwärmesonden-Punkte, die in den Einzelfallbeurteilungsbereichen liegen und für welche keine maximale Tiefe angegeben ist

In einigen Zonen von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten sind Erdwärmesonden mit Einschränkungen genehmigungsfähig (siehe auch Kartendarstellungen in **ISONG**). Die Einschränkungen beinhalten in der Regel die Verwendung von ausschließlich Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit, wodurch das geothermische Potenzial bei gleicher Erdwärmesonden-Länge vermindert wird. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde innerhalb von Wasserschutzgebieten Zone III B ein Potential unter der Voraussetzung berechnet, dass die Temperatur am Wärmepumpen-Auslauf mindestens 3°C beträgt, um ein Gefrieren des Wärmeträgers Wasser zu verhindern (siehe *Tabelle 1*).

Berechnung der Interaktion zwischen Erdwärmesonden

Um die Interaktion von Erdwärmesonden untereinander zu berechnen, werden die Koordinaten und Tiefen aller in einer bestimmten Entfernung um das Flurstück liegenden Erdwärmesonden benötigt. Dafür wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Buffer (Fangradius) von X um jedes Flurstück in *QGIS* (X ist die maximale Erdwärmesonden-Teufe auf dem Flurstück).
2. Intersektion aller Erdwärmesonden-Punkte mit den Polygonen aus 1. in der Programmiersprache *R*, mit dem Packet *sf*. Dies ist theoretisch auch in *QGIS* durchführbar, allerdings war die Berechnung in *R* deutlich schneller und weniger problematisch.
3. Jedes Sondenfeld (d. h. Erdwärmesonden auf dem Flurstück und innerhalb des Buffers/Fangradius X) kann dann aus der Intersektion herausgelesen werden.
4. Berechnung des g -Wertes (stationärer Endwert) für jedes Sondenfeld durch einen Python-Algorithmus. Dieser Algorithmus nutzt die Tiefe sowie X - und Y -Koordinaten aller Erdwärmesonden, um die Interaktion der Erdwärmesonden untereinander zu berücksichtigen und einen g -Wert (stationärer Endwert) für das gesamte Erdwärmesonden-Feld zu ermitteln. Siehe auch Miodic, J; Schleichert, L.; Van de Ven, A.; Koenigsdorff, R. (in prep.).

Berechnung der maximal möglichen Wärmeentzugsleistung und des energetischen Potenzials der Erdwärmesonden unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Erdwärmesonden

Die Berechnung des geothermischen Potentials erfolgte wie in GEO-HAND^{light} bzw. wie in Miocic & Krecher (2022) dargelegt auf Flurstückebene. Erdwärmesonden mit einer maximalen Tiefe von weniger als zehn Metern wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Ein eventueller Einfluss strömenden Grundwassers wird weder bei der Ermittlung des Potenzials je Flurstück noch bei der Berechnung der Interaktion zwischen Erdwärmesonden berücksichtigt.

Als Input für den in *R* laufenden Algorithmus wurden folgende Daten je Flurstück genutzt:

- Erdwärmesonden: Anzahl und Tiefe
- Jährliche gemittelte Oberflächentemperatur (von [Hotmaps](#), siehe Miocic & Krecher, 2022)
- Geothermische Wärmestromdichte, siehe Miocic & Krecher (2022)
- Wärmeleitfähigkeit in Anlehnung an die geothermische Effizienz aus ISONG
- g-Wert (stationärer Endwert, siehe oben).

Sonstige Annahmen, die in die Berechnungen einfließen, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über Berechnungsparameter

Parameter	Wert	
COP (Leistungszahl Wärmepumpe)	4,5	
Jahresvolllaststunden Heizen	1800 h/a	Verteilt auf das Winterhalbjahr
Effektiver Bohrlochwiderstand	0,1 (m*K)/W	
Bohrlochradius	0,0675 m	DN40 Doppel U
Temperatur an Wärmepumpenauslauf	Min. -3 °C; Min. 3 °C bei Nutzung mit Wasser	LQS EWS
Maximale Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt an der EWS	3 °C	LQS EWS
Volumetrische Wärmekapazität	2,18 MJ/(m ³ /K)	
Maximaler Temperaturunterschied EWS-ungestörtes Erdreich	17 °C in der Spitze; 11 °C bei kontinuierlicher Nutzung	LQS EWS

Der Output der Berechnungen enthält folgende Daten je Flurstück:

- *P*: Maximal mögliche Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden bzw. des Erdwärmesonden-Feldes in kW
- *q_EWS*: Maximale Wärmeentzugsleistung pro Erdwärmesonden-Meter (kW/m)
- *Q*: Jährliche entziehbare Energie in kWh/a, bei 1800 Volllaststunden im Winterhalbjahr.

3.3 Darstellung der Ergebnisse

Anhand der oben genannten Restriktionen werden die folgenden Datensätze zur Darstellung des technischen Potentials für Erdwärmesonden für die kommunale Wärmeplanung bereitgehalten. Die Rasterdatensätze beziehen sich auf die durchschnittliche Entzugsleistung (pro Hektar) aller Flurstücke, die sich mit der Rasterzelle schneiden. „Maximum“ bezieht sich immer auf das maximale Potential (maximale Anzahl von Erdwärmesonden je Flurstück), „Minimum“ bezieht sich immer auf das minimale Potential (eine Erdwärmesonde pro Flurstück).

Potential auf Flurstückebene:

EWS_Lokationen_Minimum.shp

Lokationen der Erdwärmesonde bei einer Erdwärmesonde pro Flurstück.

EWS_Lokationen_Maximum.shp

Lokationen der Erdwärmesonden bei bis zu 20 Erdwärmesonden pro Flurstück.

Potential_Maximum.shp

Potential auf Flurstückebene bei einer maximalen Anzahl von Erdwärmesonden pro Flurstück².

Potential_Minimum.shp

Potential auf Flurstückebene bei einer Erdwärmesonde pro Flurstück².

Potential als Raster:

Potential_Maximum_100x100m.tif

Potential als 100x100-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 100x100-Meter-Zelle.

Potential_Maximum_50x50m.tif

Potential als 50x50-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 50x50-Meter-Zelle.

Potential_Maximum_25x25m.tif

Potential als 25x25-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 25x25-Meter-Zelle.

Potential_Minimum_100x100m.tif

Potential als 100x100-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 100x100-Meter-Zelle.

Potential_Minimum_50x50m.tif

Potential als 50x50-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 50x50-Meter-Zelle.

Potential_Minimum_25x25m.tif

Potential als 25x25-Meter-Raster. Der Rasterwert (in kW/ha) entspricht der durchschnittlichen Entzugsleistung pro Hektar in der 25x25-Meter-Zelle.

² P = Entzugsleistung (kW), q_{EWS} = maximale Wärmeentzugsleistung pro Erdwärmesonden-Meter (kW/m), Q = jährliche Arbeit (kWh).

Nicht betrachtet werden konnten die Gemarkungsflächen der Gemeinden Schuttertal, Titisee-Neustadt und Wolfach. Diese Gemeinden sind laut LGL bislang nicht für die Nutzung des ALKIS-Datensatzes lizenziert. Die mit größter Sorgfalt erfolgte Ermittlung der oben genannten technischen Potenziale folgte unter Berücksichtigung der oben genannten Restriktionen.

Typischerweise besitzen die hier weiterverarbeiteten geologischen Daten eine gewisse Unschärfe und können damit nicht flurstücksscharf ausgewiesen werden (siehe Inputdaten aus ISONG). Die Autoren dieser Studie empfehlen daher für die weitere Betrachtung des technischen Potenzials für Erdwärmesonden im Zuge der kommunalen Wärmeplanung die als Raster zur Verfügung gestellten Datensätze zu verwenden.

Exkurs: Landesweites Potenzial von Erdwärmesonden für die Wärmewende

Erdwärmesonden können einen signifikanten Beitrag zur Wärmewende leisten. Insbesondere für Wohngebäude im ländlichen Raum, wo konventionell hoch temperierte Wärmenetze aufgrund der geringen Wärmedichten an ihre Grenzen stoßen, oder wo Verbrennertechniken wie Pelletheizungen die Anforderungen an den Raumwärmebedarf eines Neubaus übersteigen.

Noch ist die so genannte Kalte Nahwärme eine fast ausschließlich in Neubaugebieten realisierte und sichere Versorgungsvariante. Sie bietet aber durchaus Potenziale für effiziente Bestandsgebäude, gerade auch in urbanen Gebieten. Darüber hinaus kann im Rahmen von Voruntersuchungen oder Machbarkeitsstudien der Einsatz einer zentralen Großwärmepumpe für ein Niedertemperatur-Wärmenetz überprüft werden, welches Energie zum Beispiel aus einer oberflächennahen geothermischen Quelle entzieht. Mit dieser Variante können potenziell auch weniger effiziente Gebäude versorgt werden.

Im Rahmen des Projekts wurde das landesweite Potenzial von Erdwärmesonden für die Wärmewende abgeschätzt. Das Ergebnis wurde durch einfache Aufsummierung der flurstückscharfen Potenziale ermittelt. Bei einer flächendeckenden Nutzung von Erdwärmesonden liegt ein technisches Wärmepotential von 9,3 TWh/a im Falle von einer Erdwärmesonden pro Flurstück vor. **Das maximale theoretische Wärmepotential, mit der maximal möglichen Anzahl von Erdwärmesonden pro Flurstück, liegt bei 34 TWh/a.** Der Wärmebedarf von Wohngebäuden des gesamten Landes Baden-Württembergs liegt laut Wärmeatlas des Landes bei maximal 80 TWh/a.

Es muss in jedem Fall beachtet werden, dass für die Erzeugung der Wärme durch Erdwärmesonden Strom benötigt wird. Die regenerative Stromerzeugung im Jahr 2021 betrug 18,9 TWh, mehr als genug, um das maximale theoretische Wärmepotential durch Erdwärme, welches etwa 7,5 TWh Strom benötigt, abzudecken.

Zukünftige Studien sollten die lokal erzeugbaren regenerativen Energiemengen, insbesondere im Winter, mit dem Strombedarf der zu den Erdwärmesonden gehörenden Wärmepumpenanlagen kombinieren, um Gebäude zu identifizieren, welche sich durch eine Kombination von Stromerzeugung (Dach-PV) und Erdwärmesonden jahresbilanziell (nahezu) ausgeglichen heizen lassen.

Literaturangaben

Download und Dokumentation GEO-HAND^{light}:

<https://innosued.de/energie/geothermie-software-2/>

Erläuterungen zum Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG): https://www.lgrb-bw.de/download_pool/is_geothermie-erlaeuterungen.pdf

Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG):

<https://isong.lgrb-bw.de/>

Koenigsdorff, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Koenigsdorff, R.; Van de Ven, A. (2019): Vereinfachte Auslegung oberflächennaher Geothermiesysteme - Version 3 & 4 des Programms GEO-HAND^{light}. bbr

Leitungsbau | Brunnenbau | Geothermie, 12/2019, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, Seite 72-76.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2021):

Handlungsleitfaden: Kommunale Wärmeplanung, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikation/did/handlungsleitfaden-kommunale-waermeplanung/>

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2005): Leitfaden zur

Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/publikation/did/leitfaden-zur-nutzung-von-erdwaerme-mit-erdwaermesonden/>

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2018): Leitlinien

Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/geothermie/lqs-ews/>

Miocic, J. M., Krecher, M. (2022): Estimation of shallow geothermal potential to meet building heating demand on a regional scale. Renewable Energy 185, 629 – 640,

doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.095>

Miocic, J; Schleichert, L.; Van de Ven, A.; Koenigsdorff, R. (Veröffentlichung in Vorbereitung):

Calculation of the geothermal potential for large areas with the steady-state solution of the finite line source.

