

Bayernweite, räumlich detaillierte Bestimmung des umsetzbaren Potenzials der oberflächennahen Geothermie zur Einbindung in den Energie-Atlas Bayern

Abschlussbericht

Stand 08.04.2024

Auftraggeber Landesamt für Umwelt (LfU)
Finanziert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Bearbeitung	Technische Universität München (TUM) Lehrstuhl Hydrogeologie Dr. Kai Zosseder, Fabian Böttcher, Christine Haas Arcisstraße 21 80333 München Tel.: +49 89 289 25834 Mail: kai.zosseder@tum.de	ENIANO GmbH Schwanthalerstr. 73 80336 München Tel.: +49 89 2154786 0 Mail: info@eniano.com	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) GeoZentrum Nordbayern Lehrstuhl für Geologie Dr. David Bertermann Henkestraße 9-11 91054 Erlangen Tel.: +49 9131 85 25824 Mail: david.bertermann@fau.de
-------------	--	--	--

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
1 Zielstellung	9
2 Überblick zur Vorgehensweise der Projektbearbeitung	10
3 Eingangsdaten	11
3.1 Geobasisdaten	11
3.1.1 ALKIS.....	11
3.1.2 Digitale Flurkarte (DFK)	11
3.1.3 Gebäudemodell LoD2	11
3.2 Geofachdaten	12
3.2.1 Zensus 2011, Auswertung „Gebäude im 100m-Gitter“	12
3.2.2 Denkmalschutz	12
3.3 Geologische Daten	12
3.3.1 Ausschlussgebiete	12
3.3.2 Bodeninformationssystem	12
3.3.3 Bodenschätzungskarte	13
3.3.4 Bohrtiefenbegrenzung	13
3.3.5 Detailstudien TUM	13
3.3.6 Digitales Geländemodell	13
3.3.7 Digitale Hydrogeologische Karten dHK100 und dHK500	13
3.3.8 Eignungsgebiete	13
3.3.9 HUEK250 – kf-Werte	14
3.3.10 Klimazonen	14
3.3.11 Quartärbasis.....	14
3.3.12 Wärmeleitfähigkeit	14
4 Aufbau des bayernweiten Gebäudemodells	15
4.1 Grundlagen	15
4.2 Gebäudegeometrie.....	15
4.3 Gebäudenutzung	16
4.4 Baualter	18
4.5 Gebäudemodell Bayern	22
4.6 Diskussion der Qualität.....	24
5 Aufbau einer bayernweiten Wärmebedarfsdarstellung	26
5.1 Analyse des Wärmebedarfs des Gebäudebestands.....	26
5.2 Analyse von Sanierungspotenzialen im Gebäudebestand	27
5.3 Gebäudedatenmodell für den Bestand und die Sanierung	29
5.4 Diskussion der Qualität.....	32
6 Bayernweites oberflächennahes Potenzial	33

6.1	<i>Definition der Potenziale</i>	33
6.2	<i>Prinzipielle Methode zur Potenzialbestimmung für GWWP, EWS und EWK.....</i>	35
6.3	<i>Methodik der Potenzialermittlung für Grundwasserwärmepumpen (GWWP).....</i>	36
6.3.1	<i>Einführung in die TAP-Methode.....</i>	36
6.3.2	<i>Beschreibung der Datengrundlage.....</i>	39
6.3.3	<i>Flurstückbezogene Berechnung des Potenzials (Anwendung für das Mischpult).....</i>	48
6.3.4	<i>Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern) 53</i>	
6.3.5	<i>Wirtschaftliche Aspekte</i>	57
6.4	<i>Methodik der Potenzialermittlung für Erdwärmesonden (EWS)</i>	57
6.4.1	<i>Einführung in die Methodik.....</i>	57
6.4.2	<i>Beschreibung der Datengrundlage.....</i>	59
6.4.3	<i>Flurstückbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für das Mischpult).....</i>	62
6.4.4	<i>Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern) 66</i>	
6.4.5	<i>Wirtschaftliche Aspekte</i>	69
6.5	<i>Methodik der Potenzialermittlung für Erdwärmekollektoren (EWK).....</i>	69
6.5.1	<i>Einführung in die Methodik.....</i>	69
6.5.2	<i>Beschreibung der Datengrundlage.....</i>	72
6.5.3	<i>Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern) 73</i>	
6.5.4	<i>Flurstückbezogene Berechnung des Potenzials (Anwendung für das Mischpult).....</i>	80
6.5.5	<i>Wirtschaftliche Aspekte</i>	81
7	<i>Umsetzbares Potenzial der oberflächennahen Geothermie</i>	82
7.1	<i>Einbeziehung des Wärmebedarfs im Gebäudebestand in die Potenzialanalyse</i>	82
7.2	<i>Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Grundwasserwärme</i>	83
7.3	<i>Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Erdwärmesonden</i>	84
7.4	<i>Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Erdwärmekollektoren.....</i>	85
7.5	<i>Synthese des technologieübergreifenden Potenzials.....</i>	86
8	<i>Fazit und Diskussion der Analyse</i>	91
8.1	<i>Diskussion der verwendeten Datengrundlage</i>	91
8.2	<i>Versorgungsanteil von oberflächennahen geothermischen Systemen in Bayern</i>	92
9	<i>Literaturverzeichnis</i>	96
10	<i>Anhang: Räumliches Potenzial und Potenzial von Baublöcken</i>	98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Erhebung des Potenzials der oberflächennahen Geothermie in Bayern.....	10
Abbildung 2: Flussdiagramm zur Ermittlung und Zuweisung der Gebäudenutzung.....	17
Abbildung 3: Differenzierung der Wohngebäude in Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser/Doppelhäuser (RH/DH) und Mehrfamilienhäuser (MFH).....	17
Abbildung 4: Verteilung Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudefunktion.....	18
Abbildung 5: Verteilung Gebäudeanzahl der unbeheizten Gebäude differenziert nach Gebäudefunktion.....	18
Abbildung 6: Flussdiagramm zur Zuweisung des Baualters für Gebäude	19
Abbildung 7: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude – ohne Adaption	20
Abbildung 8: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude - Adaption Wärmenachfrage 1950 - 1979 ..	20
Abbildung 9: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude - Adaption Wärmenachfrage pauschal zugewiesener Gebäude	21
Abbildung 10: Datenmodell bayerisches Gebäudemodell	22
Abbildung 11: Verteilung Gebäudenutzung nach Gebäudeanzahl (oben) und umbautes Volumen (unten).....	23
Abbildung 12: Aggregiertes, umbautes Volumen je Landkreis	24
Abbildung 13: Datenmodell zur Erhebung einer bayernweiten gebäudescharfen Wärmebedarfsdarstellung	29
Abbildung 14: Aggregierter Endenergiebedarf in GWh/a je Landkreis.....	31
Abbildung 15: Bayernweite Wärmedichtekarte, qualitative Darstellung mit relativer Einfärbung nach Wärmenachfrage von rot (geringe Wärmenachfrage) bis hellgelb (hohe Wärmenachfrage).....	32
Abbildung 16: Potenzialbegriffe aus dem Ergebnisbericht des Energiegipfels 2018 (StMWi, 2019)....	33
Abbildung 17: Karte der Ausschlussgebiete, insbesondere Natur- und Trinkwasserschutzgebiete (Quelle: LfU)	34
Abbildung 18: Der typische Aufbau einer Grundwasserwärmepumpe mit einem Förder- und einem Schluckbrunnen mit den jeweils relevanten Prozessen, die das technische Potenzial begrenzen	37
Abbildung 19: Karte der Gebiete, die für eine Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet sind (LfU Bayern und Erweiterungen aus dHK100).....	40
Abbildung 20: Karte der verfügbaren Grundwassergleichen; unten rechts: Überblick über Gebiete, in denen Grundwassergleichen verfügbar sind.....	41
Abbildung 21: Karte der Gebiete, für die genaue Daten zur Quartärbasis vorliegen; von Nord nach Süd: Main-Regnitz, Donau, Donauquartär und Isar, Vils, Inn, Münchener Schotterebene und Illertal.	42
Abbildung 22: Karte mit Gebieten, die für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet sind; eingezeichnet sind auch alle Brunnen aus dem Bodeninformationssystem (BIS), die für die Abschätzung von Grundwassermächtigkeit und Flurabstand in Gebieten verwendet wurden, in denen keine Grundwassergleichenpläne vorlagen.	43
Abbildung 23: Karte der erhobenen grundwassererfüllten Mächtigkeit in den relevanten Grundwasserleitern in Bayern.....	44
Abbildung 24: Karte der Flurabstände	45
Abbildung 25: Karte der Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit für die relevanten.....	46
Abbildung 26: Flussdiagramm zur Datenaufbereitung. Die Felder beziehen sich auf die oben beschriebenen Datensätze. Es bedeuten kf: hydraulische Durchlässigkeit, gwgl: Grundwassergleichen, qbase: Quartärbasis, BIS: Daten aus dem Bodeninformationssystem, dgm: Digitales Geländemodell, s: Flurabstand, M: grundwassererfüllte Mächtigkeit, i: hydraulischer Gradient, dir: Grundwasserrichtung, Studien: Daten aus den Studienarbeiten der TUM, Potenzial: geothermisches Potenzial für Grundwasserwärmepumpen	47
Abbildung 27: Karte der verschiedenen Qualitätsebenen der Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Qualitäten in den Eingangsdaten	48

Abbildung 28: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Flurstücken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden und zur Flurstücksgrenze.	49
Abbildung 29: Entzugsleistung [kW] je Flurstück im Raum Nürnberg. Außerhalb der dargestellten Eignungsgebiete (in den weißen Flächen) lässt sich kein quantitatives Potenzial angeben. Lokal besteht in Einzelfällen aber dennoch die Möglichkeit, die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen zu prüfen.	52
Abbildung 30: Bayernweite Entzugsleistung [kW] für Grundwasserwärmepumpen.	54
Abbildung 31: Beispielhafte Anwendung der Rasterdarstellung	55
Abbildung 32: Bayernweite Entzugsenergie [MWh/a] für Grundwasserwärmepumpen. Oben: mit einem Brunnenabstand von 10 m, Unten: mit einem Brunnenabstand von 100 m.	56
Abbildung 33: Der typische Aufbau einer Erdwärmesonde (Quelle: Interreg Alpine Space Programme, Projekt GRETA).	58
Abbildung 34: Eignungsgebiete für Erdwärmesonden in Bayern. Klassifizierte Gebiete in denen Bohrungen nicht erlaubt sind (orange) ergeben sich aus den Angaben für die erlaubte Bohrtiefen von 0 m.	60
Abbildung 35: Wärmeleitfähigkeit des Bodens über Bayern in einer Tiefe von 100 m	61
Abbildung 36: Bohrtiefenbegrenzung in Bayern (LfU 2023), ergänzt durch die TUM in Absprache mit dem LfU.	62
Abbildung 37: Bohrtiefenbegrenzung (links) und Bohrtiefenbegrenzung je Flurstück (rechts) für einen Ausschnitt im Landkreis Ebersberg im Vergleich. Die maximale erlaubte Bohrtiefenbegrenzung in einem Flurstück bestimmt die dort angenommene Bohrtiefenbegrenzung.	63
Abbildung 38: Wärmeleitfähigkeit bis zu 20, 40, 60, 80, 100 m sowie mittlere Wärmeleitfähigkeit je Flurstück entsprechend der vorgegebenen minimalen Bohrtiefenbegrenzung für den Ausschnitt im Landkreis Ebersberg.	64
Abbildung 39: Flussdiagramm zur Datenaufbereitung für die Berechnung des Potenzials von Erdwärmesonden	65
Abbildung 40: Flurstückbezogene Entzugsleistung eines beispielhaften Ausschnitts in Bayern	66
Abbildung 41: Mittlere Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K), gemittelt über die vorliegende Bohrtiefenbegrenzung.	66
Abbildung 42: Entzugsleistung pro Sonde [kW] für ganz Bayern	67
Abbildung 43: Entzugsenergie [kWh/a] pro Sonde für ganz Bayern	68
Abbildung 44: Der typische Aufbau eines Erdwärmekollektors.	70
Abbildung 45: Schema der Potenzialberechnung der system- und bodenspezifischen Entzugsleistung.	72
Abbildung 46: Einteilung der Basisdaten aus der Bodenschätzung entsprechend den Klimazonen in Bayern nach DIN 4710, welche den klimatischen Einfluss auf die jeweilige Entzugsleistung begründet.	74
Abbildung 47: Korrelation zwischen den für die jeweiligen Wetterstationen berechneten Heizgradtage und deren Höhe für Deutschland nach Schwarz et al. (2022).	75
Abbildung 48: Korrelation zwischen den berechneten Heizgradtagen und den Entzugsleistungen der VDI 4640 für das System des Horizontalen Kollektors und der Bodenartenhauptgruppe Lehm.	76
Abbildung 49: Korrelation zwischen der Höhe der einzelnen für die Klimazonen der DIN 4710 repräsentativen Wetterstationen und den empfohlenen Volllaststunden aus der VDI 4640.	78
Abbildung 50: Berechnete Entzugsleistung pro m ² für horizontale Kollektoren in Bayern	79
Abbildung 51: Berechnete Entzugsenergie pro m ² für horizontale Kollektoren in Bayern.	80
Abbildung 52: Deckungsanteil des Heizwärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie je Gemeinde, begrenzt auf den Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweist (vgl. Szenario 1).	88
Abbildung 53: Deckungsanteil des Heizwärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie bei maximaler Sanierung je Gemeinde, begrenzt auf den Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweist (vgl. Szenario 2).	89

Abbildung 54: Darstellung prozentualer Anteile von relevanten Flächen mit Bohrtiefenbegrenzung in Bayern.....	94
Abbildung 55: Vor- und Nachteile bei der Interpretation der verschiedenen Potenzialevaluationen.	98
Abbildung 56: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Baublöcken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden.	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Attribute des bayerischen Gebäudemodells	22
Tabelle 2: Bruttovolumen differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter	23
Tabelle 3: Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter	23
Tabelle 4: Spezifischer Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a), Quelle: Loga, 2014.....	26
Tabelle 5: Spezifischer Warmwasserbedarf in kWh/(m ² a), Quelle: Loga, 2014.....	26
Tabelle 6: Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a) für öffentliche Gebäude und GHD; Quelle: Hörner, 2022	27
Tabelle 7: Warmwasserbedarf in kWh/(m ² a) für öffentliche Gebäude und GHD; Quelle: LfU, 2015...	27
Tabelle 8: Spezifischer Jahresheizwärmebedarf in kWh/(m ² a) für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Quelle: Loga, 2014.....	27
Tabelle 9: Spezifischer Warmwasserbedarf in kWh/(m ² a), Quelle: Loga, 2014.....	28
Tabelle 10: Maßnahmenpaket für die Sanierung eines Einfamilienhauses der Baualtersklasse 1958- 1968 (Loga, 2014, vgl. S. 157).....	28
Tabelle 11: „waermenachfrage“.....	29
Tabelle 12: „variante“.....	29
Tabelle 13: Wärmebedarf bayernweiter Gebäudebestand	29
Tabelle 14: Endenergiebedarf in TWh differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter	30
Tabelle 15: Bayernweite Wertebereiche aller Parameter	46
Tabelle 16: Benötigte Daten für die Berechnung des Potenzials für EWS	59
Tabelle 17: Liste der in der VDI 4640 berücksichtigten und in der DIN 4710 aufgestellten Klimazonen für Deutschland (Auszug aus der Tabelle).....	74
Tabelle 18: Berechnungsmodell zur Bestimmung der Entzugsleistung verschiedener sehr oberflächennaher Geothermiesysteme auf Basis von Heizgradtagen.....	77
Tabelle 19: Energiebezugsfläche und Wärmenachfrage des Gebäudebestands im IST-Zustand bei einem Grenzwert von 100 kWh/m ² a (vgl. Szenario 1)	83
Tabelle 20:	83
Tabelle 21: Bayernweites umsetzbares Grundwasserwärmepotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 1)	84
Tabelle 22: Bayernweites umsetzbares Grundwasserpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 2)	84
Tabelle 23: Bayernweites umsetzbares Erdwärmesondenpotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 1)	85
Tabelle 24: Bayernweites umsetzbares Erdwärmesondenpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 2)	85
Tabelle 25: Bayernweites umsetzbares Erdwärmekollektorenpotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 1)	85
Tabelle 26: Bayernweites umsetzbares Erdwärmekollektorpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 2).....	86
Tabelle 27: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf die Energiebezugsfläche des bayerischen Gebäudebestands, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 1).....	86
Tabelle 28: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf den Heizwärmebedarf des bayerischen Gebäudebestands, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 1)	86
Tabelle 29: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf die Energiebezugsfläche bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 2)	86

Tabelle 30: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf den Heizwärmebedarf bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweisen (vgl. Szenario 2)	87
Tabelle 31: Gesamtes bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial, begrenzt auf den bayerischen Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweist (vgl. Szenario 1).....	87
Tabelle 32: Gesamtes bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf den bayerischen Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m ² a aufweist (vgl. Szenario 1)	88
Tabelle 33: Versorgbarer Anteil der Energiebezugsfläche sowie des Wärmebedarfs des Gebäudebestandes durch geothermische Technologien vor und nach der Sanierung	90

1 Zielstellung

Zum 1. Januar 2023 ist die erste Novelle des Bayerischen Klimaschutzgesetzes (BayKlimaG) in Kraft getreten. Der Freistaat soll demnach 2040 klimaneutral sein, bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um 65 % pro Kopf im Vergleich zu 1990 gesenkt werden. Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien liegen im überragenden öffentlichen Interesse und dienen der öffentlichen Sicherheit. Den Landkreisen und Bezirken wird die Befugnis erteilt, über den eigenen und örtlichen Bedarf hinaus Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien zu errichten und zu betreiben. Die bayerischen Behörden unterstützen die Verwirklichung der Minderungsziele im Rahmen ihrer hoheitlichen Tätigkeit. Bei allem staatlichen Handeln ist der Klimaschutz zu berücksichtigen, soweit im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben Entscheidungsspielräume bestehen. Die Behörden sind damit aufgerufen, einen aktiven Beitrag zur Erreichung der bayerischen Klimaziele beizusteuern.

Der Energie-Atlas Bayern stellt Kommunen sowie Bürger*innen in Bayern einen ersten Überblick über die gebietsbezogenen umsetzbaren Potenziale der Erneuerbaren Energien zur Verfügung. Ein weiteres Werkzeug bilden Energienutzungspläne bzw. die kommunale Wärmeplanung, in denen diese Potenziale auch gebäudescharf bestimmt werden. Zur konkreten Umsetzung und der Definition von wirksamen strategischen Maßnahmen in der Wärmewende bedarf es allerdings als Informationsgrundlage eine möglichst genaue und quantitative Abschätzung des Potenzials. Diese Quantifizierung ist für viele Technologien der Erneuerbaren Energien Standard (Solarthermie, Biogas, Photovoltaik, etc.). Bei einer Quantifizierung und flächendifferenzierten Potenzialanalyse der oberflächennahen Geothermie kann auch die mit dieser Technologie erreichbare Wärmeabdeckung lokal identifiziert und in Energienutzungsplänen der Kommunen berücksichtigt werden.

Das Potenzial oberflächennaher Geothermie soll für die drei gängigsten Systeme, Grundwasserwärmepumpe, Erdwärmesonde, Erdwärmekollektor, nach Absprache mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) auf jeweils zwei Arten dargestellt werden. Zum einen wird das Potenzial bayernweit im Energie-Atlas Bayern anhand eines Rasterdatensatzes ausgewiesen, zum anderen wird es für das Mischpult flurstückscharf berechnet und gemeindeweise aggregiert. Die Potenziale sollen dabei quantitativ als thermische Leistung (MW) bzw. als Wärmemenge (MWh/a) bezogen auf eine definierte Fläche (auf eine definierte räumliche Auflösung im Rasterdatensatz und auf die Flurstückgröße im Mischpult) dargestellt werden, um so mit anderen Potenzialen der Erneuerbaren Energien vergleichbar zu sein.

2 Überblick zur Vorgehensweise der Projektbearbeitung

Für den gesamtheitlichen Überblick wird hier der generelle Projektablauf schematisch skizziert. Demgemäß erfolgt der Aufbau einer bayernweiten Wärmebedarfsdarstellung, welche als Basis die Erstellung eines Gebäudemodells benötigt. Die Wärmebedarfsdarstellung wiederum bildet eine Voraussetzung zur Ausweisung von Potenzialen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie, da im „Mischpultansatz“ sich das Potenzial der oberflächennahen Geothermie auf den existierenden Wärmebedarf bezieht. Für alle diese Analysen ist eine vorgeschaltete Erhebung der spezifischen Datenbasis erforderlich (z. B. hydrogeologische Grundlagen, Wärmeleitfähigkeiten, Ausschlussgebiete, etc.), welche die in Bayern vorliegenden Grundlagendaten zusammentragen und ihre Eignung für die Analysen prüfen sollen. Für die Analyse des oberflächennahen geothermischen Potenzials wird diese Datenbasis im Wesentlichen durch die Geofachdaten des LfU gebildet, welche nach Bedarf und Möglichkeit ergänzt werden. Bei der Durchführung der Potenzialanalyse wird auf bestehende Methoden zur Potenzialermittlung zurückgegriffen, die jedoch an die Anforderungen für den Bayerischen Energieatlas und die zugrundeliegende Datenbasis angepasst werden müssen. Dafür ist eine Konzeptentwicklung notwendig. Bei der Potenzialanalyse werden die drei gängigen Technologien der oberflächennahen Geothermie (Grundwasserwärmepumpen, Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren) betrachtet. Nach der Durchführung der bayernweiten Analysen zur Wärmebedarfserhebung und zum Potenzial soll jeweils eine Evaluierung und eine Datenaufbereitung im Sinne einer ESRI-Datenbank und Flächendarstellungen erfolgen. Der schematische Projektablauf in den fünf Schritten ist untenstehend abgebildet:

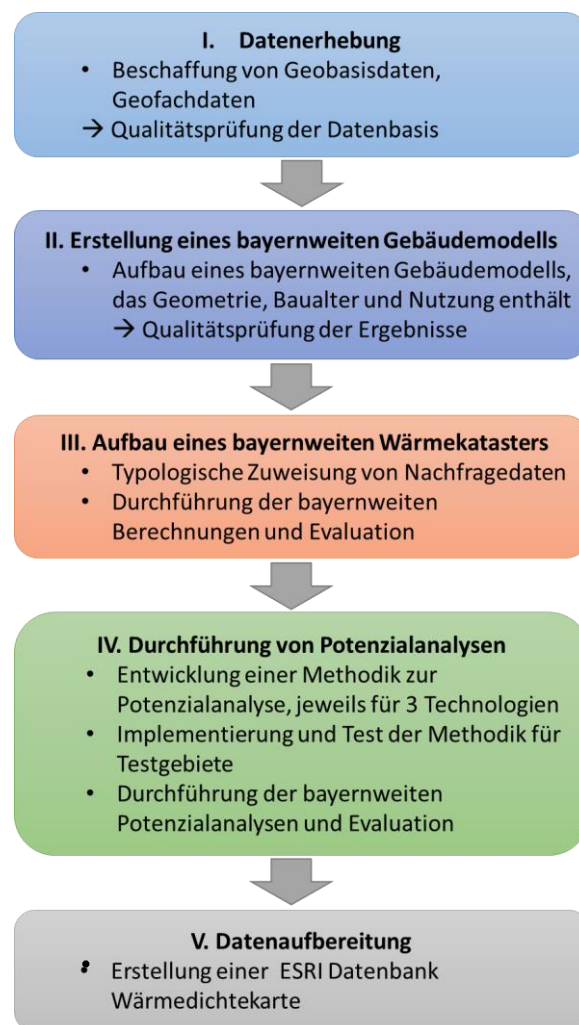


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Erhebung des Potenzials der oberflächennahen Geothermie in Bayern

3 Eingangsdaten

Die Qualität des bayernweiten Gebäudemodells sowie der Potenzialanalysen ist im Wesentlichen von der Qualität der verfügbaren Datengrundlagen abhängig. Zur Erstellung des Modells wurden Daten seitens des Auftraggebers sowie seitens des Projektpartners Technische Universität München (TUM) zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber frei verfügbare (Geo-) Daten mit einbezogen.

3.1 Geobasisdaten

3.1.1 ALKIS

Quelle	Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Stand	21.12.2021
Dateiformat	NAS
Bezugssystem	EPSG:25832
Web-Link	https://www.ldbv.bayern.de/produkte/kataster/alkis.html
Beschreibung	Dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem, kurz ALKIS, liegt ein bundeseinheitliches Datenmodell zu Grunde. Die ALKIS-Daten werden im Rahmen der Fortschreibung des Liegenschaftskatasters laufend aktualisiert. Im Rahmen gegenständlichen Projektes wurden die Flurkarte mit Gebäudeumrissen, die Tatsächliche Nutzung sowie die Hauskoordinaten aus ALKIS verwendet.

3.1.2 Digitale Flurkarte (DFK)

Quelle	Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Stand	2012
Dateiformat	ESRI Shape
Bezugssystem	EPSG:25832
Web-Link	https://geodatenonline.bayern.de/geodatenonline/seiten/dfkalkis_info
Beschreibung	Die Digitale Flurkarte (DFK) wurde von den Ämtern für Digitalisierung, Breitband und Vermessung geführt und enthält flächendeckend für Bayern grafische Informationen zu Flurstücken und Gebäuden. Im Rahmen des Projektes wurde ein historischer Datensatz zur Bestimmung von Baualtern verwendet, die Digitale Flurkarte wurde durch ALKIS abgelöst.

3.1.3 Gebäudemodell LoD2

Quelle	Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Stand	Variierend je Gemeinde
Dateiformat	ESRI 3D-Shape
Bezugssystem	EPSG:25832
Web-Link	https://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html
Beschreibung	Das 3D-Gebäudemodell des Level of Detail 2 (LoD2) umfasst ALKIS-konforme Standarddachformen und beschreibende Attribute. Als Grundlage für die Modellierung dienen die Gebäudegrundrisse aus ALKIS, Dächer werden aus Airborne-Laserscanning-Daten, der ALKIS 3D-Gebäude-Einmessung sowie dem luftbildbasierten Digitalen Oberflächenmodell generiert. Jedem Gebäude werden dabei eine oder mehrere Dachformen aus einem Katalog von Standarddachformen zugewiesen. Das LoD2-Modell liegt flächendeckend für Bayern vor und hat eine Lagegenauigkeit entsprechend der Genauigkeit der zugrundeliegenden Gebäudegrundrisse aus ALKIS.

3.2 Geofachdaten

3.2.1 Zensus 2011, Auswertung „Gebäude im 100m-Gitter“

Quelle	Bayerisches Landesamt für Statistik
Stand	2011
Dateiformat	csv
Web-Link	https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html
Beschreibung	Im Rahmen der Gebäude- und Wohnungszählung des Zensus 2011 wurden alle Gebäude mit Wohnraum, bewohnte Unterkünfte und Wohnungen erhoben. Die Ergebnisse des Zensus 2011 werden mit einem datenverändernden Verfahren geheim gehalten. Dieses Verfahren kann in Einzelfällen zu größeren Abweichungen zwischen dem originalen Wert und dem geheim gehaltenen ausgezählten Wert führen. Der genutzte Datensatz umfasst unter anderem Angaben zur Art und dem Baualter von Wohngebäuden. Die Zensusergebnisse wurden in INSPIRE-konforme Gitterzellen der Kantenlänge 100 m zusammengefasst. Durch die Nutzung der Gitterzellen können Auswertungen und räumliche Vergleiche unabhängig von administrativen Grenzen umgesetzt werden.

3.2.2 Denkmalschutz

Quelle	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Stand	19.11.2021
Dateiformat	ESRI Shape
Bezugssystem	EPSG:25832
Web-Link	https://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/anwendungen/details?9&resId=d0e7d4ea-62d8-46a0-a54a-09654530beed
Beschreibung	Die Daten des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege umfassen sowohl Einzeldenkmäler als auch denkmalgeschützte Ensembles in Form eines Geodatensatzes mit Metadaten.

3.3 Geologische Daten

3.3.1 Ausschlussgebiete

Quelle	LfU
Stand	Sep.2023
Dateiformat	ESRI Shape
Bezugssystem	EPSG:25832
Beschreibung	Die Daten des LfU zu den Ausschlussgebieten umfassen Gebiete, in denen Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden bzw. Erdwärmekollektoren nicht installiert werden dürfen. Hierbei handelt es sich v.a. um Natur-, Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete.

3.3.2 Bodeninformationssystem

Quelle	LfU
Stand	Dez. 2022
Dateiformat	Mircrosoft Access Database
Bezugssystem	EPSG:25832

Beschreibung	In Bereichen, in denen keine Daten zur Grundwassermächtigkeit zur Verfügung standen, wurde diese über Brunnendaten aus dem Bodeninformationssystem abgeschätzt.
--------------	---

3.3.3 Bodenschätzungskarte

Quelle	LfU
Stand	Bereitgestellt Nov. 2019
Dateiformat	ESRI-Shape
Bezugssystem	EPSG: 25832
Beschreibung	Die digitale Bodenschätzungskarte von Bayern wurde der Arbeitsgruppe Oberflächennahe Geothermie der FAU im Rahmen des Projektes „Erarbeitung eines Handlungsleitfadens zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden“ für das Amt für Ländliche Entwicklung (ALE) als Teil des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) bereitgestellt. Sie liefert digitale Flächendaten zu den benötigten Bodeninformationen. Die Karte liegt in der Auflösung 1:5.000 vor.

3.3.4 Bohrtiefenbegrenzung

Quelle	LfU
Stand	bereitgestellt vom LfU zu Projektbeginn
Dateiformat	Geodatabase
Bezugssystem	EPSG:25832
Beschreibung	Die Bohrtiefenbegrenzung wird zu Berechnung des Potentials von Erdwärmesonden verwendet.

3.3.5 Detailstudien TUM

Quelle	TUM
Stand	Feb. 2023
Dateiformat	ESRI-Shape, tiff
Beschreibung	Für einige Gebiete hat die TUM im Rahmen von regionalen Studien bereits Daten erhoben und Potentiale berechnet.

3.3.6 Digitales Geländemodell

Quelle	LfU
Stand	bereitgestellt vom LfU Jan. 2023
Dateiformat	tiff
Web-Link	https://ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/gelaende.html
Beschreibung	Digitale Geländemodelle werden als Grundlage für verschiedene Berechnungen verwendet und wurden vom LfU in den Auflösungen 5 m x 5 m (DGM 5) sowie 25 m x 25 m (DGM 25) zur Verfügung gestellt.

3.3.7 Digitale Hydrogeologische Karten dHK100 und dHK500

Quelle	LfU, Umweltatlas
Stand	bereitgestellt vom LfU Jul. 2022
Dateiformat	ESRI-Shape
Beschreibung	siehe Abschnitt 6.3.2

3.3.8 Eignungsgebiete

Quelle	LfU
Stand	bereitgestellt vom LfU zu Projektbeginn

Dateiformat	ESRI-Shape
Beschreibung	Für die Bestimmung des geothermischen Potentials wurde vom LfU eine bayernweite Karte mit Gebieten, die grundsätzlich für die Installation von Grundwasserwärmepumpen geeignet sind, zur Verfügung gestellt. Diese Karte wurde mit Hilfe der dHK100 um Gebiete mit quartärem Schotter erweitert.

3.3.9 HUEK250 – kf-Werte

Quelle	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stand	Download Mai. 2022
Dateiformat	ESRI-Shape
Web-Link	https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Huek200/huek200_projektbeschr.html
Beschreibung	Aus der Hydrogeologischen Übersichtskarte wurde zur Berechnung des geothermischen Potentials von Grundwasserwärmepumpen die hydraulische Durchlässigkeit (kf-Werte) verwendet. Die Karte liegt in der Auflösung 1:250.000 vor.

3.3.10 Klimazonen

Quelle	DIN 4710
Stand	2003
Web-Link	https://www.beuth.de/de/norm/din-4710/49623776
Beschreibung	Für die Einordnung des jeweiligen Standorts und der standortabhängigen Ableitung der Entzugsleistung von Erdwärmekollektoren wurden die Klimazonen entsprechend der DIN 4710 dem Datensatz hinzugefügt.

3.3.11 Quartärbasis

Quelle	LfU
Stand	bereitgestellt vom LfU Sep. 2022
Dateiformat	ESRI-Shape
Bezugssystem	EPSG:25832
Beschreibung	Zur Bestimmung der Grundwassermächtigkeit bei der Berechnung des Potentials von Grundwasserwärmepumpen wird die Quartärbasis als untere Grenze verwendet.

3.3.12 Wärmeleitfähigkeit

Quelle	LfU, Umweltatlas: Rohstoffe und Geothermie > Oberflächennahe Geothermie > Erdwärmesonden
Stand	bereitgestellt vom LfU zu Projektbeginn
Dateiformat	gpkg
Web-Link	https://www.umweltatlas.bayern.de
Beschreibung	Die am Standort voraussichtlich zu erwartenden, über die Tiefe gemittelten Wärmeleitfähigkeitswerte können im UmweltAtlas Bayern abgerufen werden. Sie liegen für Tiefen von bis zu 20 m/40 m/60 m/80 m und 100 m vor.

4 Aufbau des bayernweiten Gebäudemodells

Grundlage für die Ermittlung der Wärmenachfrage sowie für die darauf aufbauende Analyse der Potenziale zur Wärmeversorgung des Gebäudebestands über die oberflächennahe Geothermie bildet ein bayernweites Gebäudemodell. Es gibt die hierfür wesentlichen Merkmale des bayerischen Gebäudebestands wieder, von der Gebäudegeometrie über die Nutzung bis hin zu abgeleiteten baustrukturellen Eigenschaften.

4.1 Grundlagen

Einen wesentlichen Aspekt bei der Erstellung von Gebäudemodellen stellt der Gebäudebegriff beziehungsweise die Abgrenzung einzelner Gebäude dar. Das gegenständliche Modell basiert auf den ALKIS-Gebäudeumrissen mit Stand 01.12.2021, dieser Datensatz umfasst 9.046.857 Gebäudeumrisse in Bayern. Jedem Gebäudeumriss ist in ALKIS eine eindeutige Objekt-ID (Identifikator) zugewiesen, welcher im Folgenden in allen Modellen (Wärmebedarfsdarstellung, Potenzialmodell oberflächennahe Geothermie) weitergeführt wird. Da die Objekt-ID aus ALKIS als selbstbezogene Eigenschaft des Gebäudes auch nach Abriss des Gebäudes nicht erneut vergeben wird, stellt diese auch eine wesentliche Grundlage für eine künftige Aktualisierung bzw. Versionierung der erstellten Gebäudedatenbank dar.

4.2 Gebäudegeometrie

Die Ermittlung der Gebäudegeometrie basiert weitestgehend auf den Daten des digitalen Gebäudemodells des „Level of Detail 2 (LoD2)“ der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Dieses differenziert Gebäudebauteile semantisch nach Dachflächen, Wandflächen und dem unteren Gebäudeabschluss, der in diesem Modell auf Höhe der Erdoberfläche zu liegen kommt. Für Bayern umfasst das verfügbare LoD2-Modell 9.366.135 Gebäude.

Die Zuordnung zu den ALKIS-Gebäuden respektive der Gebäudedatenbank erfolgt über die eindeutige Objekt-ID, welche in beiden Datensätzen zu jedem Gebäude enthalten ist. Durch den unterschiedlichen Stand beider Datensätze kann nicht jedem Gebäude in der Gebäudedatenbank eine 3D-Geometrie aus dem LoD2-Modell zugewiesen werden, wie nachstehende Tabelle verdeutlicht:

453.190	ALKIS-Gebäude, für die kein LoD2-Objekt vorliegt
8.593.667	ALKIS-Gebäude, für die ein LoD2-Objekt vorliegt
772.468	LoD2-Gebäude, für die kein ALKIS-Objekt vorliegt

Für 453.190 ALKIS-Gebäude wird die fehlende Gebäudegeometrie über ein eigens erstelltes LoD1-Modell ergänzt. Für die Ableitung des LoD1-Gebäudemodells dient das 2D-Polygon des Gebäudeumrisses aus ALKIS als Basis. Zunächst wird die unbekannte Höhe des Gebäudes, letztlich der vertikale Abstand zwischen Boden- und Dachfläche und damit die Höhe der Außenwandflächen sowie die absolute Höhenlage der Bodenfläche (ü. NN.) zur Erstellung des LoD1-Modells ermittelt.

Die Höhenlage der Bodenfläche ist aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) der Bayerischen Vermessungsverwaltung abgeleitet, indem eine mittlere Geländehöhe aus dem Modell innerhalb des jeweiligen Gebäudeumrisses errechnet wird.

Die Höhe der Gebäude wird in der Folge über die Anzahl der oberirdischen Geschosse approximiert, welche in ALKIS unter dem Attribut „anzahloberirdischengeschosse“ geführt ist. Eine mittlere Geschosshöhe wird den Gebäuden anhand ihrer Gebäudenutzung zugewiesen, über die Multiplikation von Geschosshöhe und Geschossanzahl ergibt sich so eine approximierte Gebäudehöhe.

Die errechnete Höhenlage (Geländehöhe) der Bodenfläche des Gebäudes ist damit in 3D (Z-Translation des 2D-Polygons aus ALKIS) in das LoD1-Modell integriert. Analog ist die 3D-Dachfläche im LoD1-Modell abgebildet, deren Höhenlage sich aus der Summe von Höhenlage der Bodenfläche und der abgeleiteten Gebäudehöhe ergibt. Die Wandflächen des LoD1-Modells werden auf Grundlage der 3D-Liniensegmente von Boden- und Dachflächenpolygonen durch die Verbindung übereinanderliegender 3D-Liniensegmente zu 3D-Polygonen erstellt.

Auf diese Weise wird jedem ALKIS-Umriss ein 3D-Modell zugewiesen, welches das umbaute, oberirdische (Brutto-)Volumen und die einzelnen Bauteilflächen mit deren Ausrichtung und Neigung wiedergibt. Das erstellte bayernweite 3D-Gebäudemodell ist im Datenmodell des LoD2-Gebäudemodells der Bayerischen Vermessungsverwaltung (BVV) abgelegt, das in der „Kundeninformation LoD2 Gebäudemodelle“ (BVV, 2018) dokumentiert ist.

Über dieses Vorgehen kann für jedes der 453.190 ALKIS-Gebäude in Bayern ein 3D-Gebäudemodell erstellt werden. Dabei sind die aus der Kombination von LoD2 und LoD1 Modell resultierenden Qualitätsunterschiede innerhalb des Datensatzes zu beachten. Auch innerhalb des LoD1-Modells sind Qualitätsunterschiede zu verzeichnen, die unter anderem mit der Gebäudenutzung korrelieren, da diese Grundlage für die Ableitung der angenommenen Geschosshöhen bildet. So können insbesondere im Nicht-Wohngebäudebestand große Abweichungen zur realen Gebäudehöhen auftreten, da hier die Geschosshöhen innerhalb der Nutzungskategorien mitunter stark variieren. Jene Gebäude, die innerhalb des LoD2-Modells abgebildet sind, jedoch kein Pendant im aktuellen ALKIS-Datensatz besitzen (772.468), wurden nicht berücksichtigt. Die Differenz liegt unter anderem im älteren Stand des verwendeten LoD2-Modells begründet, das bereits abgerissene Gebäude enthält.

Für Bayern ergeben sich aus dem erstellten Modell folgende Kennwerte für den Gebäudebestand:

8.336	Mio. m ³ oberirdisches umbautes Volumen
1.090	Mio. m ² Bodenfläche
2.214	Mio. m ² Außenwandfläche
1.247	Mio. m ² Dachfläche

4.3 Gebäudenutzung

Die Ermittlung und Zuweisung der Gebäudenutzung erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren, welches die im Rahmen des Projektes verfügbaren Datengrundlagen hinsichtlich Informationsgehalts und Qualität bestmöglich in Wert setzt. Ziel ist es dabei, jedem ALKIS-Gebäudeumriss eine Gebäudenutzung zuzuordnen, die sowohl der Nutzungskategorisierung des Mischpults "Energemix Bayern vor Ort" entspricht als auch die Potenzialabschätzung für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie bestmöglich unterstützt. Nachfolgende Darstellung gibt eine grundsätzliche Übersicht zur angewandten Vorgehensweise. Die einzelnen Prozesse sind im Nachgang detailliert beschrieben.

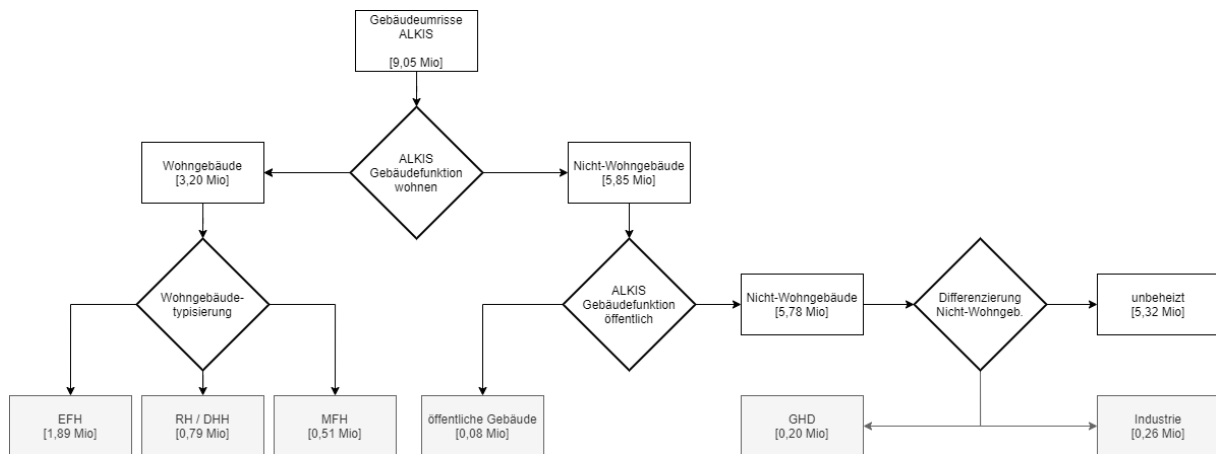


Abbildung 2: Flussdiagramm zur Ermittlung und Zuweisung der Gebäudenutzung

ALKIS Gebäudefunktion wohnen

Ausgehend von bayernweit 9.046.857 Gebäudeumrissen in ALKIS werden diese zunächst in Wohn- und Nicht-Wohngebäude differenziert, was über das ALKIS-Attribut Gebäudefunktion erfolgt. Die „Gebäudefunktion“ ist die zum Zeitpunkt der Erhebung vorherrschend funktionale Bedeutung des Gebäudes (Dominanzprinzip)“ (AdV, 2018). ALKIS definiert hierbei Wohngebäude als „ein Gebäude, das zum Wohnen genutzt wird“ (AdV, 2018). Im Ergebnis sind darüber 3.198.116 Gebäude als Wohngebäude ausgewiesen und die restlichen 5.848.729 Gebäude dem Nicht-Wohngebäudebestand zugeordnet.

Wohngebäudetyp

Die identifizierten Wohngebäude wurden in einem nächsten Schritt weiter in Wohngebäudetypen differenziert. Über das umbaute Volumen und die Geschosszahl wurde zunächst in Ein- und Mehrfamilienhäuser differenziert. Die bayernweit 2.677.692 Einfamilienhäuser werden über ihre Anbausituation weitergehend differenziert in

EFH	Freistehende Einfamilienhäuser	1.892.598
RH/DH	Reihenhäuser / Doppelhäuser	785.094
MFH	Mehrfamilienhäuser	514.254

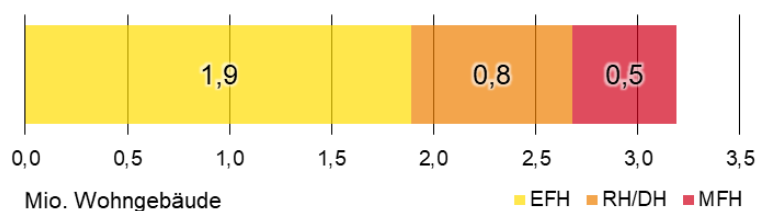


Abbildung 3: Differenzierung der Wohngebäude in Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser/Doppelhäuser (RH/DH) und Mehrfamilienhäuser (MFH)

ALKIS Gebäudefunktion öffentlich

Die identifizierten Nicht-Wohngebäude (5.848.729 bayernweit) umfassen unter anderem die Klasse öffentlicher Gebäude, die auch im Mischpult "Energimix Bayern vor Ort" gesondert ausgewiesen sind. Über das ALKIS-Gebäudeattribut der Gebäudefunktion werden diese differenziert, in Bayern können so 77.430 Gebäude der Nutzungsklasse öffentliche Gebäude zugewiesen werden.

Differenzierung Nicht-Wohngebäude

Die verbleibenden 5.777.469 Gebäude lassen sich weiter gemäß der Einteilung des Mischpults "Energimix Bayern vor Ort" in die Klassen GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistung) sowie Industrie unterteilen. Die Differenzierung erfolgt zum einen auf Basis geometrischer Merkmale (z. B. Traufhöhe, Grundfläche oder Perimeter des Gebäudeumrisses), zur Identifikation von Garagen, landwirtschaftlichen und industriellen Hallenbauten etc., sowie unter Verwendung der ATKIS Flächenattribute der Objektgruppe Siedlung. Diese „beinhaltet die bebauten und nicht bebauten Flächen, die durch die Ansiedlung von Menschen geprägt werden oder zur Ansiedlung beitragen“ (AdV, 2018). Diese Objektgruppe umfasst folgende Objektarten: Wohnbaufläche, Industrie- und Gewerbefläche, Halde, Bergbaubetrieb, Tagebau, Fläche gemischter Nutzung, Fläche besonderer funktionaler Prägung, Freizeit- und Erholungsfläche, Friedhof und Siedlungsfläche. Nichtwohngebäude, die auf Flächen der ATKIS-Objektart „Industrie- und Gewerbefläche“ liegen, werden der Kategorie „Industrie“ zugewiesen. Nicht-Wohngebäude auf anderen ATKIS-Flächen wurden basierend auf Open-Street-Map (OSM) Daten zur Nutzung der Kategorie „GHD“ zugewiesen. Verbleibende Nicht-Wohngebäude werden der Kategorie „nichtkommunale Nicht-Wohngebäude unbeheizt“ zugeordnet, wobei hier die zuvor durchgeführte Identifikation von als unbeheizt identifizierten Garagen, Hallenbauten etc. eingeht.

Resultierend werden der Klasse GHD 199.187 und der Klasse Industrie 257.785 Gebäude zugewiesen. Die bayernweit verbleibenden 5.320.497 als unbeheizt identifizierten Gebäude sind entsprechend der Klasse „unbeheizt“ zugeordnet. Insgesamt ergibt sich daraus für den bayerischen Gebäudebestand nachfolgend dargestellte Unterteilung nach Nutzungsklassen, bezogen auf die Anzahl der ALKIS-Gebäudeumrisse:

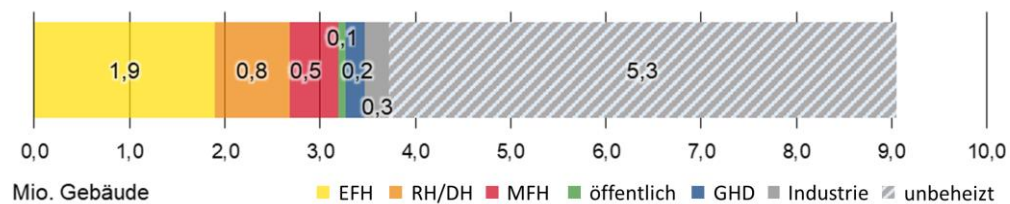


Abbildung 4: Verteilung Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudefunktion

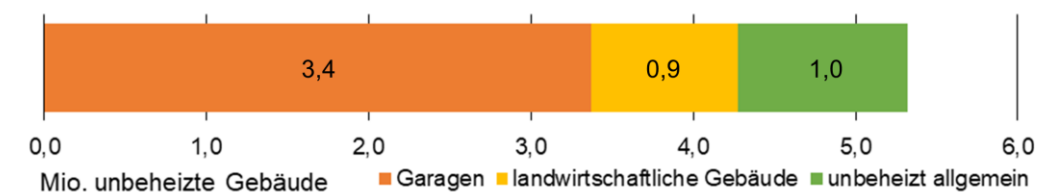


Abbildung 5: Verteilung Gebäudeanzahl der unbeheizten Gebäude differenziert nach Gebäudefunktion

4.4 Baualter

Die Zuweisung des Baualters wird wiederum für alle ALKIS-Gebäudeumrisse vorgenommen. Da im Rahmen der Projektbearbeitung keine Datenquelle zur Verfügung stand, in der für jedes Bestandsgebäude Bayerns Informationen zum Baualter enthalten sind, wird dieses über eine Kombination der verfügbaren Informationsquellen approximiert.

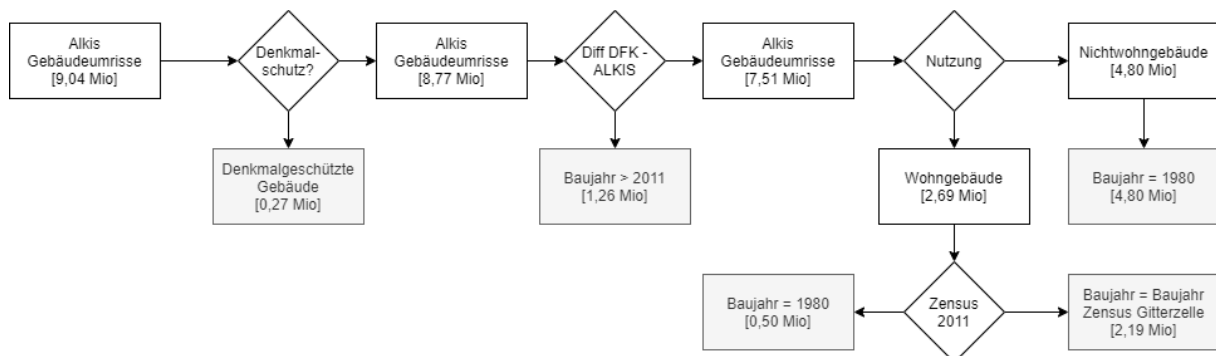


Abbildung 6: Flussdiagramm zur Zuweisung des Baualters für Gebäude

Denkmalschutz

Zunächst sind 274.673 denkmalgeschützte Gebäude pauschal einer eigenen Klasse zugeordnet, die über ein historisches Baualter repräsentiert ist. Dies liegt zum einen darin begründet, dass für denkmalgeschützte Gebäude hinsichtlich der Energieeffizienz geringere gesetzliche Mindestanforderungen gelten und diese andererseits durch energetische Sanierung nur in wenigen Ausnahmefällen aktuelle Effizienzstandards erreichen.

Differenz ALKIS DFK

Für einen Teil des nicht denkmalgeschützten Gebäudebestands (1.255.397) kann über die Historie aus Katasterdaten eine präzisere Baualtersgruppe ermittelt werden. Dies wird über die Historie der Digitalen Flurkarte (DFK) und von ALKIS-Datenabzügen verschiedener Jahre realisiert.

Die Daten der Digitalen Flurkarte (DFK) liegen mit Stand 2012 vor und werden den aktuellen Daten des ALKIS Gebäudekatasters gegenübergestellt. Die Differenz der Datensätze weist alle Gebäude aus, die nach 2011 errichtet wurden. Aufgrund des älteren Datenmodells der DFK können die Gebäude nicht direkt über eine einheitliche Objekt-ID zugeordnet werden, weiterhin sind die Geometrien beider Datensätze nicht exakt deckungsgleich, unter anderem aufgrund der zwischenzeitlichen UTM-Umstellung. Aus diesem Grund muss ein geometrischer Zuordnungsalgorithmus verwendet werden, der identische Gebäude aus DFK und ALKIS zuordnet. Die insgesamt 1.255.397 nicht-deckungsgleichen Gebäude bilden die Differenz der Datensätze und werden als nach 2014 errichtete Gebäude ausgewiesen, die pauschal mit dem Baujahr „2015“ versehen sind.

Zensus (Wohngebäude)

Angaben zum Baualter von Wohngebäuden sind in einem räumlich aufgelösten Datensatz des Zensus 2011 enthalten, die Informationen sind räumlich auf ein 100-Meter-Gitter aggregiert. Stichtag des Zensus 2011 ist der 09.05.2011. Enthält eine Gitterzelle zu wenige Gebäude, werden aus Gründen des Datenschutzes bzw. des Statistikgeheimnisses für die jeweilige Zelle keine Informationen ausgewiesen. Somit decken diese lediglich einen Teil des Wohngebäudebestands ab. Die Einteilung der Baualtersklassen ist innerhalb des Zensus-Datensatzes nach folgendem Schema gegeben:

von	-	1919	1949	1979	1987	1991	1996	2001	2005	2009
bis	1918	1948	1978	1986	1990	1995	2000	2004	2008	-

Über die Daten des Zensus können die Baualtersklassen von etwa 80 % (entspricht 2.191.308 Gebäuden) der nicht-denkmalgeschützten Wohngebäude zugewiesen werden. Den verbleibenden 495.054 Gebäuden wird das pauschale Baujahr „1980“ zugewiesen.

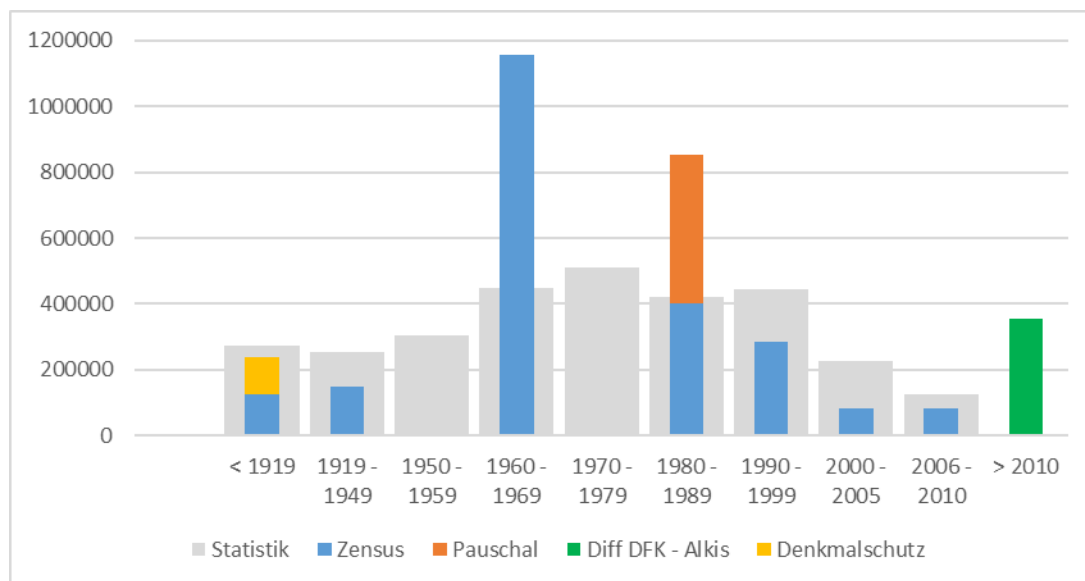


Abbildung 7: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude – ohne Adaption

Obige Abbildung zeigt die Baualtersklassenverteilung der Wohngebäude der Kommunalstatistik im Vergleich zu dem Auszählungsergebnis der bayernweiten Gebäude- und Wohnungszählung (Stichtag 09.05.2011). Es ist ersichtlich, dass aufgrund der unterschiedlichen Baualtersklasseneinteilung eine Abweichung in den Baujahren 1950 – 1979 erfolgt sowie eine Überschätzung der Baualtersklasse 1980 – 1989 durch die pauschale Zuweisung nichtzuordenbarer Gebäude. Um diese Abweichung zu kompensieren, wurden Gebäude der Zensus-Baualtersklasse 1949 – 1978 gemeindeweise auf Baualtersklassen 1950 – 1959, 1960 – 1969 und 1970 – 1979 inklusive der Wärmebedarfstypologie angepasst.

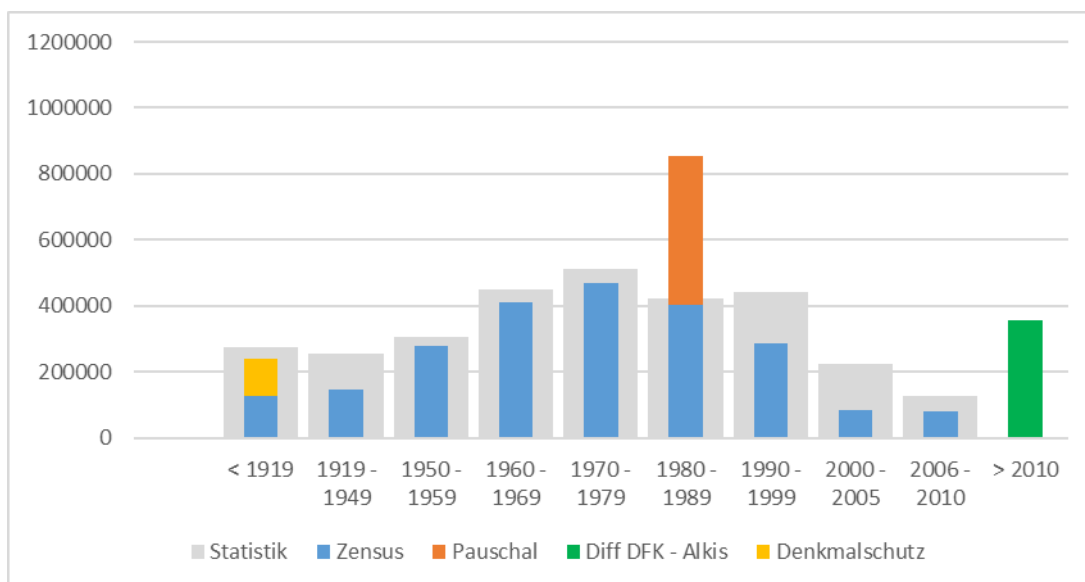


Abbildung 8: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude - Adaption Wärmenachfrage 1950 - 1979

Die pauschal zugewiesenen Wohngebäude werden nach dem gleichen Vorgehen korrigiert. Die pauschal zugeordneten Wohngebäude werden anteilig nach verbleibender Differenz auf die Baualtersklassen verteilt und der jeweiligen Wärmebedarfstypologie zugewiesen. Die Berechnung erfolgt gemeindeweise.

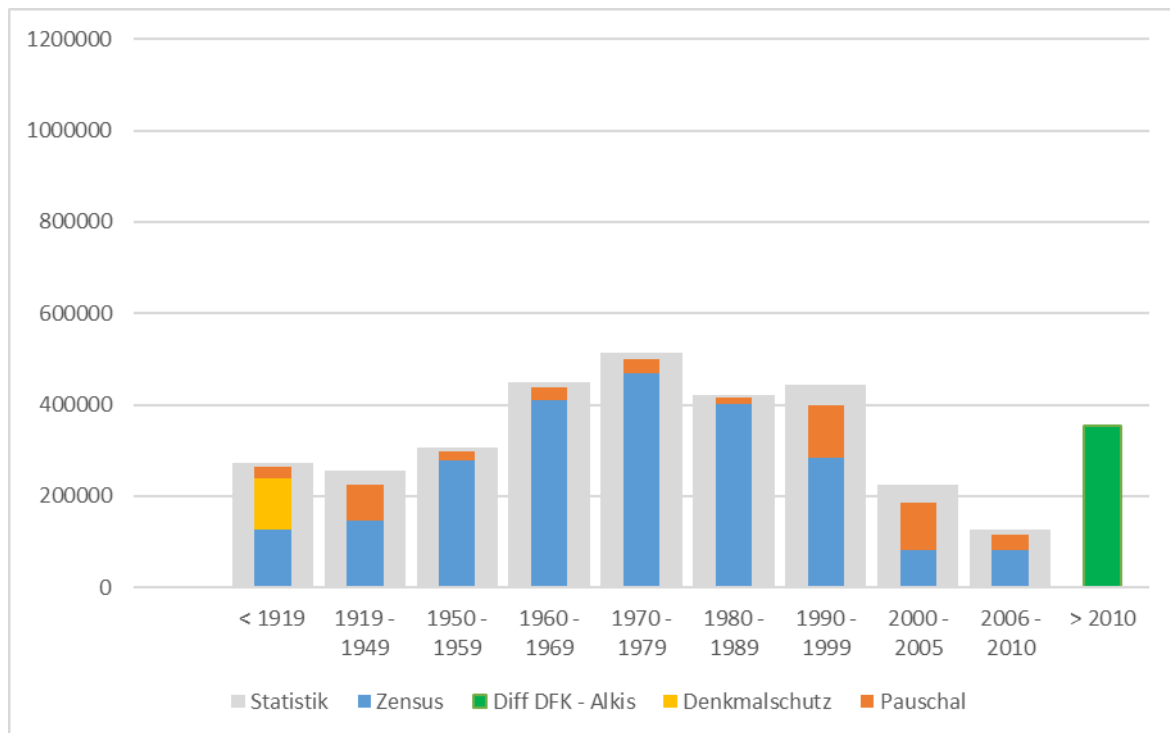


Abbildung 9: Baualtersklassenverteilung Wohngebäude - Adaption Wärmenachfrage pauschal zugewiesener Gebäude

Plausibilisierung Neubau

Die verbleibenden Gebäude der Baualtersklasse > 2010 werden über die Baufertigstellungsstatistik plausibilisiert. Diese weist für die Jahre 2011 – 2021 488,48 Mio. m³ umbautes Bruttovolumen für neu errichtete Nichtwohngebäude aus sowie 327,13 Mio. m³ umbautes Bruttovolumen für neu errichtete Wohngebäude. Dies steht 529,50 sowie 381,33 Mio. m³ umbautes Bruttovolumen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude im Modell gegenüber. Dies entspricht einer Abweichung von +8 % bei Nicht-Wohngebäuden und +16 % im Fall von Wohngebäuden. Die Abweichung ist mit der Beschränkung der Baufertigstellungsstatistik auf neu errichtete Wohn- und Nicht-Wohngebäude zu erklären und umfasst Vorgänge wie etwa Ersatzneubauten nicht, was sich in der positiven Abweichung widerspiegelt. Über die Methode zur Identifikation neuer Wohngebäude aus der Katasterdatendifferenz werden aber auch Änderungen im Gebäudebestand erkannt und als Neubau ausgewiesen. An anderer Stelle in der Baufertigstellungsstatistik kann eine grobe Abschätzung des Verhältnisses von Neubau zu Baumaßnahmen in bestehenden Gebäuden getroffen werden. So wird die Wohnungsanzahl sowohl neu errichteter als auch neu errichteter und sanierter Gebäude jährlich ausgewiesen. In den Jahren 2011 – 2021 liegt der Anteil neu errichteter Wohnungen bei 89 %.

Verbleibende Nicht-Wohngebäude

Für die verbleibenden 4.801.288 Nicht-Wohngebäude liegen keine weitergehenden Informationen zum Errichtungsjahr in den verfügbaren Datengrundlagen vor. Diesen wird folglich das pauschale Baujahr 1980 zugewiesen.

4.5 Gebäudemodell Bayern

gebäude	
PK	<u>gml_id:VARCHAR</u>
	nutzung:VARCHAR
	denkmalschutz:BOOLEAN
	baujahr:INTEGER
	volumen:FLOAT
	bezugsflaeche:FLOAT
	dachflaeche:FLOAT
	wandflaeche:FLOAT
	bodenflaeche:FLOAT
	gemeinde:VARCHAR
	gemeindeschluessel:VARCHAR
	geom:GEOMETRY

Das erstellte Gebäudemodell Bayerns basiert, wie oben genannt, auf den ALKIS-Gebäudeumrissen. Aus den verfügbaren Datenquellen wird für jeden Gebäudeumriss die relevante Information zu Geometrie, Nutzung und Baualter extrahiert und zugeordnet. Das Gebäudemodell ist in einer Gebäudedatenbank implementiert, die jedes Gebäude in nebenstehendem Datenmodell abbildet. Es bildet die Grundlage für alle weitergehenden Berechnungen und Auswertungen zum bayerischen Gebäudebestand. Die Übernahme der eindeutigen Objekt-ID des Katasters (gml_id) erlaubt eine einfache Fortschreibung sowie Historisierung des Modells und kann so gespiegelt zum Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) geführt werden. Der Gebäudeabriss kann etwa durch ein weiteres Attribut „abrissjahr“, der Gebäudeneubau durch Hinzufügen aktualisierter Katasterdaten abgebildet werden.

Abbildung 10: Datenmodell bayerisches Gebäudemodell

Nachstehend ist eine weitergehende Beschreibung der einzelnen Gebäudeattribute des bayerischen Gebäudemodells gegeben:

Tabelle 1: Attribute des bayerischen Gebäudemodells

Attribut	Beschreibung	Domäne / Dimension
gml_id	Eindeutige Objekt-ID des Gebäudes aus ALKIS	
nutzung	Gebäudenutzung und Gebäudetyp in einem Attribut kombiniert	efh rh_dh oeffentlich ghd industrie unbeheizt
denkmalschutz	Gibt an, ob ein Gebäude denkmalgeschützt ist bzw. sich in einem Denkmalschutz-Ensemble befindet	TRUE FALSE
baujahr	Baujahresangabe, mittleres Baujahr falls in Datenbasis Klassen angegeben	
volumen	Oberirdisches Bruttovolumen des Gebäudes aus LoD2 bzw. LoD1 Modell errechnet	m ³
bezugsflaeche	Aus Bruttovolumen abgeleitete Energiebezugsfläche	m ²
dachflaeche	Flächeninhalt aller Dachflächen des Gebäudes aus LoD2 bzw. LoD1 Modell errechnet	m ²
wandflaeche	Flächeninhalt aller Wandflächen des Gebäudes aus LoD2 bzw. LoD1 Modell errechnet	m ²
bodenflaeche	Flächeninhalt aller Bodenflächen des Gebäudes aus LoD2 bzw. LoD1 Modell errechnet	m ²

gemeinde	Offizieller Gemeindename
gemeindeschluessel	Offizieller Gemeindeschlüssel
geom	Geometrie Gebäudeumriss (POLYGON, EPSG:25832)

Die Aufteilung der Gebäudenutzung nach Gebäudeanzahl und umbautem Bruttovolumen zeigt für die als beheizt identifizierten Gebäude in Bayern nachfolgend dargestelltes Bild:

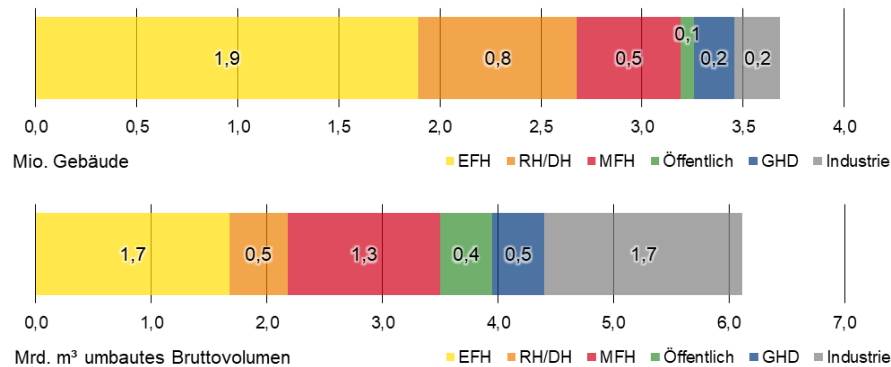


Abbildung 11: Verteilung Gebäudenutzung nach Gebäudeanzahl (oben) und umbautes Volumen (unten)

Die Auswertung zeigt, dass die Wohngebäude nach Anzahl den weitaus größten Teil (87 %) des bayerischen Gebäudebestandes bilden, jedoch bezüglich des umbauten Volumens lediglich etwas über 57 %. Umgekehrt stellt sich die Situation im Nicht-Wohngebäudebestand dar, der sich im Mittel über hohe umbaute Volumina je Objekt auszeichnet.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in der vorliegenden Gebäudedatenbank der GHD-Sektor im Bezug auf die zugewiesene Gebäudeanzahl und das umbaute Volumen unterschätzt wird. Der Grund hierfür liegt einerseits in der Kategorisierung von Wohngebäuden in ALKIS über die dominierende Nutzung, wodurch gemischt genutzte Gebäude tendenziell der Klasse der MFH zugeordnet werden. Andererseits ist bei der Zuweisung des industriellen Sektors über ATKIS zu beachten, dass sich in den ausgewiesenen Industriegebieten auch Unternehmen des Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektors befinden können. Eine weitergehende Differenzierung des Gebäudebestandes ist jedoch auf Basis der verfügbaren Datengrundlagen nicht möglich.

Erweitert man die Betrachtung um Baualtersklassen, so ergibt sich nachstehendes Bild des Gebäudebestands:

Tabelle 2: Bruttovolumen differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter

Bruttovolumen in Mio. m³	1910	1933	1963	1970	1980	1982	1988	1993	1998	2002	2006	2010	2015
EFH	91,36	63,85	598,87	311,07	44,9	137,43	35,1	67,83	71,58	37,24	27,26	7,71	184,34
RH	29,32	28,32	200,32	23,32	2,14	56,11	18,38	27,3	30,63	18,17	13,93	4,78	47,66
MFH	236,5	61,25	442,64	201,93	23,75	74,77	19,96	47,5	32,55	15,9	12,89	4,9	144,84
Öffentlich	109,87	0	0	0	253,02	0	0	0	0	0	0	0	80,94
GHD	80,97	0	0	0	327,84	0	0	0	0	0	0	0	45,43
Industrie	14,31	0	0	0	1295,29	0	0	0	0	0	0	0	404,41

Tabelle 3: Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter

Anzahl in Tsd.	1910	1933	1963	1970	1980	1982	1988	1993	1998	2002	2006	2010	2015
EFH	105,49	77,46	671,09	336,69	45,2	147,26	39,27	76,52	83,57	45,3	33,81	9,73	221,22
RH	42,02	43,31	316,42	32,65	2,44	87,73	29,44	42,7	49,46	30,37	23,34	8,22	76,99
MFH	90,86	26,65	169,17	81,02	12,2	29,73	8,11	18,37	13,66	6,61	4,91	1,68	51,29
Öffentlich	15,97	0	0	0	37,37	0	0	0	0	0	0	0	12,6
GHD	23,49	0	0	0	154,41	0	0	0	0	0	0	0	21,28
Industrie	1,69	0	0	0	194,9	0	0	0	0	0	0	0	61,21

Die Werte wurden gemeinde- und landkreisweise aggregiert als Geodatenatz aufbereitet. Diese bilden die Basis für die Integration in das Mischpult „Energimix Bayern vor Ort“. Das Baualter wurde hierbei für Wohngebäude noch entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise ausdifferenziert. Das gesamt-bayerische Bild bezogen auf einzelne Landkreise und Gemeinden ergibt sich wie folgt:

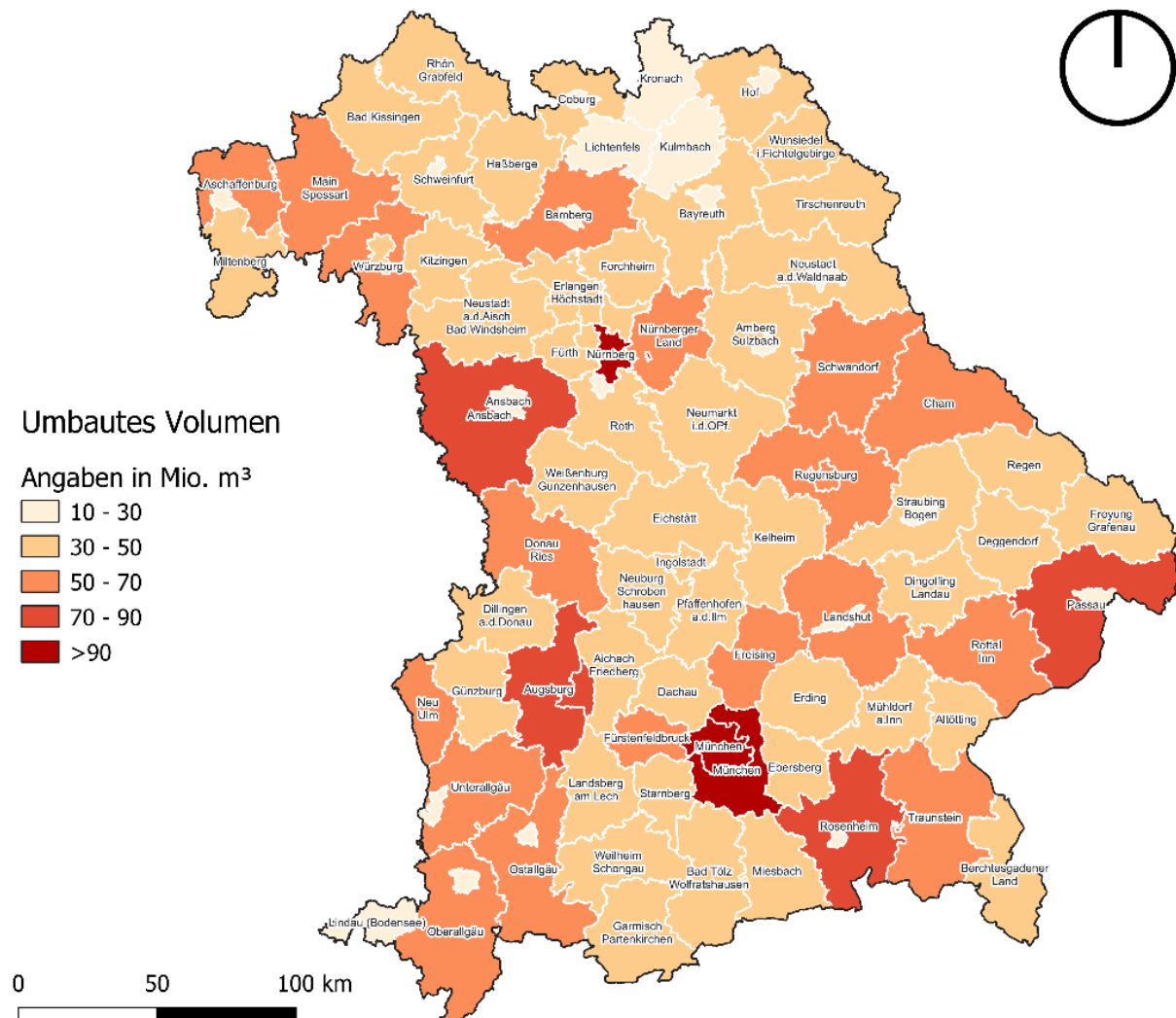


Abbildung 12: Aggregiertes, umbautes Volumen je Landkreis

4.6 Diskussion der Qualität

Die Qualität und der Umfang der verfügbaren Datengrundlagen beeinflussen direkt die Qualität des erstellten Gebäudemodells.

Hinsichtlich des zugewiesenen Baualters ist die „Auffangklasse 1980“ insbesondere bei Nicht-Wohngebäuden erheblich. Weiterhin sind die neueren Baualter ab dem Jahr 2012, die sich aus der Differenz zwischen ALKIS und der DFK ergeben, auf das Jahr 2015 fixiert. Allgemein reduziert sich die Baualtersdifferenzierung im Modell für Nicht-Wohngebäude damit auf drei wesentliche Baualtersgruppen: Neue Gebäude, die nach 2015 errichtet wurden, einen alten, denkmalgeschützten Bestand sowie den Zwischenbau, der über die Auffangklasse 1980 repräsentiert ist. Im Wohngebäudebestand konnte das Baualter aufgrund der Zensusdaten detaillierter differenziert werden. Generell bestehen jedoch Unsicherheiten hinsichtlich des im Modell ermittelten Baualters

von Gebäuden. Im Weiteren sind die Auswirkungen dieser Unsicherheit auf das Ergebnis der Potenzialermittlung im Wesentlichen durch die Unterschiede in den spezifischen Heizwärmebedarfen zwischen den typologischen Baualtersklassen bedingt und resultieren damit in dieser Größenordnung.

Für die Nutzung kann im Bereich der Wohngebäude und öffentlichen Gebäude von einer hohen Genauigkeit ausgegangen werden. Die Klassen GHD und Industrie sind hingegen mit größeren Unschärfen behaftet.

Die abgebildete Gebäudegeometrie weist allgemein eine hohe Qualität auf, da diese über terrestrische oder luftgetragene Messverfahren gebäudescharf erhoben wurde.

5 Aufbau einer bayernweiten Wärmebedarfsdarstellung

Der Aufbau einer bayernweiten Wärmebedarfsdarstellung orientiert sich zum einen an den Anforderungen im Projekt, die sich aus den Anforderungen der Methodik der Potenzialanalyse für die oberflächennahe Geothermie sowie der Integration der Ergebnisse in das Mischpult „Energienmix Bayern vor Ort“ ergeben. Zum anderen wird eine Methodik angewandt, die der Informationsverfügbarkeit zum Gebäudebestand in gegenständlichem Projekt gerecht wird.

5.1 Analyse des Wärmebedarfs des Gebäudebestands

Die gewählte Methodik zur Ermittlung des Wärmebedarfs ist typologiebasiert. Gebäuden werden dabei in Abhängigkeit ihrer Nutzung und ihres Baualters spezifische Kennwerte des Energiebedarfs zugeordnet. Diese spezifischen Kennwerte beziehen sich auf die Energiebezugsfläche, die wiederum aus der Gebäudegeometrie nutzungsbezogen abgeleitet wird. Die verwendete Typologie ist nachfolgend näher beschrieben.

Für den Wohngebäudebestand werden die folgenden, energiebezugsflächenbezogenen Kennwerte für Heizwärmebedarf sowie Warmwasserbedarf angesetzt:

Tabelle 4: Spezifischer Heizwärmebedarf in kWh/(m²a), Quelle: Loga, 2014

von	-	1919	1949	1958	1969	1979	1984	1995	2002
bis	1918	1948	1957	1968	1978	1983	1994	2001	2009
EFH	193,3	177,6	194,1	192,2	167,9	136,7	148,5	126,0	91,4
MFH	143,1	165,1	153,0	125,5	129,8	113,6	117,4	103,1	66,9
RH	169,7	150,6	166,9	121,5	140,5	140,9	113,3	91,5	82,2

Tabelle 5: Spezifischer Warmwasserbedarf in kWh/(m²a), Quelle: Loga, 2014

von	-	1919	1949	1958	1969	1979	1984	1995	2002
bis	1918	1948	1957	1968	1978	1983	1994	2001	2009
EFH	12,9	14,4	12,8	13,0	15,1	17,7	16,8	19,8	21,4
MFH	38,6	34,9	36,6	41,5	40,9	43,2	42,7	23,4	24,9
RH	15,0	16,6	15,2	18,6	17,4	17,4	19,2	21,4	21,8

Für neuere Wohngebäude (ab Baujahr 2010) wurde im Projekt eine weitere Klasse mit einem verminderten Heizwärmebedarf von 45 kWh/(m²a) entsprechend des Grenzwertes des KfW-Effizienzhaus 70 der EnEV 2016 angesetzt, um gesetzlich gesteigerte Anforderungen an die Energieeffizienz abzubilden. Die Warmwasserbedarfe entsprechen denen der Baualtersklasse von 2002-2009 aus Tabelle 5.

Für öffentliche Gebäude und GHD werden die folgenden, energiebezugsflächenbezogenen Kennwerte für Endenergie jeweils für Heizwärmebedarf und Warmwasser angesetzt. Die Werte entstammen der Studie „Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland“ des Instituts Wohnen und Umwelt (Hörner, 2022):

Tabelle 6: Heizwärmebedarf in kWh/(m²a) für öffentliche Gebäude und GHD; Quelle: Hörner, 2022

von bis	- 1978	1979 2009	2010 -
öffentlich	166,7	115,4	59,1
GHD	153,8	100,1	63,7

Tabelle 7: Warmwasserbedarf in kWh/(m²a) für öffentliche Gebäude und GHD; Quelle: LfU, 2015

von bis	- 1978	1979 2009	2010 -
öffentlich	6,5	6,5	6,5
GHD	6,5	6,5	6,5

Für den industriellen Sektor wird kein Wärmebedarf in der Wärmebedarfsdarstellung ausgewiesen, da hier eine Aussage – selbst zur Größenordnung – auf Grundlage der verfügbaren Datenbasis mit extremen Unsicherheiten behaftet wäre.

Die gewählte Methodik des typologiebasierten Wärmebedarfs wird im Kontext des gegenständlichen Projektes als zielführend erachtet, da genauere Differenzierungen von Nutzung und Baualter nicht möglich sind und daher detailliertere, gebäudeweise Analysen etwa durch Verfahren der Bilanzierung oder Gebäudesimulation keinen nennenswerten Qualitätsgewinn hinsichtlich der Aussagen zur Wärmenachfrage ergeben würden. Weiterhin bildet die gewählte Methode alle für die folgende Potenzialanalyse erforderlichen Kennwerte wie etwa die Jahresheizenergie für Raumwärme und Warmwasser sowie abgeleitete Heizleistungen ab.

5.2 Analyse von Sanierungspotenzialen im Gebäudebestand

Die gewählte Methodik zur Analyse von Sanierungspotenzialen ist analog zur Methodik zur Analyse des Ist-Zustandes typologiebasiert. Für die unterschiedlichen Nutzungsarten beziehungsweise Gebäudetypen werden maximale Sanierungstiefen gemäß der Tabula Gebäudetypologie (Loga, 2014) in Form spezifischer Energiekennwerte in Abstimmung mit dem Auftraggeber festgelegt. Dies entspricht der Abbildung von Sanierungspotenzialen im Mischpult „Energimix Bayern vor Ort“ und zielt auf deren Implementierung im Mischpult ab.

Für den Wohngebäudebestand werden die folgenden, spezifischen Kennwerte für Heizwärmebedarf sowie Warmwasserbedarf angesetzt:

Tabelle 8: Spezifischer Jahresheizwärmebedarf in kWh/(m²a) für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Quelle: Loga, 2014

von bis	- 1918	1919 1948	1949 1957	1958 1968	1969 1978	1979 1983	1984 1994	1995 2001	2002 -
EFH	38,1	30,4	42,9	52,7	39,7	24,1	38,2	39,7	35,9
MFH	31,4	22,9	32,4	17,3	26,2	31,9	21,5	19,4	31,2
RH	25,3	33,2	33,5	25,2	30,2	26,6	29,4	23,1	20,0

Tabelle 9: Spezifischer Warmwasserbedarf in kWh/(m²a), Quelle: Loga, 2014

von bis	- 1918	1919 1948	1949 1957	1958 1968	1969 1978	1979 1983	1984 1994	1995 2001	2002 -
EFH	23,2	23,4	23,1	22,9	23,2	23,5	23,2	23,2	23,3
MFH	26,1	26,0	26,0	26,1	26,0	26,1	26,1	26,2	26,3
RH	23,3	23,5	23,3	23,6	23,5	23,3	23,5	23,6	23,3

Je nach Gebäudetypologie wurden verschiedene typische Maßnahmen für jede Baualtersklasse umgesetzt. Als Szenario wurde das „zukunftsweisende“ Modernisierungspaket 2 ausgewählt, das im Schnitt 30 kWh/m²a als Heizwärmebedarf erzielt und in etwa dem heutigen KfW-Effizienzhaus 55 entspräche. Nachfolgendes Beispiel zeigt die für die Sanierung erforderliche Maßnahmen am Beispiel eines Einfamilienhauses (EFH) der Baualtersklasse 1958 bis 1968:

Tabelle 10: Maßnahmenpaket für die Sanierung eines Einfamilienhauses der Baualtersklasse 1958-1968 (Loga, 2014, vgl. S. 157)

	Modernisierungspakt 2 „zukunftsweisend“
Dachdämmung	30 cm (WLS 035)
Außenwanddämmung	24 cm (WLS 035)
Fenster	3-Scheiben-Wärmeschutz-Verglasung mit gedämmtem Rahmen (Passivhaus-Fenster)
Kellerdeckendämmung	12 cm (WLS 035)

Für alle Gebäudetypen sind die erforderlichen Maßnahmen in der Tabula-Studie auf den Seiten 147 ff. aufgelistet (Loga, 2014).

Für denkmalgeschützte Wohngebäude wird die maximale Sanierungstiefe bezogen auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf wie folgt festgelegt:

EFH: 110,1 kWh/m²a RH: 106,8 kWh/m²a MFH: 91,6 kWh/m²a

mit einem spezifischen Warmwasserbedarf von

EFH: 20,6 kWh/m²a RH: 20,7 kWh/m²a MFH: 24,0 kWh/m²a

Die Festlegung erfolgte basierend auf der Annahme, dass bei denkmalgeschützten Gebäuden geringere Eingriffe und daher eine verringerte Sanierungstiefe möglich sind. Die Werte sind abgeleitet aus der IWU Tabula Gebäudetypologie für Gebäude der Baualtersklasse 1860 – 1918 und einer konventionellen Sanierung des Gebäudes.

Für öffentliche Gebäude wird ein Pauschalwert von 59,1 kWh/m²a als Jahresheizwärmebedarf angesetzt (entspricht Neubauklasse aus Tabelle 6), wobei für denkmalgeschützte öffentliche Gebäude die maximale Sanierungstiefe mit 115,4 kWh/m²a angesetzt ist (entspricht mittlerer Baualtersklasse aus Tabelle 6). Der Warmwasserbedarf ändert sich mit 6,5 kWh/m²a nicht gegenüber der unsanierten Variante.

Für Gebäude des Sektors GHD wurde ein Pauschalwert von 63,7 kWh/m²a als Jahresheizwärmebedarf angesetzt (entspricht Neubauklasse aus Tabelle 6), wobei für denkmalgeschützte Gebäude des GHD-Sektors die maximale Sanierungstiefe mit 100,1 kWh/m²a angesetzt ist (entspricht mittlerer Baualtersklasse aus Tabelle 6). Der Warmwasserbedarf ändert sich mit 6,5 kWh/m²a nicht gegenüber der unsanierten Variante.

5.3 Gebäudedatenmodell für den Bestand und die Sanierung

Aus dem Gebäudebestandsmodell und den zu Grunde gelegten Typologien errechnen sich die Wärmebedarfe für den Bestand und für eine (maximale) Sanierungsvariante. Die Wärmenachfrage und die Sanierungsvarianten sind gebäudeweise in der Gebäudedatenbank als Erweiterung des Bestandsmodells mit folgendem Datenmodell abgelegt:

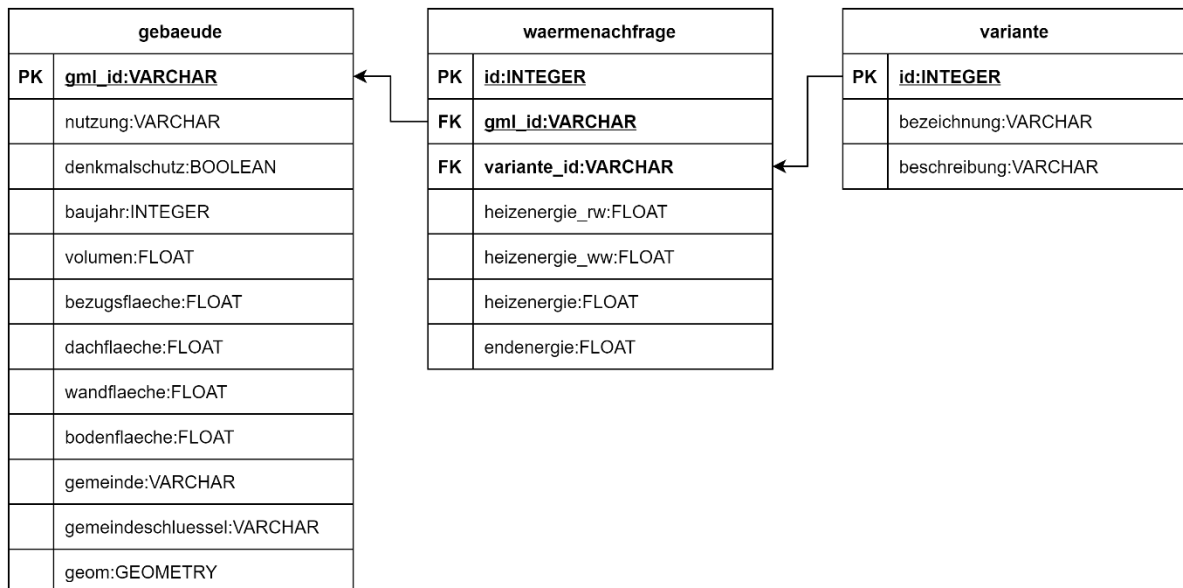


Abbildung 13: Datenmodell zur Erhebung einer bayernweiten gebäudescharfen Wärmebedarfsdarstellung

Nachstehend ist eine fachliche Beschreibung der einzelnen Gebäudeattribute gegeben:

Tabelle 11: „waermenachfrage“

Attribut	Beschreibung	Domäne / Dimension
id	Eindeutige ID der Variante bezogen auf gesamten Gebäudebestand	
variante_id	ID der Sanierungsvariante, auf die sich Werte beziehen	
heizenergie_rw	Jahresheizenergie für Raumwärme	kWh/a
heizenergie_ww	Jahresheizenergie für Warmwasser	kWh/a
heizenergie	Jahresheizenergie für Raumwärme und Warmwasser	kWh/a
endenergie	Jahresendenergie	kWh/a

Tabelle 12: „variante“

Attribut	Beschreibung	Domäne / Dimension
id	Eindeutige ID der Variante	
bezeichnung	Bezeichnung der Sanierungsvariante	
beschreibung	Kurzbeschreibung der Sanierungsvariante	

Grundsätzlich ergeben sich aus gegenständlicher Analyse für Bayern folgende Werte für den Wärmebedarf des Gebäudebestands:

Tabelle 13: Wärmebedarf bayernweiter Gebäudebestand

	Energiebezugsfläche	Wärmeerzeuger		Endenergiebedarf	
	Mio m ²	Heizwärme TWh/a	Warmwasser TWh/a	gesamt TWh/a	gesamt TWh/a
Wohngebäude	888,8	108,3	19,2	127,5	137,7
Öffentlich	107,8	12,0	0,7	12,7	13,7
GHD	116,3	12,3	0,8	13,1	14,1
Industrie	-	-	-	-	-

Die „Energiedaten.Bayern – Schätzbilanz 2021“ (BStMWi 2022) wird zur Validierung der Bedarfe herangezogen. In dieser werden unter anderem die Endenergieverbräuche getrennt und temperaturbereinigt nach Energieträger für den Sektor Haushalte und GHD ausgewiesen. Abzüglich des Endenergieverbrauchs für Strom ergibt sich eine Summe von 158,2 TWh im Jahr 2019. Die vorläufigen Werte basierend auf Daten des LFStat ergeben 158,4 TWh für 2020 und die Schätzbilanz weist für 2021 151,9 TWh Endenergiebedarf aus. Die ausgewiesenen Funktionen Wohngebäude, öffentliche Gebäude und GHD entsprechen dem Sektor Haushalte und GHD der Veröffentlichung „Energiedaten.Bayern – Schätzbilanz 2021“, somit ergibt sich im Projekt eine bayernweite Summe von 165,5 TWh (Tabelle 13). Diese weicht gegenüber den Statistikdaten zu 4,4 % im Vergleich zu dem Endenergiebedarf des Jahres 2019, 4,4 % 2020 und 8,2 % 2021 ab.

Differenziert nach Nutzung und Baualter ergibt sich folgende Verteilung des Endenergiebedarfs über den bayernweiten Gebäudebestand:

Tabelle 14: Endenergiebedarf in TWh differenziert nach Gebäudefunktion und Baualter

Endenergie in TWh	1910	1933	1963	1970	1980	1982	1988	1993	1998	2002	2006	2010	2015
EFH	4,73	3,07	29,51	12,77	1,74	5,33	1,46	2,81	2,62	1,05	0,77	0,13	3,06
RH	1,36	1,19	7,92	0,64	0,08	2,23	0,61	0,91	0,87	0,47	0,36	0,08	0,8
MFH	10,72	3,05	19,27	7,26	0,93	2,93	0,8	1,9	1,02	0,36	0,29	0,09	2,46
Öffentlich	3,66	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	2,03
GHD	3,59	0	0	0	9,66	0	0	0	0	0	0	0	0,88

Die Werte wurden gemeinde- und landkreisweise aggregiert als Geodatensatz aufbereitet. Diese bilden die Basis für die Integration in das Mischpult „Energimix Bayern vor Ort“. Das gesamt-bayerische Bild bezogen auf einzelne Gemeinden ergibt sich wie folgt:

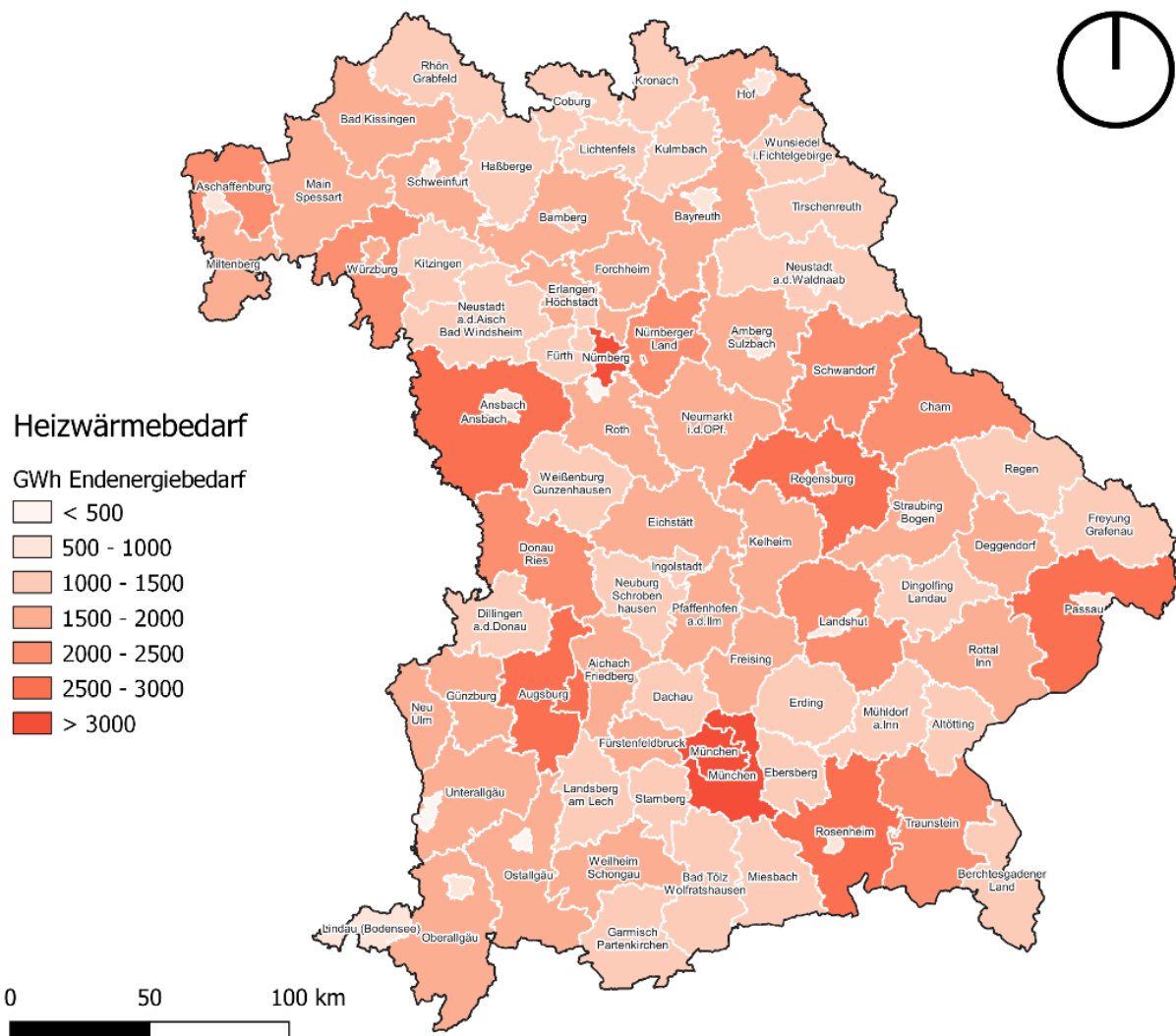


Abbildung 14: Aggregierter Endenergiebedarf in GWh/a je Landkreis

Die Ergebnisse der Wärmebedarfsanalyse sind in einer bayerischen Wärmedichtekarte aufbereitet, die einen Überblick zur Verteilung der Wärmenachfrage in Bayern gibt. Die Interpolation wurde dabei so gewählt, dass keine einzelnen Wärmesenken identifizierbar sind.



Abbildung 15: Bayernweite Wärmedichtekarte, qualitative Darstellung mit relativer Einfärbung nach Wärmenachfrage von rot (geringe Wärmenachfrage) bis hellgelb (hohe Wärmenachfrage)

5.4 Diskussion der Qualität

Die Ermittlung des Wärmebedarfs basiert auf den Daten des erstellten Gebäudemodells, dessen Qualität von der Nutzungskategorie Wohnen über öffentliche Gebäude hin zu GHD und Industrie stark abfällt. Dies schlägt sich direkt auf die Qualität der Erhebung der Wärmebedarfe nieder. Hinsichtlich der Abbildung des Gebäudebestandes ist weiterhin zu beachten, dass der aktuelle energetische Sanierungszustand von Bestandsgebäuden aus dem Gebäudemodell nicht hervorgeht und damit diesbezüglich eine weitere Unschärfe im Modell enthalten ist.

6 Bayernweites oberflächennahes Potenzial

6.1 Definition der Potenziale

Die Bewertung des oberflächennahen, geothermischen Potenzials ist aus mehreren Gründen komplex, weshalb eine einführende Definition der möglichen Potenzialbegriffe notwendig ist. Dabei soll auch klargestellt werden, welche Aspekte das hier bestimmte Potenzial beinhaltet und welche Limitierungen in der Bestimmung vorhanden sind. Damit soll die Aussagekraft des dargestellten Potenzials deutlich gemacht und einer Fehlinterpretation der berechneten Potenzialwerte vorgebeugt werden.

Zur Darstellung im Energie-Atlas Bayern wird ein **praxisnahes, quantitatives und umsetzbares Potenzial** unter Berücksichtigung der **gesetzlichen, technischen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen** für die drei Systeme der oberflächennahen Geothermie angestrebt.

Die hier angewandten Methoden zur Abschätzung der Potenziale basieren auf der Potenzialdefinition des Bayerischen Energiegipfels, welche in Abbildung 16 veranschaulicht wird.

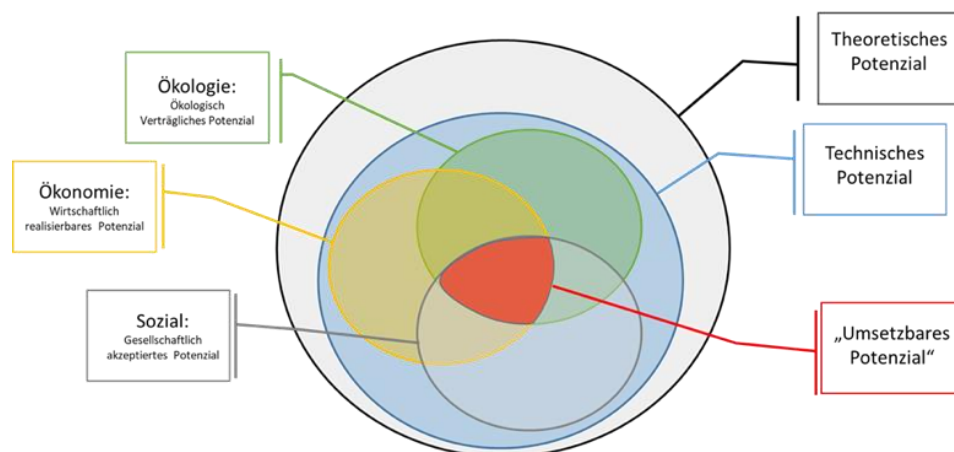


Abbildung 16: Potenzialbegriffe aus dem Ergebnisbericht des Energiegipfels 2018 (StMWi, 2019)

Das **theoretische Potenzial** umfasst die absolut im Untergrund verfügbare Wärmemenge/Entzugs- oder Heizleistung in Abhängigkeit der geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Untergrundbedingungen. Es wird zunächst durch technische Einschränkungen reduziert und im Weiteren durch ökologische, ökonomische und soziale Bedingungen auf das umsetzbare Potenzial eingeschränkt.

Das für den Energie-Atlas Bayern erarbeitete, **umsetzbare Potenzial** soll eine Aussage über die initiale Machbarkeit einer oberflächennahen Geothermieranlage an einem Standort aufzeigen. Die Aussage soll dabei insbesondere belastbar, konservativ (also auf jeden Fall erreichbar) und beständig sein. Berücksichtigt werden daher technische, ökologische und soziale Einschränkungen. Ökonomische Einschränkungen werden gesondert betrachtet, da diese komplex zu erheben und hoch dynamisch sind.

Den Rahmen für die **ökologische Verträglichkeit und gesellschaftliche Akzeptanz** bilden dabei die derzeit bestehenden, landesspezifischen Regelwerke bzw. Genehmigungen, wie dem Bayerischen Wassergesetz (BayWG) und dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG), sowie den existierenden Leitfäden zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie. Das heißt alle potenzial-limitierenden Faktoren im Sinne der **ökologischen Verträglichkeit** (ökologisch verträgliches Potenzial) sind in den Methoden insbesondere durch die Berücksichtigung der Genehmigungspraxis abgebildet. Dazu gehören zum Beispiel Abstände zwischen Erdwärmesonden/Brunnendubletten, volumenbezogene und thermische

Injektions- und Entnahmebegrenzungen und Bohrtiefenbegrenzungen. Zudem werden Bereiche, die eine Nutzung rechtlich und/oder ökologisch ausschließen, in der Potenzialanalyse berücksichtigt, indem diese Flächen kein Potenzial aufweisen. Abbildung 17 zeigt die derzeit bestehenden Ausschlussgebiete.

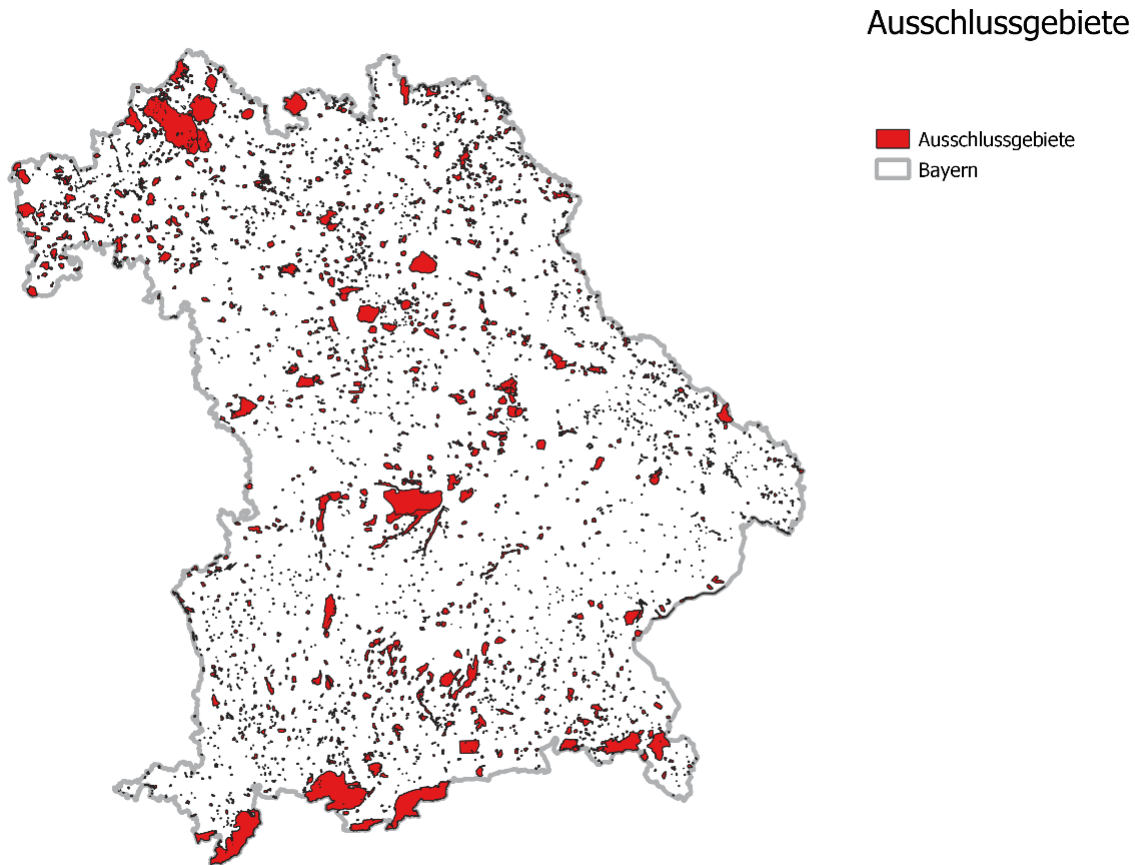


Abbildung 17: Karte der Ausschlussgebiete, insbesondere Natur- und Trinkwasserschutzgebiete (Quelle: LfU)

Bei den Ausschlussflächen werden bayernweit Schutzgebiete sowie offene Gewässer berücksichtigt. Dazu gehören Gebiete, in denen grundsätzlich keine geothermischen Systeme erlaubt sind (im Einzelfall können hier Ausnahmen bestehen) wie Wasserschutzgebiete, Risikogebiete z. B. mit Hangbewegungen, oder teilweise in sog. wassersensiblen Gebieten, etc. Zusätzlich können in Gebieten mit besonderen Bohrrisiken wie z. B. Karstgestein, Sulfatgesteine, Dolinen oder artesisch gespanntem Grundwasser geothermische Systeme nicht generell umgesetzt werden, sondern nur in Einzelfällen erlaubt sein. Für die kommunale Planung müssen ggf. in der lokalen Umsetzung der Ergebnisse ergänzend Naturdenkmäler (Bäume), Überschwemmungsgebiete, überbaute Gewässer und Bodendenkmäler (z. B. historische Stadtkerne), Biotope und bestehende städtische Infrastruktur/ baurelevante Ausschlussflächen (Tunnel, Unterführungen, unterirdische Gebäude, Tiefgaragen, Fernwärme- und U-Bahnnetz) berücksichtigt werden.

Es ist dabei zu beachten, dass im Falle einer Änderung des gesetzlichen Regelwerks wie Beschränkungsverschärfung oder -lockerung, diese Änderungen auch in der Methodik der Potenzialanalyse angepasst werden müssen und die durchgeführte Analyse strenggenommen nur eine eingeschränkte Gültigkeit hat bzw. Ungenauigkeiten aufweist.

Das umsetzbare Potenzial wird generell konservativ ausgelegt. Hydrogeologische Kennwerte und Parameter zur technischen Umsetzung werden jeweils so angenommen, dass ein „mindestens

umsetzbares Potenzial“ ausgewiesen wird (siehe Kapitel 6.3.2, 6.4.2 und 6.5.2 zur Beschreibung der Datengrundlage für die drei Technologien). Dabei soll vermeiden werden, dass ein ausgewiesenes Potenzial in der Realität nicht erreichbar ist. Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass das umsetzbare Potenzial zum Teil höher einzuschätzen ist als in diesem Konzept ausgewiesen.

Die **ökonomische Umsetzbarkeit** ist in der Methodik strenggenommen nicht integriert. Insbesondere der sehr volatile Energiemarkt als auch die Dynamik in der Förderkulisse würden dazu beitragen, dass die Potenzialergebnisse nur kurzzeitig belastbar wären. Dabei ist grundsätzlich zu erwähnen, dass erdgekoppelte Wärmepumpen theoretisch immer finanziell umsetzbar sind, aber zur ökonomischen Bewertung ein Bezug zu alternativen Systemen dargestellt und unter Einbeziehung aller Fördermöglichkeiten bewertet werden muss. In der Praxis ist die Umsetzung eines oberflächennahen Systems auch generell abhängig von der Motivation der Akteure, bei der die ökonomischen Aspekte eine signifikante Rolle spielen.

Es gibt einige klare Gegebenheiten, welche die Effizienz der Systeme und damit deren Wirtschaftlichkeit stark limitieren können, die in der Potenzialanalyse berücksichtigt werden. Dazu gehören zum Beispiel hohe Flurabstände bei Grundwasserwärmepumpen, welche den Primärenergieaufwand für die Förderung des Grundwassers und so die Arbeit des Gesamtsystems stark erhöhen und damit die Effizienz senken. Weitere Faktoren wären geringe Grundwassertemperaturen oder Bohrtiefenbegrenzungen für Erdwärmesonden. Dabei ist jedoch nochmals zu erwähnen, dass die wirtschaftliche Effizienz fallabhängig ist, so dass beispielsweise ein großer Flurabstand bei Standorten mit hohem Wärmebedarf und großen Grundwasserwärmepumpen-Anlagen keine bedeutende Limitierung darstellt und diese sich wirtschaftlich effizient umsetzen lassen, während bei kleinen Anlagen dies eine entscheidende Einschränkung darstellen kann. Andere Aspekte, insbesondere bei der Potenzialanalyse für Erdwärmesondensysteme, werden in der Potenzialanalyse berücksichtigt. Beispielsweise ist, laut mündlicher Mitteilung von befragten Planungs- und Bohrfirmen, die Umsetzung von zu kurzen Erdwärmesonden (z. B. < 30-60 m) wirtschaftlich nicht rentabel. Für ein Einfamilienhaus kann aber durch die Bohrtiefenbegrenzung eine hohe Anzahl an Erdwärmesonden zur Abdeckung des relativ geringen Wärmebedarfs notwendig werden, die aber dann wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig sind. Bei hoher Motivation der Akteure wäre allerdings durchaus die Umsetzung eines oberflächennahen Systems möglich.

6.2 Prinzipielle Methode zur Potenzialbestimmung für GWWP, EWS und EWK

Für die Potenzialbestimmung zur oberflächennahen Geothermie ist eine große Anzahl flächendeckender, geologischer und hydrogeologischer Daten notwendig. Der Großteil dieser Daten wurde vom LfU zur Verfügung gestellt. Ein weiterer Teil, wie Detailstudien, war direkt bei der TUM über Vorarbeiten aus mehreren anderen Projekten verfügbar. Nach Sichtung der Daten und weiterer Recherche zur bestmöglichen Vervollständigung der Datengrundlage wurden die vorhandenen Datensätze zur weiteren Verarbeitung in den Datenbanken oder über geografische Informationssysteme aufbereitet.

Bei der Verarbeitung wurde für alle drei Technologien prinzipiell gleich vorgegangen:

- **Ausschluss- und Eignungsgebiete:** Im ersten Schritt werden die Ausschlussgebiete geprüft. Diese wurden vom LfU festgelegt. Dort darf das jeweilige System grundsätzlich nicht eingesetzt werden. Zusätzlich ist jede Technologie, auch wenn sie genehmigungsrechtlich umgesetzt werden könnte, nicht überall gleichermaßen geeignet. Insbesondere für Grundwasserwärmepumpen werden demnach nur Gebiete mit quartärem Porengrundwasserleiter berücksichtigt, da diese allgemein und im Gegensatz zu tiefer liegenden Grundwasserleitern oder Karstgrundwasserleitern den ersten anzutreffenden Grundwasserleiter darstellen, und i. d. R. die genehmigungsrelevanten Voraussetzungen erfüllen. Es kann in der Praxis auftreten, dass beispielsweise Grundwasserwärmepumpen auch

in anderen Grundwasserleitern in tieferen Stockwerken, Karstgebieten oder lokalen Grundwasserleitern (z. B. Moränenlandschaft) umgesetzt werden. Diese bilden lokale Ausnahmen und können in einer Darstellung des bayernweiten Gesamtpotenzials nicht abgebildet werden. In diesen Flächen wird in der Regel kein Potenzial ausgewiesen, aber es wird der Hinweis in der Darstellung aufgenommen, dass lokal Systeme umgesetzt werden könnten und dies im Einzelfall zu prüfen ist.

- **Datengrundlage:** Nach Betrachtung der Ausschlussgebiete werden die benötigten Datensätze für die weitere Prozessierung und Potenzialanalyse der oberflächennahen Geothermie zusammengestellt. Dazu wurden, wie bereits erwähnt, die vom LfU zur Verfügung gestellten Datensätze geprüft und gegebenenfalls mit anderen Datengrundlagen ergänzt.
- **Flurstückbezogene Berechnung (Mischpult):** In der Berechnung des Potenzials der oberflächennahen Geothermie auf Flurstückebene wird für jedes Flurstück (mit darauf liegenden Gebäuden) auf Basis der ALKIS-Datenbanken in Abhängigkeit des Wärmebedarfs ein Potenzialwert ermittelt. Daran schließt sich der Potenzialabgleich für das Mischpult an (siehe auch Kapitel 7).
- **Rasterbezogene Berechnung (Energie-Atlas Bayern):** Für die Darstellung auf Rasterebene wird das Potenzial analog zur angewandten Methodik bei der flurstückbezogenen Berechnung bestimmt, aber mit einem einheitlich angesetzten Referenzsystem für ein 10 m x 10 m-Raster und ohne Bezug zu dem dort vorhandenen Wärmebedarf.

In den folgenden Abschnitten 6.3. - 6.5. werden für jedes geothermische System die angewandte Berechnungsmethode beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt.

6.3 Methodik der Potenzialermittlung für Grundwasserwärmepumpen (GWWP)

6.3.1 Einführung in die TAP-Methode

Die hier verwendete Berechnung zur quantitativen Bestimmung des geothermischen Potenzials für thermische Grundwassernutzungen durch Grundwasserwärmepumpen basiert auf der am Lehrstuhl Hydrogeologie der Technischen Universität München im Rahmen des EU-Interreg Projektes GRETA von Böttcher et al. (2019) entwickelten TAP-Methode (**T**hermal **A**quifer **P**otenzial-Methode).

Grundwasserwärmepumpen sind offene Systeme, welche die Wärme direkt aus dem Grundwasser beziehen. Das Grundwasser wird dem Grundwasserleiter durch einen Förderbrunnen mit einer Unterwassertauchpumpe entnommen, passiert den quellenseitigen Wärmetauscher einer Wärmepumpe und wird nach der thermischen Nutzung mit niedrigerer Temperatur über einen Injektionsbrunnen (Schluckbrunnen) dem Grundwasserleiter wieder zugeführt. Die Zurückführung des Grundwassers zum Grundwasserleiter erfolgt zur nachhaltigen Nutzung und ist genehmigungsrechtlich durch das Wasserecht vorgeschrieben. Der typische Aufbau einer Grundwasserwärmepumpe ist in Abbildung 18 dargestellt. Für die Potenzialanalyse wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass eine Anlage stets aus nur einem Brunnenpaar besteht, jedoch in der Dimensionierung (genutzter Volumenstrom) variieren kann.

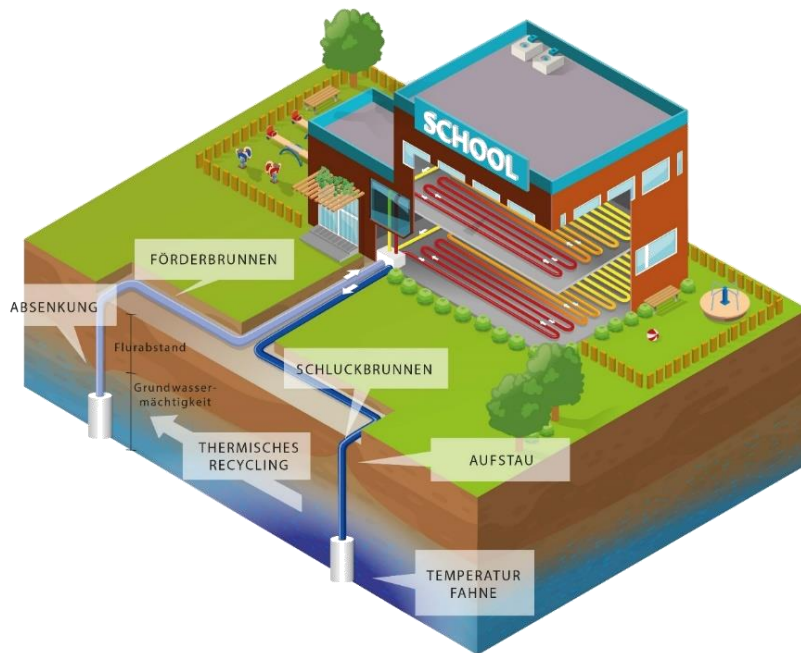


Abbildung 18: Der typische Aufbau einer Grundwasserwärmepumpe mit einem Förder- und einem Schluckbrunnen mit den jeweils relevanten Prozessen, die das technische Potenzial begrenzen (Quelle: Interreg Alpine Space Programme, Projekt GRETA).

Die Abschätzung des verfügbaren, förderbaren Volumenstroms aus dem Grundwasserbrunnen ist von grundlegender Bedeutung für die quantitative Bewertung von Grundwasserressourcen und hängt von den naturbedingten Parametern der grundwassererfüllten Mächtigkeit (Abstand der Grundwasseroberfläche zur Grundwasserleitersohle), des Flurabstands (Abstand der Grundwasseroberfläche zur Geländeoberkante), der hydraulischen Durchlässigkeit, der Grundwasserfließgeschwindigkeit und -richtung (bzw. des hydraulischen Gradienten) sowie von brunnentechnischen Bedingungen ab. Bei der Förderung und Reinjektion des Grundwassers sind grundsätzlich drei Bedingungen zu beachten, welche in der Genehmigungspraxis basierend auf den bayerischen Bestimmungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie (VDI 4640, BayWG und WHG) eine bedeutende Rolle spielen. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen wird:

- Mit welcher maximalen Pumprate kann Wasser aus dem Förderbrunnen entnommen werden (ohne eine übermäßige Nutzung des vorhandenen Grundwasserdargebots zu bewirken)?
- Mit welcher maximalen Rate kann Wasser in den Schluckbrunnen eingeleitet werden (ohne eine negative Beeinflussung durch eine Erhöhung des Grundwasserstands an der Oberfläche zu erzeugen)?
- Bei welcher Rate wird das Wasser in Abhängigkeit des Brunnenabstands nicht zwischen Schluck- und Förderbrunnen zirkuliert (um eine Reduzierung der Effizienz des Systems zu vermeiden)?

Zunächst wird das theoretische Potenzial im technischen Potenzial durch die maximal mögliche Pumprate im Förderbrunnen beschränkt. Während des Pumpvorgangs senkt sich der Wasserstand im Brunnen. Für eine nachhaltige Entnahme muss zum einen verhindert werden, dass die Pumpe im Extremfall trockenfällt, und zum anderen, dass weitreichende **Grundwasserabsenkungen** negative Auswirkungen auf die Ökologie oder Nachbarnutzungen haben. Dazu wird ein Richtwert, der sich in der bayerischen, wasserwirtschaftlichen Genehmigungspraxis etabliert hat, von einem Drittel der natürlichen Grundwassermächtigkeit als maximal tolerierte Absenkung des Wasserstands festgesetzt (LfU Merkblatt 3.7/1 in Vorbereitung). Diese Vorgabe findet sich oftmals auch in wasserrechtlichen Genehmigungen in Bayern, so dass auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht die Berücksichtigung notwendig ist. Dies unterstützt den gewünschten konservativen Ansatz, da gewährleistet sein sollte,

dass auch zu Spitzenlastzeiten genügend Grundwasser zur Abdeckung des Wärmebedarfs vorhanden ist. Daher ist als bestmögliche Bemessungsgrundlage für die angesetzte, grundwassererfüllte Mächtigkeit ein Niedrigwasserstand des Grundwassers anzusetzen. Von diesem aus sollte dann die ein Drittel nutzbare Mächtigkeit ermittelt werden. Dies erfolgt in der vorliegenden Analyse, wenn die Information dazu in der verfügbaren Datengrundlage vorhanden war. In anderen Gebieten konnte dies nicht umgesetzt werden und wurde in der Darstellung der Unsicherheit der Datengrundlage als ein Aspekt berücksichtigt. Auf Basis des generell konservativen Ansatzes zur Betrachtung der nutzbaren, grundwassererfüllten Mächtigkeit kann in der Regel das tatsächlich vorhandene nutzbare Potenzial höher sein als das in dieser Studie ermittelte, denn ein Niedrigwasserstand fällt oftmals nicht mit Spitzenlastzeiten des Wärmebedarfs zusammen. Da jeweils das maximale Potenzial unter diesen Bedingungen evaluiert werden soll, wird außerdem die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Brunnen jeweils vollständig (vollkommen) ausgebaut sind. Das bedeutet, dass sie über die gesamte Strecke des Grundwasserleiters bis zur Basis (Grundwassersohle) verfiltert sind. Aus der grundwassererfüllten Mächtigkeit kann somit die maximal erlaubte Absenkung im Brunnen abgeleitet werden. In der Praxis ist erkennbar, dass Brunnen teilweise unvollkommen ausgebaut sind, da weniger Fördervolumen für die Deckung der Heizlast ausreicht und der Brunnen nicht tiefer ausgebaut werden musste, um die notwendige Wassermenge abpumpen zu können und so Kosten gespart werden. Diese Umsetzung wird durch die Annahme des vollkommen ausgebauten Brunnens in der Potenzialanalyse abgedeckt, da mit einem vollkommen ausgebauten Brunnen mehr Volumen gefördert werden kann.

Die zweite Beschränkung betrifft die Wiedereinleitung des Grundwassers über den Schluckbrunnen. Im Gegensatz zum Förderbrunnen wird hier ein **Aufstau des Grundwassers** hervorgerufen. Bei einer nachhaltigen Wiedereinleitung soll verhindert werden, dass der Aufstau im Extremfall bis an die Geländeoberfläche reicht und dort zu Überflutungen führt. Als Grenzwert für den maximalen Aufstau wurde ein Sicherheitsabstand von 0,5 m zur Geländeoberkante festgesetzt.

Die dritte Beschränkung betrifft die **thermische Beeinflussung der beiden Brunnen untereinander**. Die Brunnen sind typischerweise entsprechend der natürlichen Grundwasserfließrichtung so angeordnet, dass der Förderbrunnen im Anstrom liegt, um das Wasser zu entnehmen, und der Schluckbrunnen im Grundwasserabstrom liegt, um das thermisch veränderte Wasser wieder einzuleiten (z. B. VDI 4640). Hierbei entsteht um den Schluckbrunnen im Grundwasserleiter eine Temperaturanomalie, die sich abhängig vom Betrieb der Anlage und den hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes unterschiedlich ausbreitet. Für eine nachhaltige effiziente Nutzung der Anlage darf das eingeleitete Wasser nicht in signifikanter Menge wieder zurück zum Förderbrunnen strömen, da so das thermisch veränderte Wasser erneut in den Wärmetauscher gelangen und dort sukzessive weiter abgekühlt würde. Dieser Prozess wird thermischer Kurzschluss genannt. Dieser verringert die Effizienz der Wärmepumpe und kann im Extremfall zum Einfrieren des Wärmetauschers führen. Im nachhaltigen Betrieb wird die Temperaturanomalie im Grundwasserleiter entlang der natürlichen Fließrichtung transportiert und nimmt in ihrer Intensität durch verschiedene Wärmetransportprozesse im porösen Medium kontinuierlich ab. Die im Heizfall mit einer Grundwasserwärmepumpe so entstehende Kältefahne erreicht demnach bei einer hydraulisch sinnvollen Anordnung der Brunnen nicht den im Zustrom gelegenen Förderbrunnen. Um einen thermischen Kurzschluss zwischen den Brunnen zu vermeiden, wird der hydraulische Kurzschluss (d.h. dass infiltriertes Wasser am Schluckbrunnen den Pumpbrunnen erreicht) in der Methode ausgeschlossen. Dies ist ebenfalls eine konservative Annahme, da durch bestimmte Transport- und Speicherprozesse der Wärmetransport gegenüber dem rein hydraulischen „Wassertransport“ verzögert stattfindet (thermische Retardation). Diese Annahme schließt aus, dass bei den in der Potenzialanalyse betrachteten Fällen auch bei maximaler Entnahme und Wiedereinleitung Wasser vom Schluckbrunnen zum Förderbrunnen fließt.

Allgemein gilt, dass je größer der Abstand der beiden Brunnen gewählt wird, umso größer kann die maximal mögliche Fördermenge werden, da die Gefahr eines thermischen Kurzschlusses sinkt.

Andererseits wird das Grundwasser mit höheren Entnahmeraten am Förderbrunnen stärker abgesenkt bzw. erhöht sich der Grundwasseraufstau am Injektionsbrunnen. Die Optimierung bzw. Grenzwerte dieses Zusammenspiels wurden in der TAP-Methode über numerische Simulationen ermittelt und unter Berücksichtigung der hydraulischen Rahmenbedingungen und unterschiedlichen Fördervolumen und Brunnenabständen abgebildet. Anzumerken ist, dass in der praktischen Umsetzung generell gilt, dass ein Mindestabstand von 10 m zwischen Förder- und Schluckbrunnen eingehalten wird (freundliche, mündliche Mitteilung von Planungs- und Bohrfirmen).

6.3.2 Beschreibung der Datengrundlage

Für die Potenzialanalyse zur thermischen Grundwassernutzung werden die in der oben beschriebenen TAP-Methode relevanten, hydrogeologischen Grundlagendaten ermittelt: Benötigt werden der Flurabstand, die grundwassererfüllte Mächtigkeit, die Grundwasserfließrichtung, der hydraulische Gradient sowie die hydraulische Durchlässigkeit. Für die flurstückbezogene Berechnung des Potenzials (Anwendung für das Mischpult) werden darüber hinaus aus dem ALKIS-Datensatz der Geobasisdaten die Flurstückkarte mit Gebäudeumrissen verwendet, um die Brunnenpositionen auf dem Flurstück zu bestimmen. Berücksichtigt wird hier der geforderte Mindestabstand von 3 m zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen.

Nicht alle Gebiete sind für thermische Grundwassernutzung aus genehmigungsrechtlichen oder technischen Aspekten geeignet. Daher werden vor der Zusammenstellung der Datengrundlage zunächst Ausschluss- und Eignungsgebiete geprüft und festgelegt.

6.3.2.1 Prüfung der Ausschlussgebiete und Ausweisung von Eignungsgebieten

Ausschlussgebiete

Wie in Abschnitt 6.2 mit Abbildung 17 beschrieben dürfen in durch den rechtlichen Rahmen vorgegebenen Ausschlussgebieten keine Anlagen installiert werden. Dies gilt insbesondere für Einschränkungen durch Wasserschutzgebiete und wassersensible Gebiete, in denen eine thermische Nutzung des Grundwassers grundsätzlich nicht genehmigungsfähig ist. Dazu kommen Gebiete mit artesisch gespanntem Grundwasser, in denen eine Bohrung in Bayern ebenfalls nicht zulässig ist. Die Ausschlussgebiete wurden vom LfU bestimmt und zur Verfügung gestellt.

Eine Beschränkung durch Bohrtiefenbegrenzungen spielt bei der Nutzung von Grundwasserwärmepumpen nur insofern eine Rolle, als ein Potenzial in solchen Gebieten ausgewiesen wird, die vom LfU als geeignet gekennzeichnet wurden (siehe nächster Absatz). In diesen Gebieten darf bis in den ersten Grundwasserleiter gebohrt werden. Das angegebene Potenzial bezieht sich immer auf die grundwassererfüllte Mächtigkeit des ersten oberflächennahen Grundwasserleiters. Damit wird für die Analyse ausgeschlossen, dass für das berechnete Potenzial der erste Grundwassergeringleiter (Basis des Grundwasserleiters) durchbohrt werden muss. Die Bohrtiefenbegrenzung ist demnach durch das Umsetzungskonzept berücksichtigt.

Eignungsgebiete

Prinzipiell geeignet sind Gebiete mit quartärem Grundwasserleiter. Die vom LfU bereitgestellte, räumliche Information über diese Gebiete wurde in diesem Sinne mit der Digitalen Hydrogeologischen Karte dHK100 abgeglichen. Dabei wurde festgestellt, dass in einigen Bereichen die Erfassung von geeigneten Gebieten mit quartären Grundwasserleitern nicht vollständig war. Daher wurden diese Bereiche anhand von geologisch plausiblen Kriterien durch die TUM erweitert (siehe Abbildung 19).

Wie bereits angemerkt lässt sich außerhalb dieser Eignungsgebiete in der vorliegenden Analyse kein quantitatives Potenzial angeben. Bei lokal vorhandenen oder oberflächennahen, tertiären Grundwasservorkommen oder auch in speziellen Karstgebieten besteht in Einzelfällen aber dennoch die Möglichkeit, die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen zu prüfen. In der Praxis sind lokal auch einzelne Grundwasserwärmepumpen-Anlagen in den nicht geeigneten Gebieten vorhanden (und im UmweltAtlas Bayern (LfU 2023) auch ersichtlich). Ein flächendeckendes Potenzial ist in diesen Gebieten aber in dem hier zugrundeliegenden Bearbeitungsmaßstab nicht ausweisbar. Aus diesem Grund wird empfohlen, in den als nicht geeigneten Gebieten ausgewiesenen Flächen bei der Potenzialangabe zu erwähnen, dass lokal begrenzt dennoch die Umsetzung für Grundwasserwärmepumpen möglich sein kann.

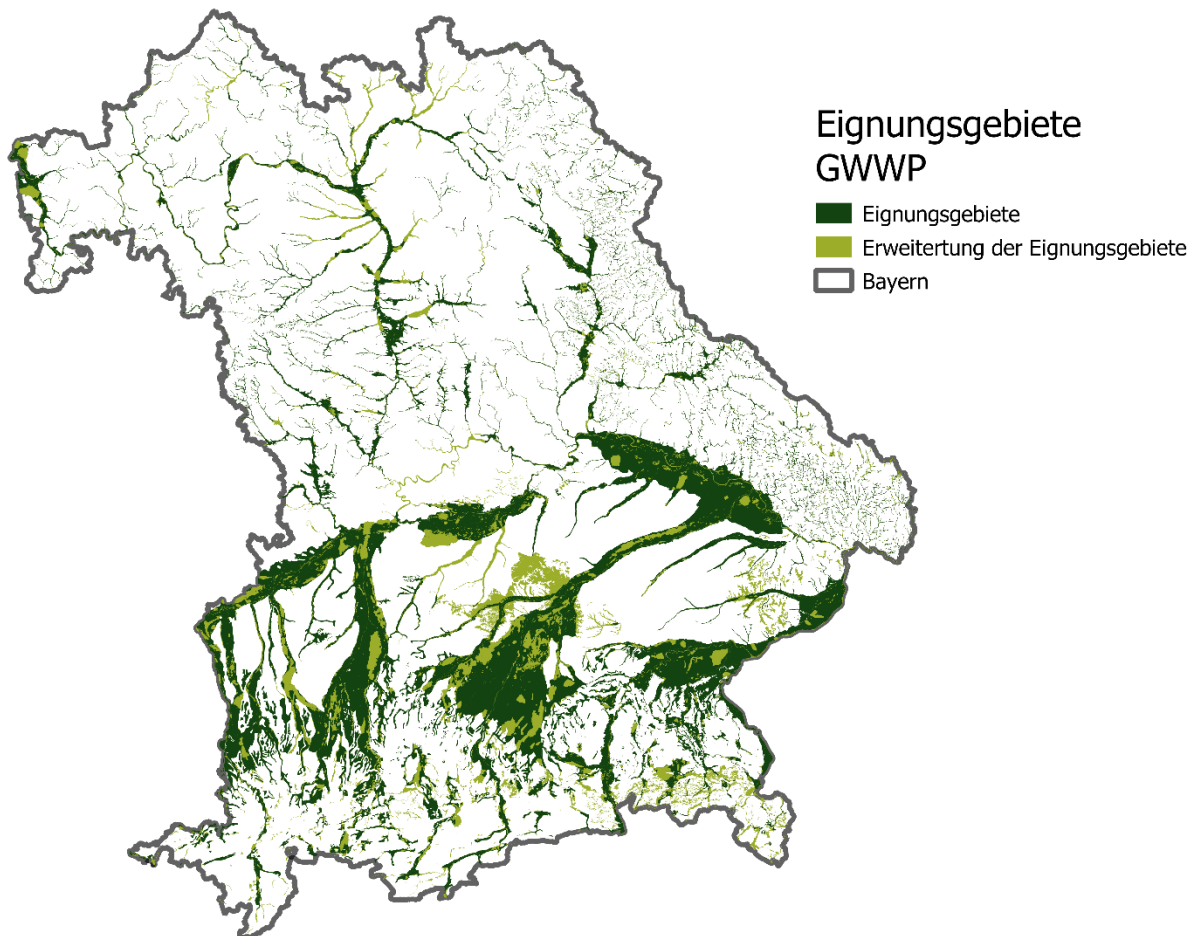


Abbildung 19: Karte der Gebiete, die für eine Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet sind (LfU Bayern und Erweiterungen aus dHK100)

6.3.2.2 Grundwasserfließrichtung und hydraulischer Gradient

Die Grundwasserfließrichtung und der hydraulische Gradient werden idealerweise aus vorhandenen, detaillierten (lokalen) Grundwassergleichenplänen bestimmt. Diese sind in einigen Räumen aus regionalen Studien in großmaßstäbigen Detailkarten verfügbar. Für einen Großteil Bayerns sind diese Informationen in einem gröberen Maßstab in der Digitalen Hydrogeologischen Karte dHK100 (Quelle: LfU) enthalten und wurden um einige zusätzliche Gebiete aus der Digitalen Hydrogeologischen Karten dHK500 (Quelle: LfU) erweitert.

Für die Gebiete, für die kein Grundwassergleichenplan von Seiten des LfU zur Verfügung stand (siehe Abbildung 20) und auch keine Detailstudien der TUM vorlagen, wurden Grundwasserfließrichtung und hydraulischer Gradient approximativ aus dem Digitalen Geländemodell DGM 5 mit einer Auflösung von 5 m x 5 m bestimmt. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass die Fließbewegung des

Grundwassers im Einzugsbereich von Flüssen oberflächennah mehr oder weniger dem Geländere relief folgt und sich die Potenziale der oberflächennahen Grundwasserleiter in den quartären Schottern in den ausgewiesenen Eignungsgebieten (siehe Abschnitt 6.3.2.1) danach orientieren. Dies stellt natürlich eine starke Approximation dar und wird ebenfalls in der Beurteilung der Datenqualität aufgegriffen, in dem Sinne, dass diese Bereiche Gebiete mit niedriger Datenqualität darstellen und damit eine höhere Unsicherheit in den ausgewiesenen Potenzialen für die oberflächennahe Geothermie aufweisen.

Die **Grundwasserfließrichtung** unterliegt keinerlei richtungsgebundenen Einschränkungen. Ihr Wertebereich ist $[0^\circ; 360^\circ]$.

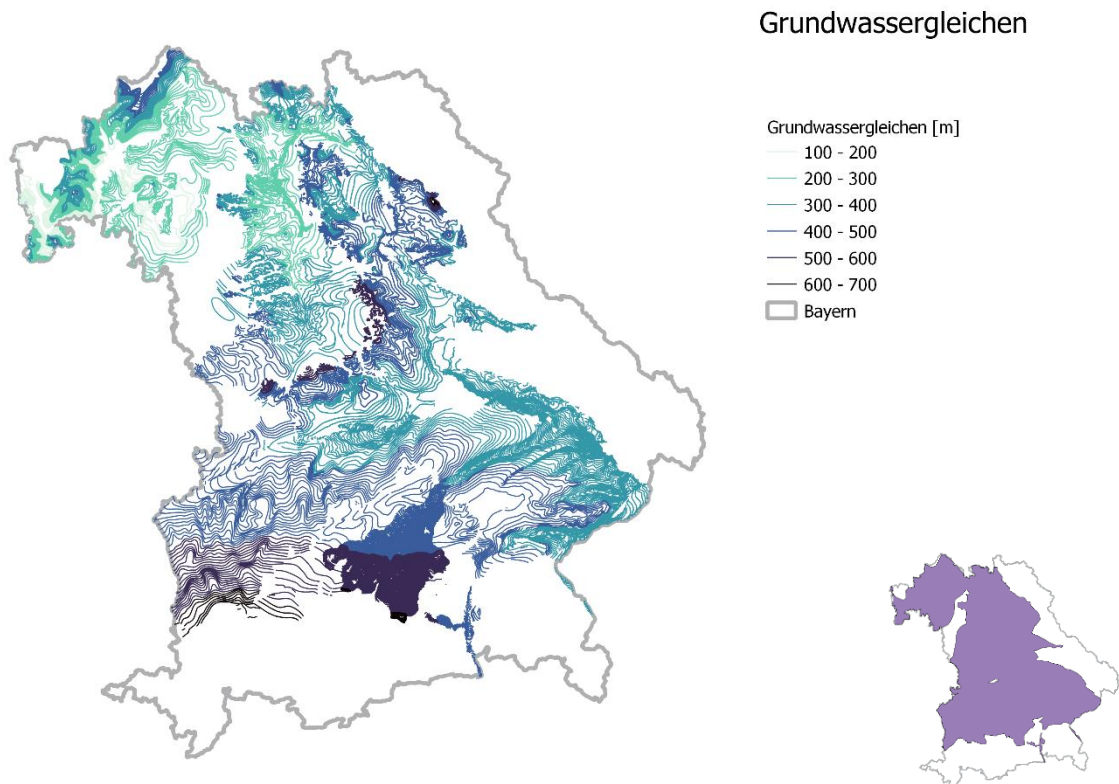


Abbildung 20: Karte der verfügbaren Grundwassergleichen; unten rechts: Überblick über Gebiete, in denen Grundwassergleichen verfügbar sind

Der **hydraulische Gradient** wird aus den Grundwassergleichenplänen über einfache Berechnungsalgorithmen in GIS-Prozeduren abgeleitet. Ein hydraulischer Gradient von 0,01 entspricht einem Gefälle von 1 %. Im Gegensatz zum Geländere relief, wie es im DGM 5 m x 5 m vorliegt, kommen in Grundwasserleitern Gefälle von über 1 % natürlicherweise nicht vor. In der Regel liegt der hydraulische Gradient im Promillebereich. Für die Eingangsdaten wurde der hydraulische Gradient daher in den Bereichen, in denen keine Grundwassergleichenpläne vorlagen und das Gefälle über das DGM abgeschätzt werden musste, aus Plausibilitätsgründen auf den Maximalwert von 0,01 begrenzt. Der Wertebereich ist demnach $[0; 0,01]$.

6.3.2.3 Grundwassererfüllte Mächtigkeit

Die grundwassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters konnte nur für einige wenige Gebiete (siehe Abbildung 21) explizit ermittelt werden (teilweise Detailstudien der TUM) und unterliegt daher in der bayernweiten Analyse einer hohen Unsicherheit. Generell wird sie berechnet als der Abstand

zwischen der Grundwasserhöhe aus den bestehenden Grundwassergleichenplänen und der Höhe der Basis des Grundwasserleiters (Grundwassersohle), hier generell gleichzusetzen mit der Quartärbasis:

$$M = h_{\text{gwgl}} - h_{\text{qbase}} \quad (1)$$

wobei

M	m	Grundwassererfüllte Mächtigkeit
h_{gwgl}	m	Grundwasserhöhe (Grundwassergleichen)
h_{qbase}	m	Höhe der Grundwasserleiterbasis



Abbildung 21: Karte der Gebiete, für die genaue Daten zur Quartärbasis vorliegen; von Nord nach Süd: Main-Regnitz, Donau, Donauquartär und Isar, Vils, Inn, Münchener Schotterebene und Illertal.

Für die Bereiche, in denen nicht die Basis des relevanten Grundwasserleiters bzw. keine Grundwassergleichen vorlagen, musste die grundwassererfüllte Mächtigkeit mit Informationen aus dem Bodeninformationssystem (BIS) grob abgeschätzt werden. Hierfür wurden Daten aus dem BIS von Brunnen bzw. Messstellen verwendet, welche punktuell neben der Höhe der Geländeoberkante und der Ansatzhöhe der Messung auch oftmals eine Grundwasserhöhe sowie die Endteufe der Bohrung beinhalten. Daraus wurde approximativ die grundwassererfüllte Mächtigkeit je Brunnen berechnet mit:

$$M = h_{\text{gwgl}} - h_{\text{ansatz}} - h_{T_{\text{max}}} \quad (2)$$

wobei

M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
h_{gwgl}	m	Grundwasserhöhe (BIS-Brunnen)
$h_{T_{\text{max}}}$	m	Endteufe
h_{ansatz}	m	Ansatzhöhe

BIS-Brunnen

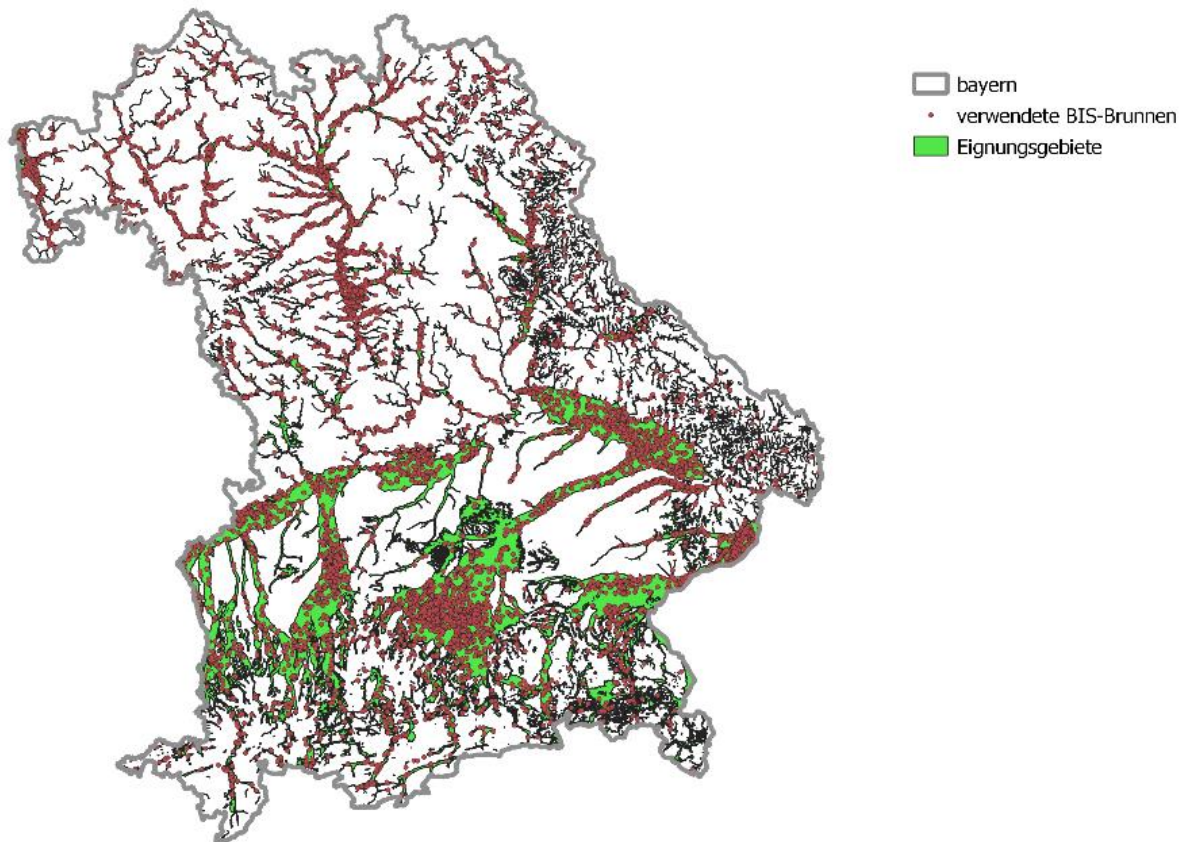


Abbildung 22: Karte mit Gebieten, die für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen geeignet sind; eingezeichnet sind auch alle Brunnen aus dem Bodeninformationssystem (BIS), die für die Abschätzung von Grundwassermächtigkeit und Flurabstand in Gebieten verwendet wurden, in denen keine Grundwassergleichenpläne vorlagen.

Verwendet wurden dabei alle Brunnen, die in den Eignungsgebieten für Grundwasserwärmepumpen inklusive eines Puffers von 100 m liegen und nicht bis ins Tertiär oder tiefer (Tiefengrundwasserbrunnen) reichen (siehe Abbildung 22). Der Puffer wurde eingeführt, da auch die Kartengrundlage eine maßstabsbedingte Ungenauigkeit aufweist und umgesetzte Brunnen am Rand des kartierten Umrisses des Grundwasserleiters mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in diesem Grundwasserleiter abgeteuft sind. Ziel war es auch, möglichst viele Datenpunkte (Brunnen, Messstellen) zu integrieren, um eine bessere Abdeckung für die Mittelwertbildung zu erhalten. Für jeweils zusammenhängende Gebiete wurde dann die grundwassererfüllte Mächtigkeit als Mittelwert (Medianwert) der grundwassererfüllten Mächtigkeit aller im gepufferten Gebiet liegender Brunnen abgeschätzt. Dabei wurde wiederum vereinfacht angenommen, dass die Brunnen stets bis zur Basis des Grundwasserleiters gebohrt wurden. Diese Vorgehensweise ist zwar mit entsprechend großen Unsicherheiten behaftet, ermöglicht aber eine Abschätzung der für die Potenzialberechnung benötigten grundwassererfüllten Mächtigkeit auch in Gebieten, in denen weder Quartärbasis noch Grundwassergleichen in einem verwendbaren Maßstab vorliegen. Es ist zu erwähnen, dass wahrscheinlich auf dem lokalen Maßstab detailliertere Daten für Teilbereiche dieser Gebiete vorliegen können. Im vorliegenden Projektvolumen war es aber nicht geplant, die Recherchen nach diesen Daten sowie ihre Aufbereitung und Qualitätskontrolle durchzuführen. Möglicherweise vorhandene Daten konnten daher nicht in die bayernweite Analyse integriert werden.

Abbildung 23 zeigt die ermittelte grundwassererfüllte Mächtigkeit für die relevanten Flächen in ganz Bayern.

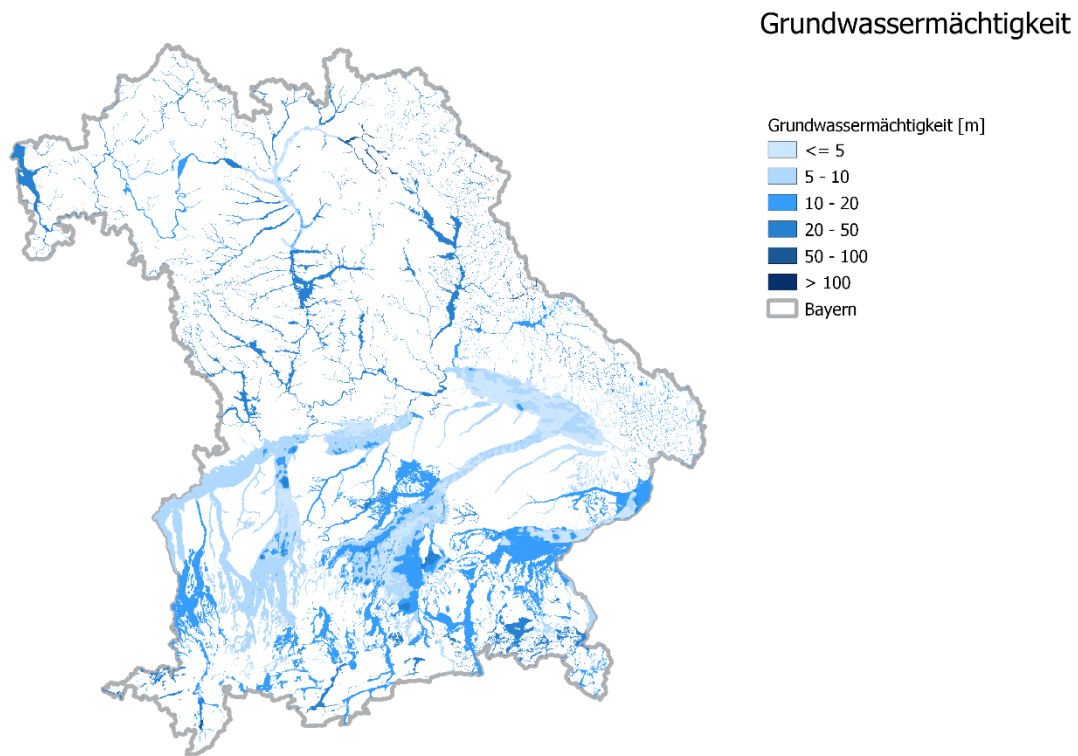


Abbildung 23: Karte der erhobenen grundwassererfüllten Mächtigkeit in den relevanten Grundwasserleitern in Bayern.

Generell ist zu erwähnen, wie oben bereits angemerkt, dass für die Potenzialabschätzung der thermischen Grundwassernutzung nach dem Prinzip der konservativen Annahmen eine grundwassererfüllte Mächtigkeit bei niedrigem Grundwasserstand anzusetzen ist. Dies ist für Teilbereiche mit verfügbaren Detaildaten (z. B. Münchener Schotterebene) gegeben, konnte aber aufgrund der begrenzten bayernweiten Datenverfügbarkeit (der Grundwassergleichen) und der notwendigen angewandten Approximation zur bayernweiten Ermittlung nicht flächendeckend umgesetzt werden. Auch aus diesem Grund wurde eine Abschätzung der Unsicherheit zu den Datengrundlagen mit angefertigt und als Karte mit entsprechender Legende zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 6.3.2.8).

6.3.2.4 Flurabstand

Der Flurabstand bezeichnet den senkrechten Abstand zwischen Geländeoberkante und der Grundwasseroberfläche, in diesem Fall erstellt aus den verfügbaren Grundwassergleichenplänen. Er kann in Gebieten, in denen Grundwassergleichen vorliegen mit folgender Formel berechnet werden:

$$s = dgm - h_{\text{gwgl}} \quad (3)$$

wobei

s	m	Flurabstand
dgm	m	Digitale Geländehöhe
h_{gwgl}	m	Grundwasserhöhe (Höhe der Grundwassergleichen)

Außerhalb dieser Gebiete, in denen Grundwassergleichen vorliegen, musste analog zur Abschätzung der grundwassererfüllten Mächtigkeit (siehe Abschnitt 6.3.2.3) auch der Flurabstand mit Hilfe von

Brunnen- und Messstellendaten aus dem BIS abgeschätzt werden. Dazu wurde der Flurabstand für die gewählten Brunnen berechnet mit:

$$s = dgm - h_{BIS} \quad (4)$$

wobei

s	m	Flurabstand
dgm	m	Digitale Geländehöhe
h_{BIS}	m	Grundwasserhöhe (Grundwasserstand in Brunnen/Messstellen)

Anschließend wurde wiederum, analog zum Vorgehen bei der grundwassererfüllten Mächtigkeit, ein Mittelwert (Median) über die so ermittelten Flurabstände in den zusammenhängenden Eignungsgebieten gebildet. Abbildung 24 zeigt den ermittelten Flurabstand für die betrachteten Grundwasserleiter in ganz Bayern.

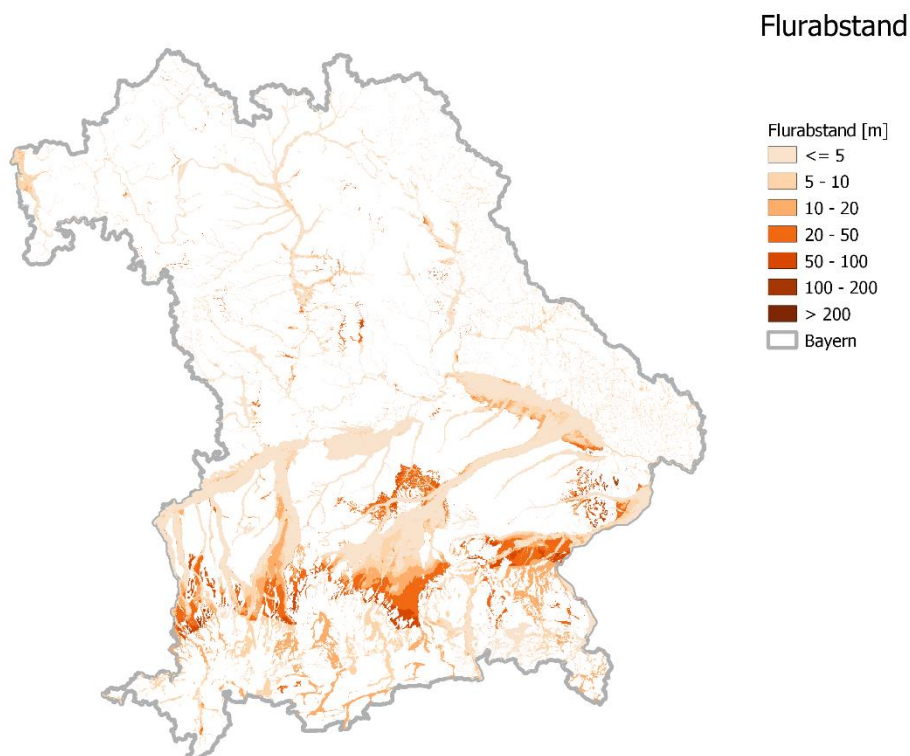


Abbildung 24: Karte der Flurabstände

6.3.2.5 Hydraulische Durchlässigkeit

Die hydraulische Durchlässigkeit (kf-Wert) beschreibt die Eigenschaft, wie stark Gesteine und Böden von Wasser durchströmt werden können. Sie variiert zwischen 10^{-9} m/s für äußerst geringe und 10^{-2} m/s für sehr hohe Durchlässigkeit. Die kf-Werte liegen als Mittelwerte bezogen auf die definierten Grundwasserleiter für ganz Bayern aus der HUEK250 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vor (Abbildung 25) und wurden, wenn keine detaillierteren Grundlagen vorhanden waren, dementsprechend zugewiesen. In der Realität variiert die hydraulische Durchlässigkeit im Grundwasserleiter gemäß der Heterogenität der lithologischen Zusammensetzung in typischen Spannweiten. In einigen wenigen Grundwasserleitergebieten lagen Informationen über räumlich variierende hydraulische Durchlässigkeiten vor und wurden dort für die Potenzialanalyse zur

genaueren Spezifikation verwendet (Detailstudien TUM und LfU: Münchener Schotterebene, Donautal-Niederbayern, Illertal). Die Zuweisung von Mittelwerten entspricht wiederum einer signifikanten Approximation der realen Verhältnisse, denn die hydraulische Durchlässigkeit kann sich lokal deutlich ändern.

6.3.2.6 Wertebereiche

In Tabelle 15 werden zusammenfassend die bayernweit auftretenden Wertebereiche für die verschiedenen relevanten Parameter aufgelistet.

Tabelle 15: Bayernweite Wertebereiche aller Parameter

Parameter	Einheit	Min	Max
		bayernweit	
Grundwasserfließrichtung	°	0°	360°
Hydraulischer Gradient		0	0,01
Grundwassererfüllte Mächtigkeit	m	0	120
Flurabstand	m	0	125
Hydraulische Durchlässigkeit	m/s	10^{-9}	10^{-1}

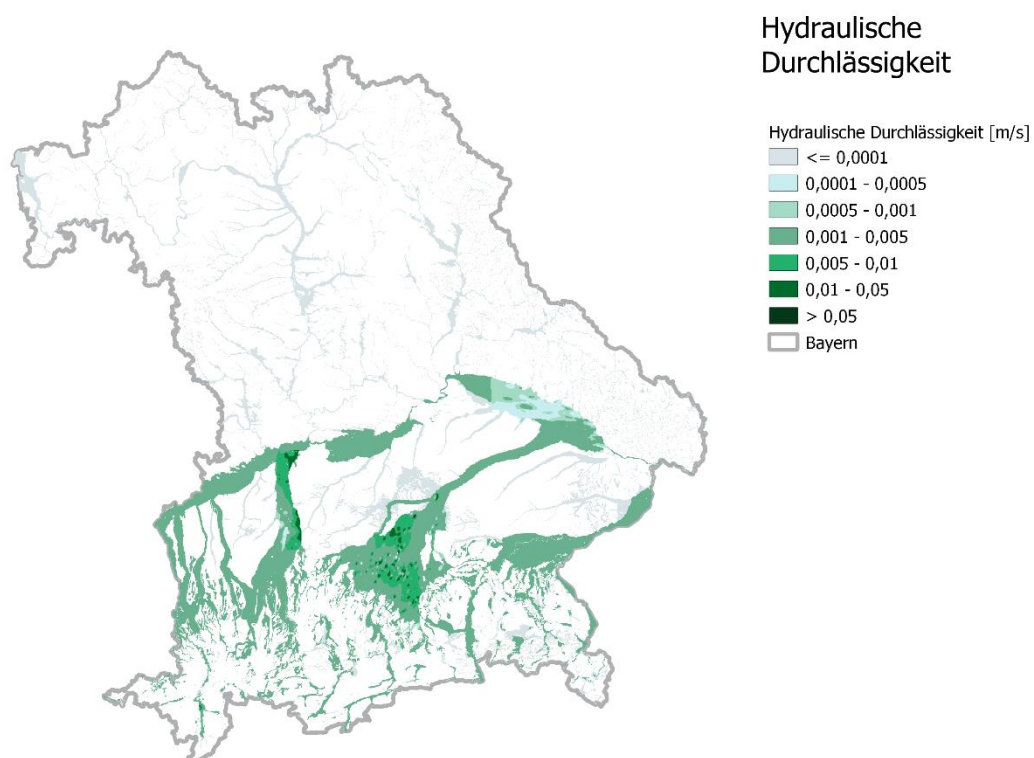


Abbildung 25: Karte der Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit für die relevanten Grundwasserleiter in Bayern.

6.3.2.7 Flussdiagramm der Datenaufbereitung

Abbildung 26 zeigt in einem Flussdiagramm die Zusammenhänge der Datenaufbereitung.

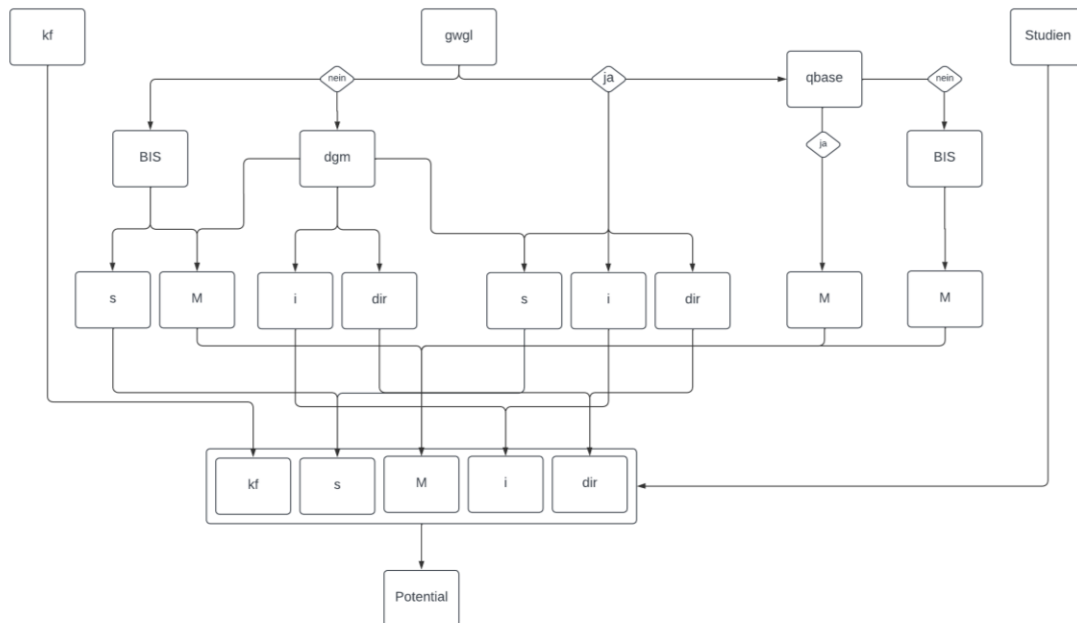


Abbildung 26: Flussdiagramm zur Datenaufbereitung. Die Felder beziehen sich auf die oben beschriebenen Datensätze. Es bedeuten kf: hydraulische Durchlässigkeit, gwgl: Grundwassergleichen, qbase: Quartärbasis, BIS: Daten aus dem Bodeninformationssystem, dgm: Digitales Geländemodell, s: Flurabstand, M: grundwassererfüllte Mächtigkeit, i: hydraulischer Gradient, dir: Grundwasserrichtung, Studien: Daten aus den Studienarbeiten der TUM, Potenzial: geothermisches Potenzial für Grundwasserwärmepumpen

6.3.2.8 Qualitätsebenen

Wie bereits in den vorherigen Beschreibungen angedeutet, liegen Daten zur Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in unterschiedlichen Formaten, Ausdehnungen und Auflösungen, sprich in unterschiedlicher Qualität zur Abschätzung des Potentials vor. Die hydraulische Durchlässigkeit (kf-Wert) beispielsweise steht in großem Maße bayernweit nur über großflächige Mittelwerte zur Verfügung. Andere grundwasserbezogene Parameter müssen aus verschiedenen Datensätzen abgeleitet werden. Es wurde in der vorliegenden Studie versucht, die sich daraus ergebenen unterschiedlichen Eingangsdaten und daraus resultierenden Ergebnisse aufzuzeigen und qualitativ zu beurteilen. Die daraus resultierende Bewertung ist im Folgenden kurz erläutert und in Abbildung 27 ersichtlich:

- Datengüte „Sehr gut“: Für Grundwasserwärmepumpen liegt die höchste Qualität in einigen räumlich begrenzten Gebieten vor, für die in früheren Einzelstudien an der TUM bereits Detailanalysen durchgeführt wurden. Dazu gehören die Ergebnisse aus den Projekten GEPO für die Münchener Schotterebene und GRETA für den Raum Sonthofen/Allgäu sowie aus Masterarbeiten am Lehrstuhl Hydrogeologie (z. B. Donauquartär Niederbayern).
- Datengüte „Gut“: Für weitere, große Bereiche konnte das Potenzial direkt aus den geologischen und hydrogeologischen Eingangsdaten berechnet werden.
- Datengüte „Mittel“: Für Gebiete, in denen keine detaillierten Daten z. B. Grundwassergleichenpläne oder Daten zur grundwassererfüllten Mächtigkeit vorlagen, wurde das Potenzial mit Hilfe von auf Literaturwerten basierenden, geeigneten, konservativen Hintergrundannahmen und Mittelwerten aus Brunnendaten ermittelt.

- Außerhalb der ausgewiesenen Eignungsgebiete für Grundwasserwärmepumpen ist keine quantitative Potenzialangabe möglich, in Ausschlussgebieten ist eine Installation grundsätzlich nicht erlaubt.

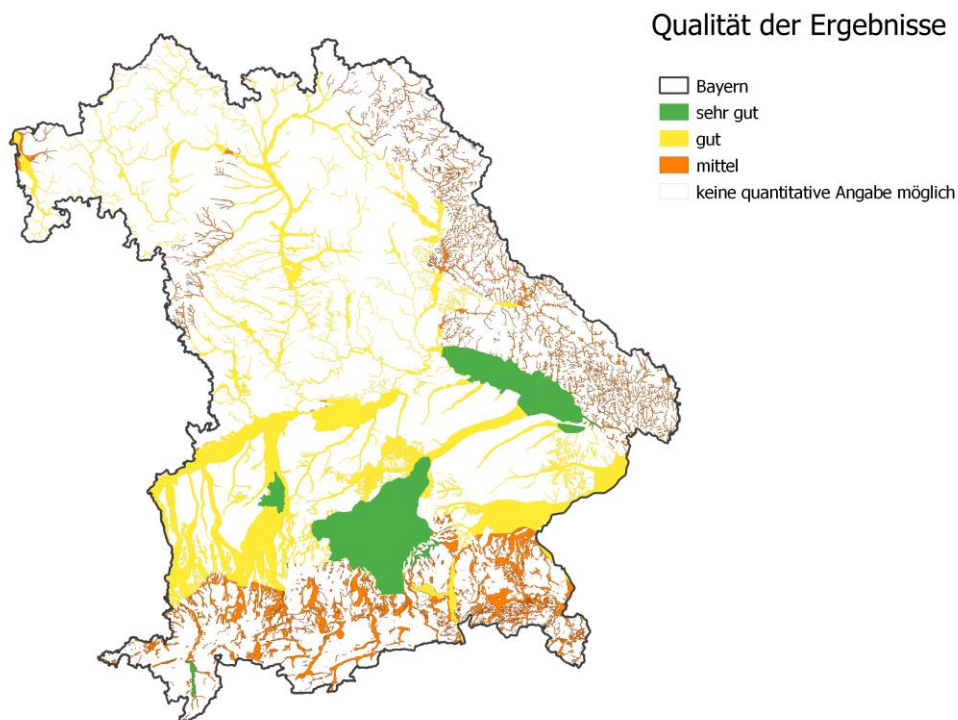


Abbildung 27: Karte der verschiedenen Qualitätsebenen der Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Qualitäten in den Eingangsdaten

6.3.3 Flurstückbezogene Berechnung des Potenzials (Anwendung für das Mischpult)

Nach Zusammenstellung der Eingangsdaten kann nun mit Hilfe der TAP-Methode (siehe Abschnitt 6.3.1) ein flurstückbezogenes Potenzial berechnet werden. Zur Umsetzung wurde der folgende Ablauf gewählt:

- Brunnenpositionierung auf Flurstückbasis
- Quantifizierung der Beschränkungen der Entnahmemenge
 - (i) Beschränkung der Entnahmerate im Förderbrunnen, sodass eine maximale Absenkung des Grundwasserstands von einem Drittel der Grundwassermächtigkeit nicht überschritten wird
 - (ii) Beschränkung der Wiedereinleitung im Schluckbrunnen, sodass ein maximaler Aufstau des Grundwasserstands von 0,5 m unter Geländeoberkante nicht überschritten wird
 - (iii) Beschränkung des Volumenstroms im Brunnenpaar, sodass kein hydraulischer Kurzschluss zwischen den Brunnen zustande kommt
- Quantifizierung der maximal umsetzbaren Entnahmerate
- Berechnung der thermischen Entzugsleistung und Heizleistung

6.3.3.1 Brunnenpositionierung auf Flurstückbasis

Bei der flurstückbezogenen Analyse des Potenzials werden vor der eigentlichen Berechnung der Entzugs- und Heizleistung geeignete Brunnenstandorte in einer räumlichen Analyse definiert, um den maximal möglichen Brunnenabstand bestimmen zu können. Je weiter Förder- und Schluckbrunnen

auseinanderliegen können, desto geringer ist die Gefahr eines thermisch-hydraulischen Kurzschlusses und umso höher ist die mögliche Entnahmerate.

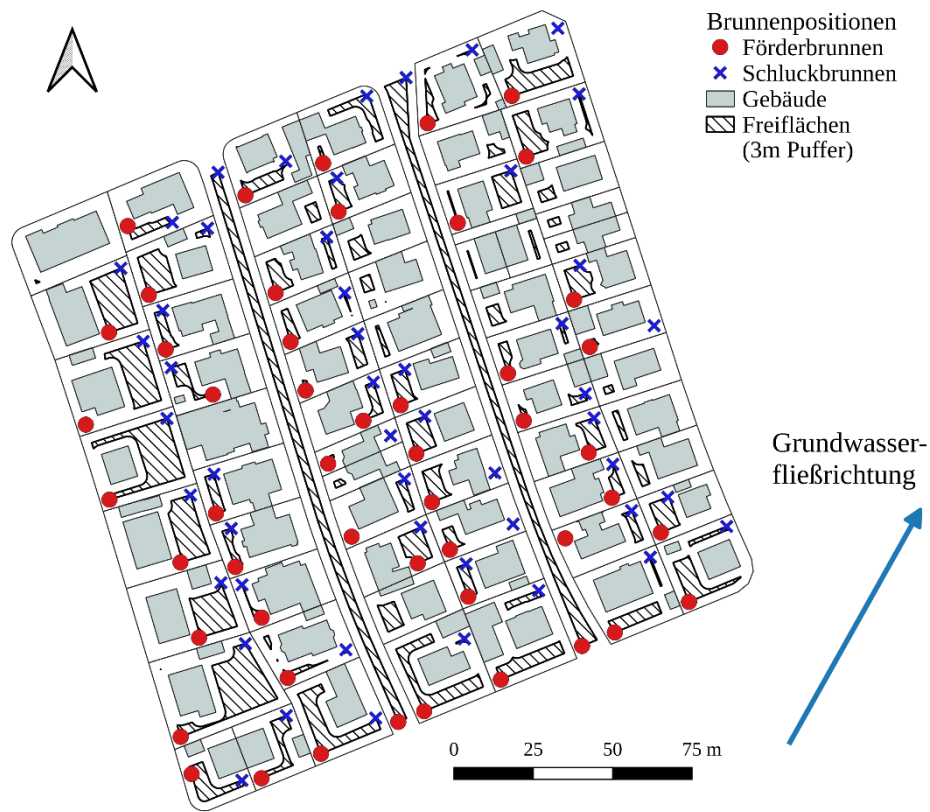


Abbildung 28: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Flurstücken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden und zur Flurstücksgrenze.

Zur Berechnung des maximal möglichen Abstands zwischen Förder- und Schluckbrunnen wird sowohl die Grundwasserfließrichtung zur Ausrichtung der Brunnen als auch das Einhalten von Abstandsflächen berücksichtigt. Zur Ausweisung von geeigneten Freiflächen für den Brunnenbau wird zunächst der in Bayern vorgeschriebene Mindestabstand von 3 m zu bestehenden Gebäuden und zur Grundstücksgrenze berücksichtigt (siehe Abbildung 28). Die übrigbleibenden Freiflächen werden anschließend genutzt, um den Förderbrunnen an dem am weitesten im Zustrom liegenden Punkt und den Schluckbrunnen an den am weitesten im Abstrom gelegenen Punkt zu setzen. Wenn der sich daraus ergebende Brunnenabstand unter den von den Behörden empfohlenen Abstand von 10 m liegt, wird das Brunnenpaar nicht weiter in der Potenzialanalyse berücksichtigt. Eine Optimierung bezüglich der Ausbildung von Kältefahnen bei der Nutzung von Grundwasserpotenzialen von benachbarten Grundstücken wurde dabei nicht vorgenommen (siehe hierfür ergänzende Informationen im Kapitel 10 Anhang).

6.3.3.2 Quantifizierung der Beschränkungen der Entnahmemenge

Auf Grundlage der Überlegungen aus der Beschreibung der TAP-Methode (siehe Abschnitt 6.3.1) lassen sich im Folgenden drei Gleichungen aufstellen, die die Einschränkungen der Entnahmerate, der Injektionsrate und des thermisch-hydraulischen Durchbruchs beschreiben.

i) Absenkung im Entnahmebrunnen

Gleichung (5) berechnet die Entnahmerate im Förderbrunnen bei einer maximalen Absenkung von einem Drittel der Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserleiters und der lokal vorherrschenden hydraulischen Leitfähigkeit.

$$V_1 = 0,195 k_f M^2 \quad (5)$$

wobei

V_1	m^3/s	Pumprate für den Absenkungsgrenzwert von $M/3$
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit

ii) Aufstau im Schluckbrunnen

Die Wiedereinleitung von Grundwasser darf nicht zu einem übermäßigen Anstieg des Grundwasserstands führen, der eine Überflutung der Oberfläche oder Keller zur Folge haben könnte. Der Grundwasserstand darf auf maximal 0,5 m unter der Geländeoberkante steigen (keine Oberflächenüberflutung). Daher wird eine maximale Injektionsrate ermittelt, die bestimmt wird durch die hydraulische Leitfähigkeit, den hydraulischen Gradienten und die Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserleiters. Dabei gilt

$$V_2 = (s - 0,5) k_f M^{0,798} e^{(29,9 i)} \quad (6)$$

wobei

V_2	m^3/s	Einleitrte für die Aufstaugrenze ($s - 0,5$)
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
s	m	Flurabstand
i	-	hydraulischer Gradient

iii) Hydraulischer Kurzschluss (bzw. Durchbruch)

Der Schluckbrunnen, der dem Entnahmebrunnen nachgeschaltet ist, führt das thermisch veränderte Wasser in den Grundwasserleiter zurück. Für eine effiziente Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ist es wesentlich, dass kein thermisch-hydraulischer Durchbruch zwischen Entnahme und Wiedereinleitung vorherrscht, da so ein nachhaltiger und effizienter Betrieb einer thermischen Grundwassernutzung nicht möglich wäre. Die Entnahmerate ist daher begrenzt und abhängig vom Brunnenabstand (siehe Abschnitt 6.3.3.1). Die maximale Fördermenge eines Brunnenpaares ohne hydraulischen Kurzschluss wird zusätzlich durch die Darcy-Geschwindigkeit und die grundwassererfüllte Mächtigkeit bestimmt. Dabei gilt

$$V_3 = \frac{\pi}{1,96} v_D M x_w \quad (7)$$

wobei

V_3	m^3/s	Entnahmerate ohne hydraulischen Kurzschluss
v_D	m/s	Darcy-Geschwindigkeit
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
x_w	m	Abstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen

Die enthaltene Darcy-Geschwindigkeit des Grundwassers ist definiert als:

$$v_D = k_f i \quad (8)$$

wobei

k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
i	-	hydraulischer Gradient

6.3.3.3 Abschätzung der maximal umsetzbaren Entnahmerate

Die drei berechneten Volumenströme im Brunnenpaar wurden in einem abschließenden Schritt in der maximal umsetzbaren Entnahmerate zusammengeführt. Dabei bestimmt der minimale Volumenstrom als dominanter, beschränkender Faktor die maximal umsetzbare Entnahmerate. Dabei gilt:

$$V_{max} = \min(V_1, V_2, V_3) \quad (9)$$

wobei

V_{max}	m^3/s	maximal umsetzbare Entnahmerate
V_1	m^3/s	Pumprate für den Absenkungsgrenzwert von $M/3$
V_2	m^3/s	Einleitrage für die Aufstaugrenze ($s = 0,5$)
V_3	m^3/s	Entnahmerate ohne hydraulischen Kurzschluss

6.3.3.4 Berechnung der thermischen Entzugsleistung und Heizleistung

Mit der maximal umsetzbaren Entnahmerate wurde anschließend die thermische Leistung innerhalb der rechtlich zulässigen Temperaturspreizung für thermische Grundwassernutzungen (in Bayern in einer konservativen Annahme in der Regel 5 K (im Vergleich 6K nach VDI 4640)) berechnet. Die Berechnung der Entzugsleistung mittels zulässiger Temperaturspreizung ermöglicht eine Abschätzung des Potenzials unabhängig von der tatsächlich vorliegenden Grundwassertemperatur. Bei der Anlageninstallation müssen jedoch zusätzlich absolute Mindest- und Höchsttemperaturen von 4 °C bzw. 20 °C berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass weder die Anlage einfriert noch das Grundwasser durch zu hohe Temperaturen des wieder eingeleiteten Wassers belastet wird (z. B. VDI 4640/2). Es gilt:

$$P_{th} = V_{max} \cdot c_{pw} \cdot \rho_w \cdot \Delta T \quad (10)$$

wobei

P_{th}	W	Thermische Entzugsleistung
V_{max}	m^3/s	Technisch umsetzbare Entnahmerate
c_{pw}	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
ρ_w	kg/m^3	Dichte von Wasser
ΔT	K	maximale Temperaturspreizung

Nach VDI 4640, Blatt 2 kann mit Gleichung (10) und der spezifischen Wärmekapazität von 4.187 J/(kg K) von Wasser bei konstantem Druck und 10 °C die Verdampferleistung einer Wasser-/Wasser-Wärmepumpe abgeschätzt werden. Somit wird zur Berechnung der finalen Heizleistung, die eine Wärmepumpe im Heizkreis bereitstellen kann, lediglich noch eine näherungsweise Abschätzung der durchschnittlichen Effizienz benötigt. Die Abschätzung erfolgt über die Jahresarbeitszahl (JAZ). Die Jahresarbeitszahl gibt das Verhältnis der über das Jahr vom Gesamtsystem abgegebenen Heizenergie zur aufgenommenen elektrischen Energie an und beinhaltet den zusätzlichen Energieaufwand für die Nebenantriebe der geothermischen Anlage. Die tatsächliche Grundwassertemperatur wird somit zur Abschätzung der Heizleistung nicht benötigt.

Damit ergibt sich die durchschnittliche Heizleistung aus:

$$P_t = \frac{P_{th}}{1 - \frac{1}{JAZ}} \quad (11)$$

wobei

P_{th}	W	Thermische Entzugsleistung
P_t	W	Durchschnittliche Heizleistung
JAZ	-	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

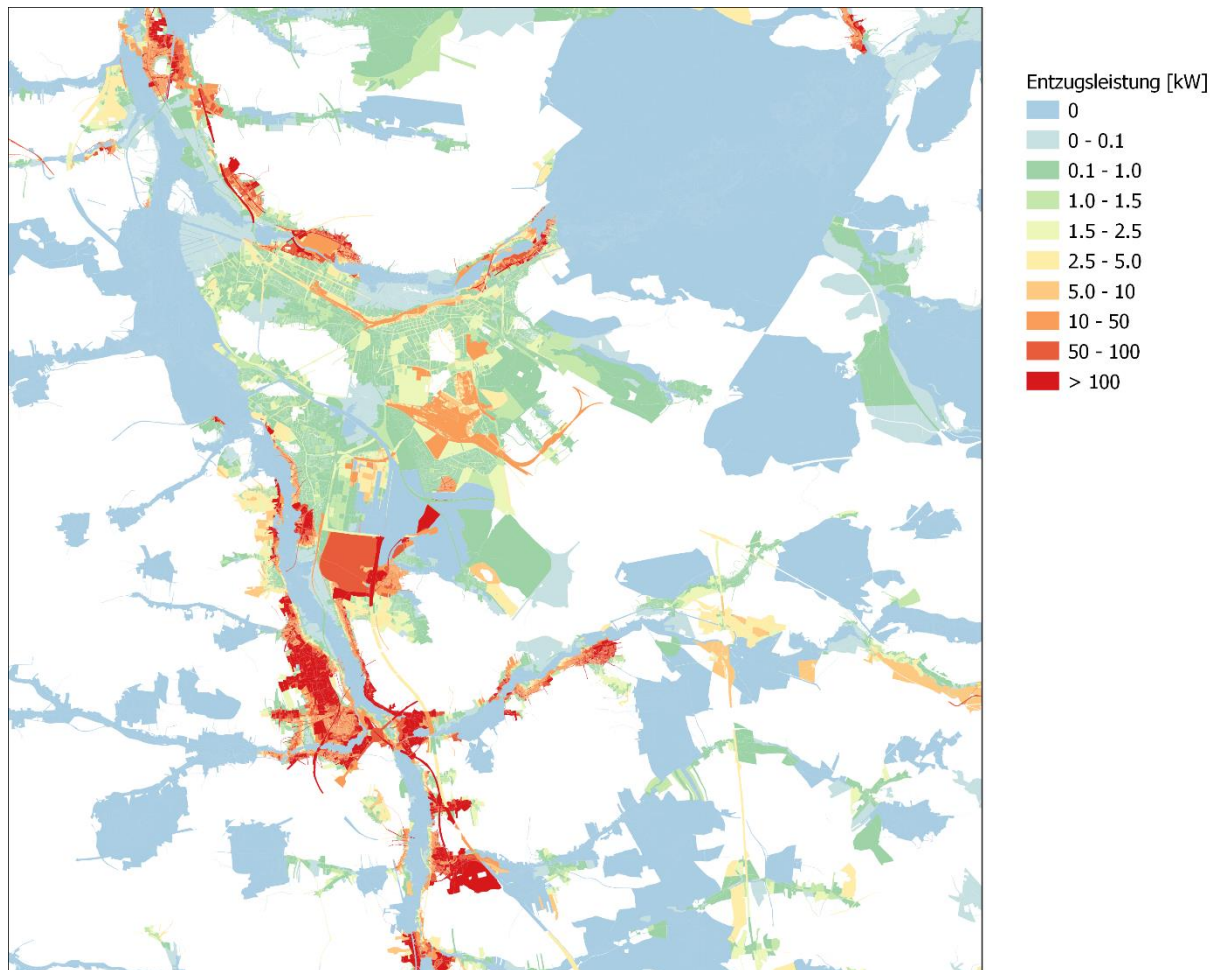


Abbildung 29: Entzugsleistung [kW] je Flurstück im Raum Nürnberg. Außerhalb der dargestellten Eignungsgebiete (in den weißen Flächen) lässt sich kein quantitatives Potenzial angeben. Lokal besteht in Einzelfällen aber dennoch die Möglichkeit, die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen zu prüfen.

Im Rahmen dieser Studie wird für die Jahresarbeitszahl ein Erfahrungswert aus der Praxis mit $JAZ = 4$ entsprechend dem gewählten Ansatz gewählt (z. B. Schubert [UBA], 2018). Die Berechnung der Heizleistung ist der finale Schritt, bevor ein Potenzialabgleich mit dem Wärmebedarf der Gebäudeseite vorgenommen und darauf aufbauend eine Aussage zur Deckung des Bedarfs mittels thermischer Grundwassernutzung vorgenommen werden kann. Der Potenzialabgleich wird in Kapitel 7 näher beschrieben. Abbildung 29 zeigt beispielhaft die bayernweit ermittelte Entzugsleistung [kW] je Flurstück für den Raum Nürnberg. Für Grundwasserwärmepumpen werden nur Gebiete mit quartärem Poren-Grundwasserleiter berücksichtigt, da diese den ersten anzutreffenden Grundwasserleiter darstellen. Außerhalb dieser Eignungsgebiete (weiße Flächen in der Abbildung 29) lässt sich zurzeit kein quantitatives Potenzial angeben. Bei lokal vorhandenen oder oberflächennahen tertiären Grundwasservorkommen besteht in Einzelfällen aber dennoch die Möglichkeit, die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen zu prüfen.

Die Höhe des Potenzials hängt stark von der Positionierung der Brunnen, d. h. von Größe und Orientierung des Flurstücks ab. Flurstücke mit hohem Potenzial können daher auch an Flurstücke mit niedrigem Potenzial angrenzen. In einigen Fällen grenzen Flurstücke mit hohem Potenzial direkt an Flurstücke mit dem Potenzial 0 an. Ein Potenzial 0 liegt vor, wenn das Flurstück in einem Ausschlussgebiet liegt oder dieses schneidet, oder wenn eine der drei Beschränkungen (Absenkung im Entnahme Brunnen, Aufstau im Schluckbrunnen oder Hydraulischer Kurzschluss) nicht eingehalten werden kann. Daher kann sich in einigen Gebieten ein sehr heterogenes Bild des Potenzials zur geothermischen Nutzung des Grundwassers ergeben.

6.3.4 Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern)

Berechnung der Entzugsleistung im Rasterdatensatz

Neben der flurstückbezogenen Potenzialermittlung (siehe Abschnitt 6.3.3) wird ebenfalls mit der TAP-Methode nach Böttcher, et. al. (2019) das rasterbezogene Potenzial für die thermische Nutzung des Grundwassers berechnet. Während bei der flurstückscharfen Berechnung ein maximaler Brunnenabstand für jedes einzelne Flurstück ermittelt wird, wird in der Rasterdarstellung ein flurstücksunabhängiger, konstanter Brunnenabstand festgelegt (da z. B. Gebäude in unbebauten Flächen nicht bekannt sind, ist es nur so möglich, für diese Gebiete ein Potenzial auszuweisen). Potenzial und Leistung werden hier jeweils für zwei vorgegebene Brunnenabstände von 10 m (kleine Anlagen, typischerweise für ein Einzelhaus) und 100 m (größere Anlagen für größeren Wärmebedarf) in einem 10 m x 10 m Raster berechnet. Diese Unterscheidung wird gemacht, da sich in Abhängigkeit der Brunnenabstände durch einen unterschiedlichen Einfluss des hydraulischen bzw. thermischen Kurzschlusses deutlich andere Entnahmemengen realisieren lassen und demnach auch andere Entzugsleistungen. Große Anlagen werden aller Wahrscheinlichkeit nach eher auf größeren Flächen realisiert (z. B. Häuserblöcke, Quartiere, etc.), bei denen dann auch größere Brunnenabstände eingehalten werden können. Um das Potenzial für diese Anwendungen darzustellen, wurde das Szenario mit 100 m Brunnenabstand umgesetzt. Kleine Anlagen kommen eher für Einfamilienhäuser und kleinere Mehrfamilienhäuser zum Einsatz. Dort ist in der Regel auf einem Grundstück nur begrenzt Platz, so dass für diese Anwendung das Potenzial mit dem Ansatz des Mindestabstands von 10 m Brunnenabstand berechnet wurde. Bei diesem Szenario ergibt sich in der Regel für die Rasterzellen geringere Potenzialwerte, da die Entnahmemenge durch die Randbedingungen des hydraulischen Kurzschlusses begrenzt wird. Eine Vergrößerung des Brunnenabstands von 10 m auf 100 m führt sehr vereinfacht in etwa zu einer Verzehnfachung der zugehörigen Fördermenge. Damit werden aber auch die Absenkung des Grundwassers und die Gefahr eines thermisch-hydraulischen Kurzschlusses oder einer Oberflächenüberflutung verstärkt. In größeren Gebieten mit geringer grundwassererfüllter Mächtigkeit und in Gebieten mit geringerem hydraulischem Gradienten wird in der Regel die erlaubte Absenkung um ein Drittel der grundwassererfüllten Mächtigkeit zum maßgebenden limitierenden Faktor für das umsetzbare Potenzial.

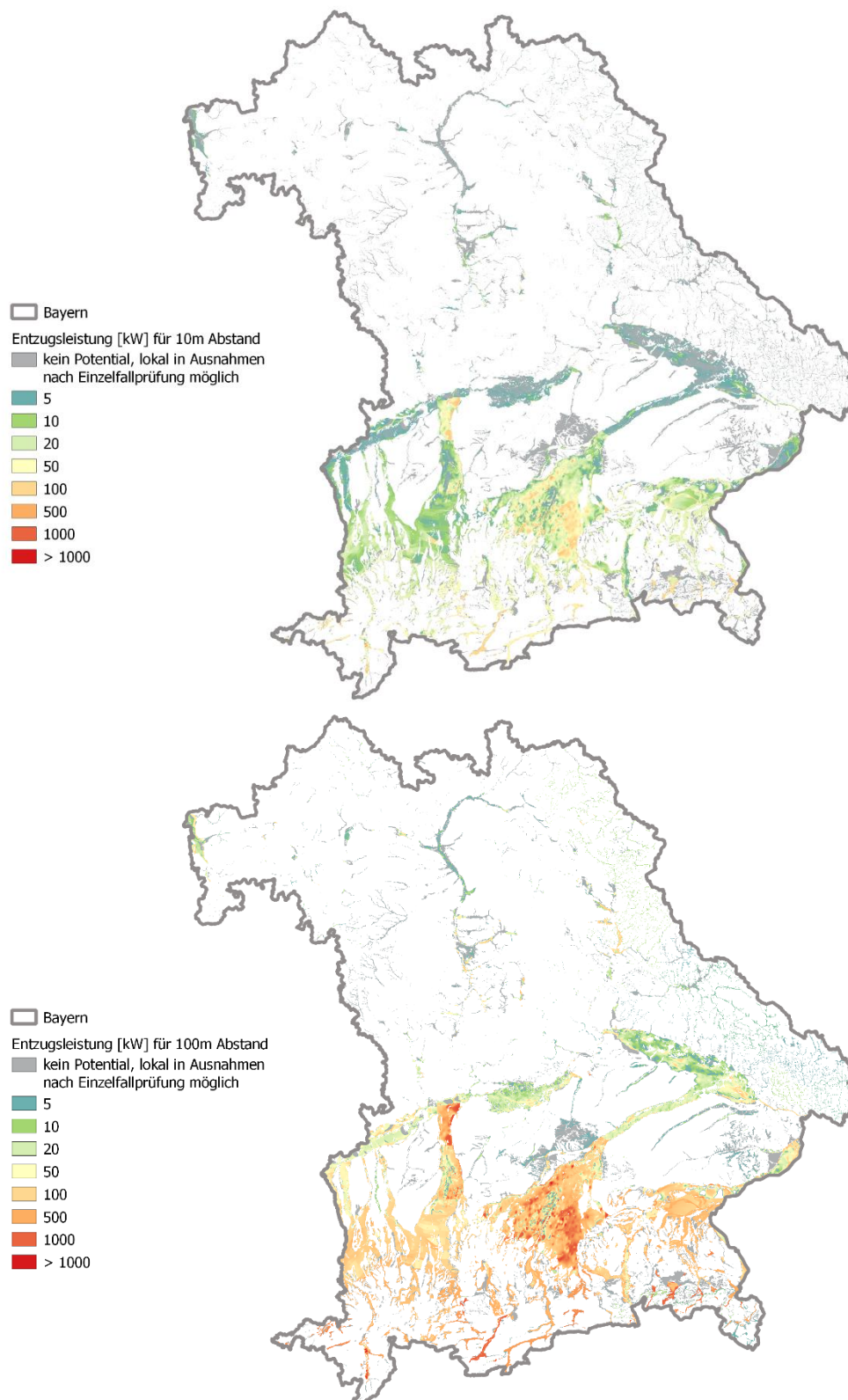


Abbildung 30: Bayernweite Entzugsleistung [kW] für Grundwasserwärmepumpen.
Oben: bei einem Brunnenabstand von 10 m, unten: bei einem Brunnenabstand von 100 m.

Abbildung 31 zeigt beispielhaft eine Anwendung der Rasterkarte mit zwei Brunnen-Dubletten. Die beiden Gebäude (A und B) und ihre zugehörigen Grundstücke belegen unterschiedliche Rasterzellen. Da das Potenzial mit einem festen Dublettenabstand von 10 m berechnet wird, ergibt sich eine recht niedrige, technisch mögliche Förderrate (1,58 l/s), welche die Installation einer Grundwasserpumpe mit einer Leistung von 44 kW unter Annahme einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 5 \text{ K}$ und einem Jahresarbeitszahl JAZ = 4 ermöglichen würde. Bei den Eigenschaften dieser beiden Häuser könnten jedoch auch Brunnenabstände von mehr als 10 m berücksichtigt werden. Ein minimal mögliches Potenzial kann so für die beiden Gebäude abgeschätzt werden, auch wenn sich aus der Darstellung kein flurstückbezogener Wert ablesen lässt.

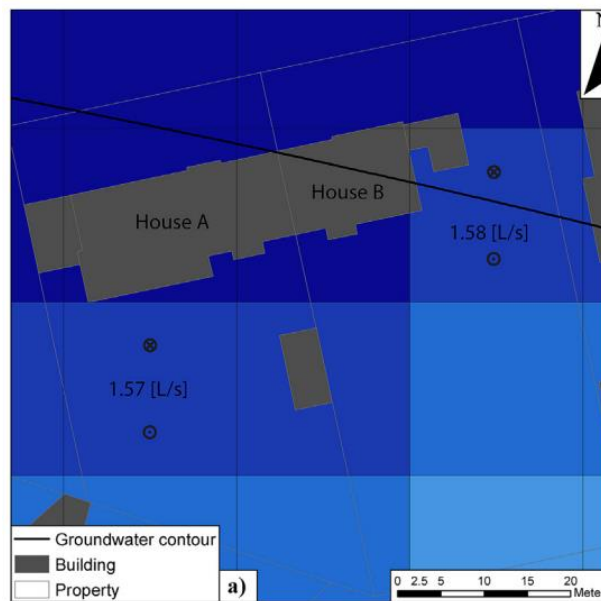


Abbildung 31: Beispielhafte Anwendung der Rasterdarstellung

Das Ergebnis der Potenzialabschätzung für thermische Grundwassernutzung kann in die Energieplanung auf Gebäudeebene integriert werden. Dabei wird eine maximale Entnahme pro Grundstück (Brunnenabstand durch Grundstücksgröße vorgegeben) oder Rasterzelle (konstanter Brunnenabstand) innerhalb der gesetzlichen Grenzen angegeben. Mögliche positive oder negative Einflüsse durch die sich ergebende Wärme- bzw. Kältefahne am Injektionsbrunnen aus der oder auf die Nachbarschaft sind hierbei noch nicht enthalten, können aber über die Ermittlung eines räumlichen Potenzials berücksichtigt werden (siehe Anhang).

Berechnung der Entzugsenergie

Zur Bestimmung der Entzugsenergie in MWh/a wird die Entzugsleistung aus dem vorigen Absatz mit einer definierten, mittleren jährlichen Betriebsdauer von 1.800 Volllaststunden multipliziert. Die Entzugsenergie für die Brunnenabstände (a) 10 m und (b) 100 m ist in Abbildung 32 dargestellt.

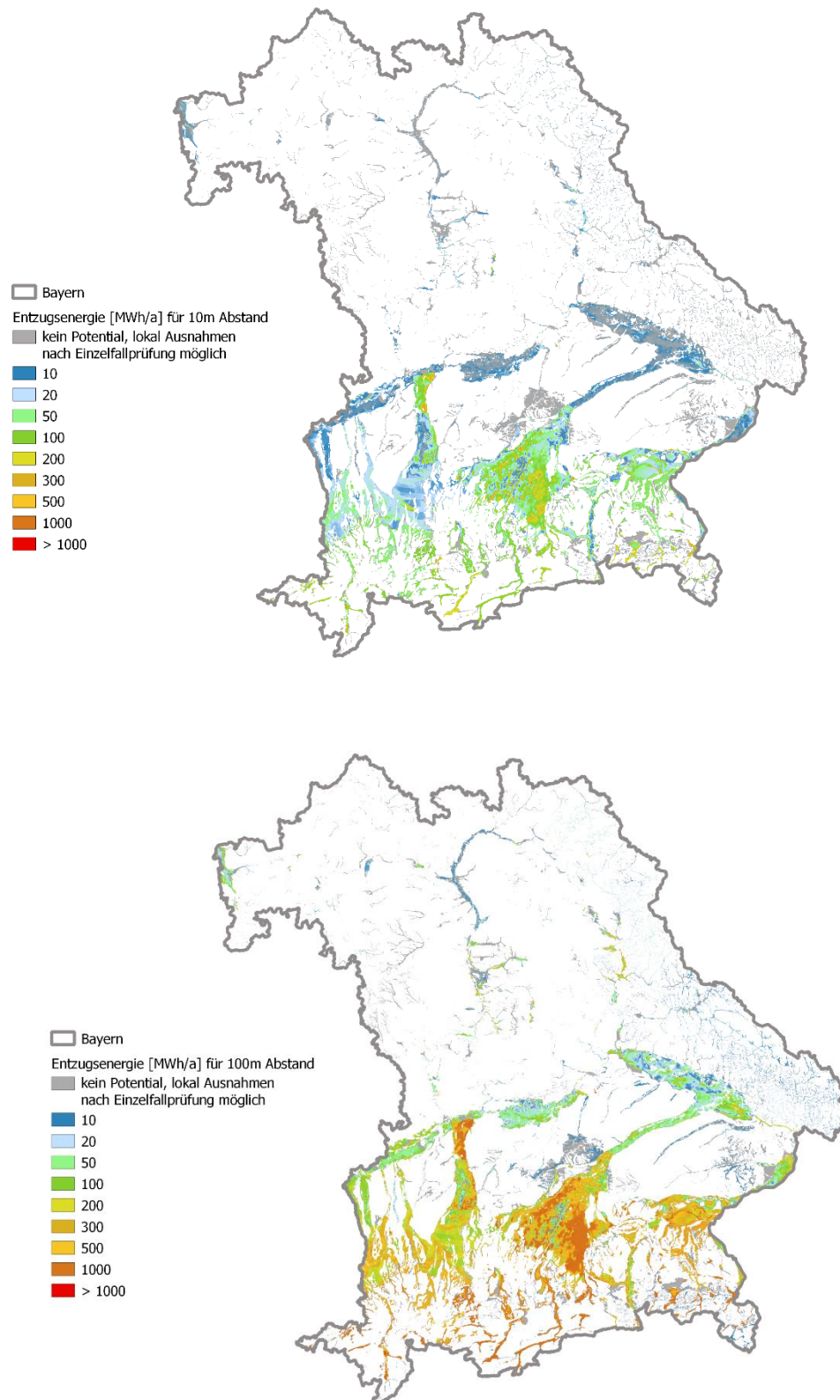


Abbildung 32: Bayernweite Entzugsenergie [MWh/a] für Grundwasserwärmepumpen. Oben: mit einem Brunnenabstand von 10 m, Unten: mit einem Brunnenabstand von 100 m.

6.3.5 Wirtschaftliche Aspekte

Ein betrachteter Aspekt, der einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Grundwasserwärmepumpen-Anlagen hat, ist hier der Flurabstand. Je höher der Flurabstand ist, desto tiefer muss gebohrt werden, um das Grundwasser zu erreichen und umso teurer ist die Installation der Anlage. Zudem muss mehr Energie aufgewendet werden, um das Grundwasser aus einer größeren Tiefe an die Oberfläche zu heben. Dies kann sich negativ auf die Jahresarbeitszahl und damit auf die Betriebskosten der Anlage auswirken. Eine grobe Einschätzung hält Bohrungen von 20-50 m Tiefe für wirtschaftlich (Bay StMUGV, 2007). Dieser Wert ist jedoch unabhängig von der Anlagengröße. Es ist hier anzumerken, dass bei größeren Anlagen zur Abdeckung eines höheren Wärmebedarfs größere Bohrtiefen und Flurabstände keinen großen Einfluss auf die wirtschaftliche Effizienz haben müssen (siehe auch Ausführungen über die ökonomische Umsetzbarkeit in Kapitel 6.1).

Auch der Abstand zwischen Entnahme- und Injektionsbrunnen kann einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage haben. Größe und Lage des Flurstücks bestimmen, wie weit die beiden Bohrungen auseinanderliegen können und damit auch welche Leistung eine Anlage erzielen kann. Generell gilt, dass je größer die Entfernung ist, umso höher kann die Förderrate und damit die Leistung gewählt werden.

6.4 Methodik der Potenzialermittlung für Erdwärmesonden (EWS)

Die vorliegende Berechnung zur Abschätzung des quantitativen Potenzials für Erdwärmesonden basiert auf den Ausführungen der VDI 4640, Blatt 2. Als Datengrundlage für die geologische Beschreibung des Untergrundes bzw. als zugewiesener, repräsentativer thermischer Parameter und als hydrogeologisch beurteilte Begrenzung werden die Wärmeleitfähigkeit sowie die Bohrtiefenbegrenzung benötigt. Diese Daten werden von Seiten des LfU für die Potenzialermittlung zur Verfügung gestellt.

6.4.1 Einführung in die Methodik

Erdwärmesonden sind vertikale Wärmetauscher, die in Deutschland in überwiegend senkrechte Bohrlöcher im Untergrund verbaut werden. In einem geschlossenen Kreislauf fließt ein Wärmeträgermedium und transportiert Wärme aus dem Untergrund zum Verdampferkreislauf der Wärmepumpe (siehe Abbildung 33). Als Wärmeträgermedium wird in der Regel eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel verwendet. Die Länge der Bohrlöcher liegt abhängig vom Wärmebedarf, der Untergrundbeschaffenheit und der genehmigungsrechtlichen Vorgaben in Deutschland in den meisten Fällen zwischen 30 und 100 Metern. Kleinanlagen (nach VDI 4640) mit maximal 30 kW Heizleistung der angeschlossenen Wärmepumpe umfassen von einer bis zu ca. sechs Erdwärmesonden, ein Einfamilienhaus mit ca. 10 kW Heizbedarf benötigt in etwa ein oder zwei Sonden.

Die meisten Erdwärmesonden haben die Form von paarweise U-förmigen Rohren (Doppel-U-Sonden), welche das Wärmeträgermedium durch den Untergrund leiten. Auf dieser Bauart basieren die Auslegungswerte der VDI 4640, sie wurde daher als Referenzsystem für die Potenzialberechnung verwendet. Andere bekannte Formen sind einfache U-Sonden sowie Koaxialsonden. Koaxialsonden werden in der Regel höhere Leistungen zugeordnet, in dem Sinne, dass für eine vergleichbare Entzugsleistung eine etwas geringere Bohrtiefe notwendig ist (ca. 10 % geringere Tiefen). Daher sollte allgemein das ausgewiesene Potenzial auf Basis einer Doppel-U-Sonde auch durch eine Koaxialsonde ohne Schwierigkeit umsetzbar sein.

Generalisiert liegt die Entzugsleistung einer Erdwärmesonde bei einer angenommenen mittleren Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und bei angesetzten 1.800 Volllaststunden abgeschätzt bei durchschnittlich 40 W/m . Sie ist stark abhängig von den Untergrundtemperaturen sowie den thermischen Gesteinseigenschaften und wird durch die erlaubte Bohrtiefe begrenzt.

Die gewählte Methodik zur Ermittlung des Potenzials von Erdwärmesonden basiert auf der VDI 4640, Blatt 2. Diese liefert in mehreren Tabellen empirische Beziehungen zwischen der mittleren Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Untergrunds und der zu erwartenden Entzugsleistung je Sondenmeter. Diese werden für die Potenzialbestimmung herangezogen. Werte, die zwischen den Angaben aus der Tabelle liegen, werden bei der Bestimmung des Potenzials vereinfacht interpoliert. Somit kann bei gegebener Wärmeleitfähigkeit des Bodens zunächst die Entzugsleistung je Sondenmeter (W/m) und unter Hinzunahme der Bohrtiefenbegrenzung mit den verfügbaren Bohrtiefen die Gesamtentzugsleistung einer Sonde (kW) berechnet werden.

Die Tabellen der VDI 4640, Blatt 2 ermöglichen eine Differenzierung der Berechnungen nach

- angenommenen Volllaststunden/Jahr: 1.200 h/a, 1.500 h/a, 1.800 h/a, 2.100 h/a, 2.400 h/a
- Betrieb der Anlage mit „nur Heizen“ und „Heizen und Warmwasser“ und
- minimaler Temperatur des Wärmeträgermediums bei Austritt aus der Wärmepumpe: -5 °C, -3 °C, 0 °C

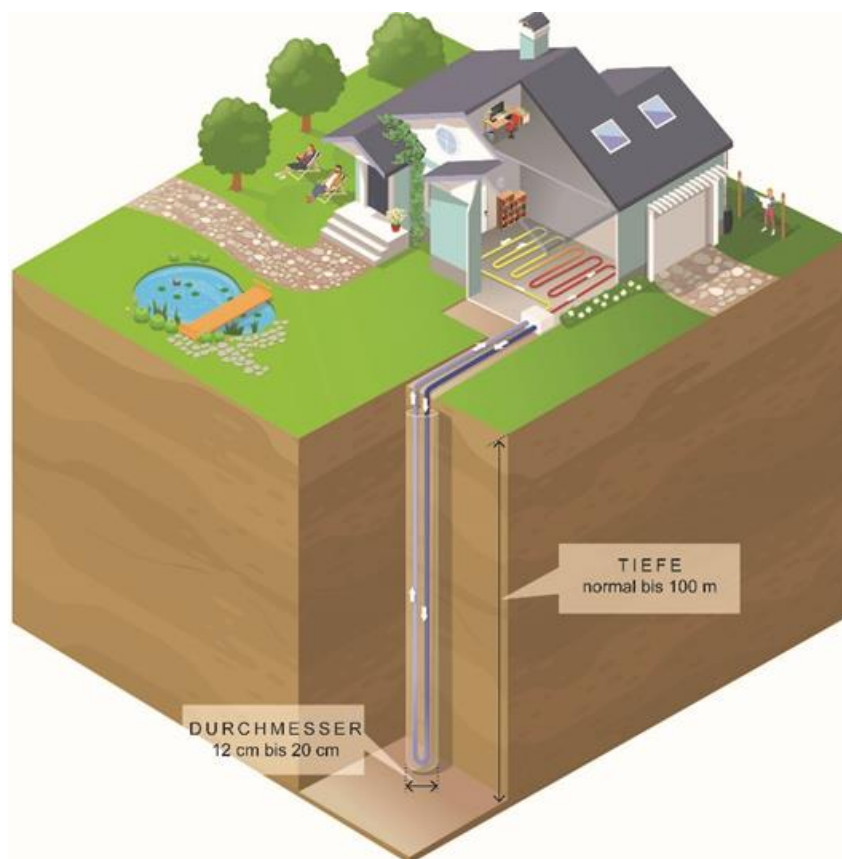


Abbildung 33: Der typische Aufbau einer Erdwärmesonde (Quelle: Interreg Alpine Space Programme, Projekt GRETA).

Dabei geht die VDI 4640 von folgenden Annahmen aus:

- es handelt sich um eine kleinere Anlage (bis 30 kW) mit maximal fünf, annähernd gleichlangen Erdwärmesonden mit Tiefen von 50 m bis 200 m und mindestens 6 m Sondenabstand ohne deutliche Abweichung von einer Linienanordnung,
- es ist keine thermische Wechselwirkung mit anderen in der unmittelbaren Nachbarschaft befindlichen Sondenanlagen zu erwarten,
- die mittlere, ungestörte Untergrundtemperatur vor Betriebsbeginn der Anlage beträgt über die jeweilige Sondenlänge ca. 11 °C,
- ein vorgegebenes Heizlastprofil (siehe VDI 4640, Bild B3).

Weitere Bedingungen zu Anlage, Trägermedium und Heizlastprofil finden sich in VDI 4640, Blatt 2. Es ist hier zu erwähnen, dass die Methode nach VDI 4640 eine vereinfachte Abschätzung der Leistung von Erdwärmesonden ist und nicht für die planerische Detailauslegung geeignet ist. Durch den verallgemeinerten Ansatz bietet es sich aber an, diese Methode für die großflächige Potenzialabschätzung heranzuziehen.

6.4.2 Beschreibung der Datengrundlage

Für die Zusammenstellung der Datengrundlage werden dem generellen Konzept folgend zunächst Ausschluss- und Eignungsgebiete geprüft und festgelegt. Die anschließende Berechnung des Potenzials benötigt hauptsächlich zwei Eingangsgrößen: die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine als geologische Standortgegebenheit und die Bohrtiefenbegrenzung als regulatorische Einschränkung (siehe Tabelle 16). Beide stehen flächendeckend für Bayern beim LfU zur Verfügung und können über den UmweltAtlas Bayern (LfU, 2023) abgerufen werden.

Tabelle 16: Benötigte Daten für die Berechnung des Potenzials für EWS

Parameter	Wertebereich	Einheit	Datenquelle
Wärmeleitfähigkeit	1-5	[W/(m·K)]	LfU in 5 Tiefen: 20/40/60/80/100 m
Bohrtiefenbegrenzung	0-200	[m]	UmweltAtlas Bayern (LfU 2023) in 10 m-Schritten

6.4.2.1 Prüfung der Ausschlussgebiete und Ausweisung von Eignungsgebieten

Ausschlussgebiete

In einem ersten Schritt wurde der rechtliche Rahmen überprüft und die Ausschlussgebiete für die Nutzung von Erdwärmesonden (Wasserschutzgebiete, etc.) berücksichtigt, die den Bau einer geothermischen Anlage grundsätzlich ausschließen und vom LfU festgelegt wurden. Andererseits geben Bohrtiefenbeschränkungen für Erdwärmesonden eine maximale Bohrtiefe vor, bei der entweder keine Durchbohrung der geringleitenden Basis des ersten Grundwasserstockwerks erlaubt ist oder allgemein keine Bohrungen erlaubt sind wie in Karst- und Sulfatgesteinen oder Gebieten mit artesisch gespanntem Grundwasser. Die gesetzlichen Beschränkungen (siehe Abschnitt 6.2 mit Abbildung 17) werden anhand der bayerischen Bestimmungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie gemäß des Bayerischen Leitfadens zu Erdwärmesonden und dem BayWG in die Potenzialanalyse integriert.

Eignungsgebiete

In Gebieten, in denen Bohrungen zwar generell erlaubt sind (keine Ausschlussgebiete, siehe oben und Abschnitt 6.1), aber die Bohrtiefenbegrenzung seitens des LfU mit 0 m angegeben ist, kann kein generell vorhandenes Potenzial ausgewiesen werden. Dennoch wurden in diesen Bereichen bereits Erdwärmesonde installiert, die über eine Einzelprüfung genehmigt wurden (abrufbar im UmweltAtlas Bayern (LfU 2023)). Analog zu den Empfehlungen beim Potenzial für Grundwasserwärmepumpen wird auch hier vorgeschlagen in diesen Gebieten bei der Ausweisung zu ergänzen, dass zwar generell kein flächendeckend umsetzbares Potenzial vorhanden ist, aber lokale Ausnahmen bestehen können, die individuell zu prüfen sind. Die Karte der Eignungsgebiete (Abbildung 34) zeigt die Gebiete, für die kein Potenzial ausgewiesen werden kann, Gebiete mit einer angegebenen Bohrtiefenbegrenzung von 0 m für die ebenfalls kein Potenzial angegeben werden kann, sowie Gebiete, in denen Erdwärmesonden umgesetzt werden können. Gemäß dem konservativen Ansatz des umsetzbaren Potenzials in dieser Studie werden Gebiete, für die kein quantitatives Potenzial ausgewiesen werden kann, mit dem Hinweis „Umsetzung von Erdwärmesonden ggf. über Einzelfallprüfung möglich“, wie oben ausgeführt, versehen.

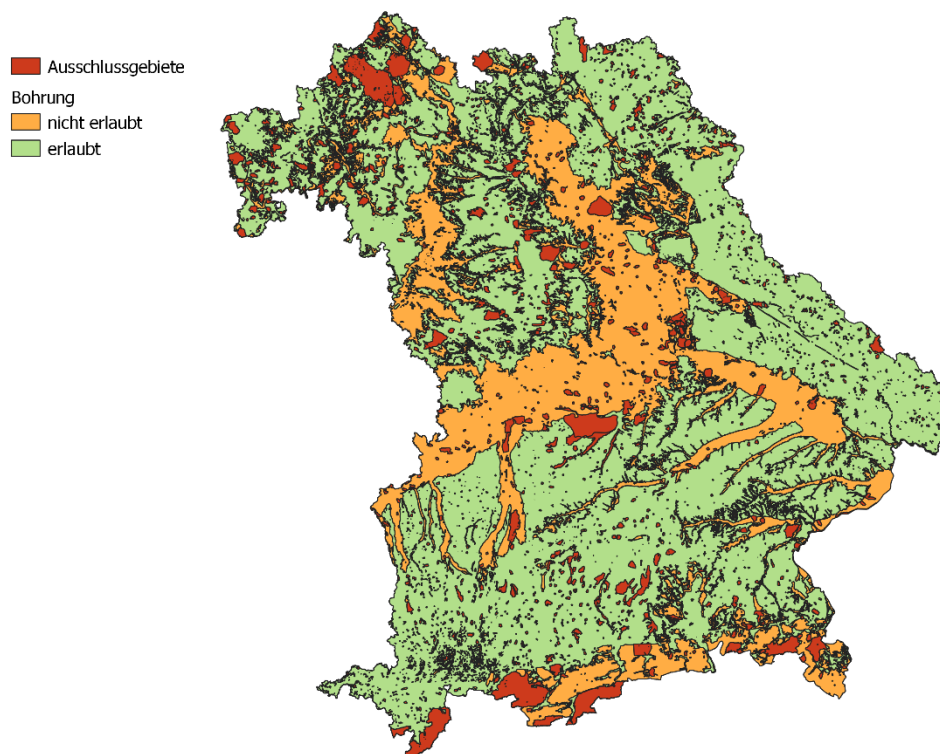


Abbildung 34: Eignungsgebiete für Erdwärmesonden in Bayern. Klassifizierte Gebiete in denen Bohrungen nicht erlaubt sind (orange) ergeben sich aus den Angaben für die erlaubte Bohrtiefen von 0 m.

6.4.2.2 Wärmeleitfähigkeit

Die am Standort voraussichtlich zu erwartenden, über die Tiefe gemittelten Wärmeleitfähigkeitswerte können im UmweltAtlas Bayern (LfU, 2023) abgerufen werden. Sie liegen für Tiefen von bis zu 20 m, 40 m, 60 m, 80 m und 100 m vor. Der Wertebereich beginnt je nach vorhandenen Gesteinsarten und Wassersättigungsgrad (Grundwasserverhältnisse) bei geringen Wärmeleitfähigkeiten von $\leq 1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und reicht bis zu den höchsten Wärmeleitfähigkeiten von $> 4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Abbildung 35 zeigt beispielhaft die Wärmeleitfähigkeit für eine Tiefe bis zu 100 m in Bayern.

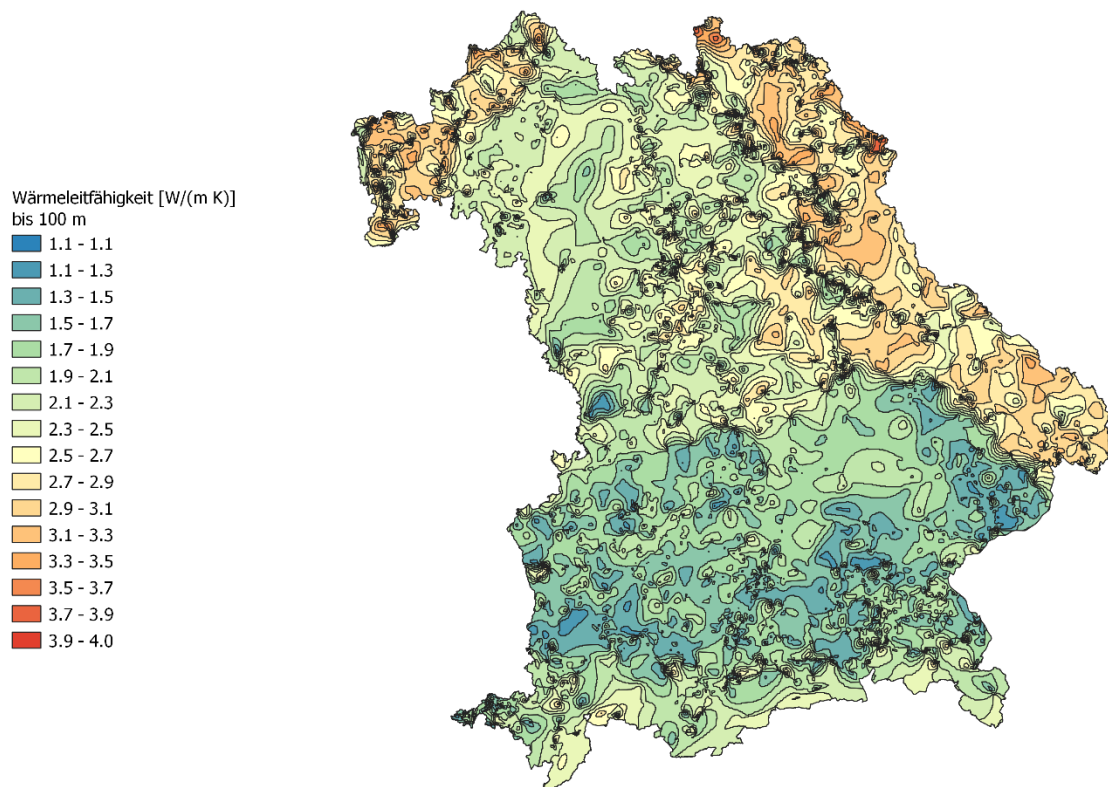


Abbildung 35: Wärmeleitfähigkeit des Bodens über Bayern in einer Tiefe von 100 m

6.4.2.3 Bohrtiefenbegrenzung

Das berechnete Potenzial für die Nutzung von Erdwärmesonden nimmt mit zunehmender Bohrtiefe zu. Daher ist die genehmigungsrechtlich erlaubte Bohrtiefe von großer Bedeutung für das Potenzial zur Nutzung von Erdwärmesonden. Der vom LfU zur Verfügung gestellte Datensatz zur Bohrtiefenbegrenzung gibt hier die maximal erlaubte Bohrtiefe in 10 m-Schritten an (siehe Abbildung 36). Dieses Intervall spiegelt sich dann auch im ermittelten Potenzial wider.

Für die Gebiete Bruchsaal, Neumarkt i. d. O., Ingolstadt und in Bereichen am Alpenrand lagen LfU-seitig noch keine Daten zur Bohrtiefenbegrenzung vor. Hier wurden in Rücksprache mit dem LfU Annahmen für die Bohrtiefenbegrenzung aufgrund der in diesen Gebieten bereits existierenden Erdwärmesonden getroffen, indem für die genannten Regionen eine Mittelung (Medianwert) der Endteufen aller dort vorhandenen Erdwärmesonden abzüglich eines Sicherheitsaufschlags von 20 m berechnet wurde. Dadurch konnte auch dort ein umsetzbares Potenzial bestimmt werden, das konservativ betrachtet mit genehmigungsfähigen Bohrungen erreicht werden kann.

Bei einer angegebenen Bohrtiefenbegrenzung von 0 m handelt es sich, wie bereits oben angemerkt, streng genommen um Ausschlussgebiete, da hier die Abteufung von Erdwärmesonden nicht genehmigt wird. Dabei handelt es sich beispielsweise um Karstgebiete (fränkische, schwäbische Alb), Bereiche mit gespannten Grundwasserleitern, etc.

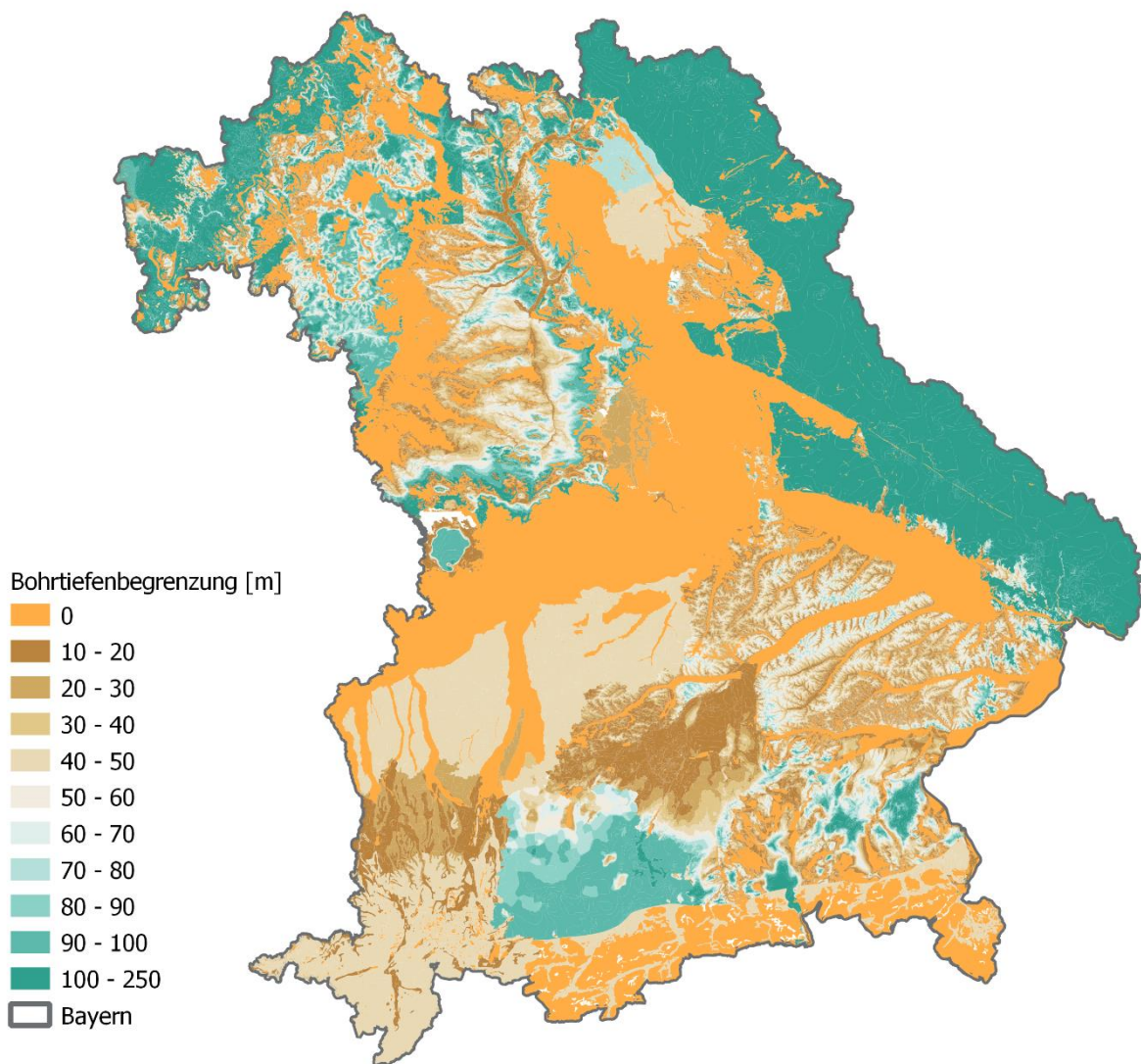


Abbildung 36: Bohrtiefenbegrenzung in Bayern (LfU 2023), ergänzt durch die TUM in Absprache mit dem LfU.

6.4.3 Flurstückbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für das Mischpult)

Zur Umsetzung der Berechnung des flurstückbezogenen Potenzials von Erdwärmesonden wurde, analog zu der Potenzialermittlung für Grundwasserwärmepumpen, der folgende Ablauf gewählt:

- Ermittlung der Anzahl möglicher Erdwärmesonden je Flurstück
- Berechnung des umsetzbaren Potenzials

6.4.3.1 Ermittlung der Anzahl möglicher Erdwärmesonden je Flurstück

Das Potenzial zur Nutzung von Erdwärmesonden wird nur für geeignete Flurstücke berechnet. Flurstücke, die aufgrund ihrer Größe oder Bebauung nicht genug Platz für die Umsetzung einer Erdwärmesonde bieten, werden in der quantitativen Analyse des umsetzbaren Potenzials nicht berücksichtigt, bzw. weisen kein umsetzbares Potenzial auf.

Für alle geeigneten Flurstücke wird mit Hilfe der gesetzlichen Abstandsregeln die maximale Anzahl möglicher Sonden festgelegt. Jede Sonde muss einen Abstand von 1 m zu Gebäuden, 3 m zu Grundstücksgrenzen und 6 m zur nächsten Sonde einhalten. Auf die dann verbleibenden Flächen werden Erdwärmesonden so dicht wie möglich platziert. Jede Sonde und damit jedes Flurstück

benötigt aufgrund des vorgeschriebenen Abstands zur nächsten Sonde mindestens eine freie Fläche von 36 m². Die maximal mögliche Anzahl an Sonden ergibt sich aus

$$\text{Anzahl}_{\text{Sonden}} = \frac{A_{\text{frei}}}{A_{\text{Sonde}}} \quad (12)$$

wobei

$\text{Anzahl}_{\text{Sonden}}$	-	maximal mögliche Anzahl an Sonden auf dem Flurstück
A_{frei}	m ²	Fläche (Flurstück) abzüglich Fläche (Gebäude)
A_{Sonde}	m ²	von einzelner Sonde benötigte Fläche

Bei Anlagen mit mehreren Sonden muss außerdem berücksichtigt werden, dass sich die Sonden gegenseitig beeinflussen, so dass die Entzugsleistung jeder einzelnen Sonde sinkt. Eine entsprechende Abnahme der Entzugsleistung mit jeder zusätzlichen Sonde ist in Tabelle B3 der VDI 4640 für bis zu fünf Sonden enthalten. Die damit gegebene Kurve wird für diese Studie vereinfacht, basierend auf einer minimalen Wärmeleitfähigkeit = 1 W/(m·K), auf bis zu 20 Sonden extrapoliert:

$$P_{\text{Sonde}} = -3,85 * \ln(n) + 24,55 \quad (13)$$

wobei

P_{Sonde}	kW	Entzugsleistung einer Erdwärmesonde
n	-	Anzahl Sonden

Es ist bewusst, dass dies einerseits eine starke Approximation an die realen Verhältnisse darstellt, aber andererseits eine großflächige, bayernweite Abschätzung des Potenzials ermöglicht. Daher werden die daraus entstehenden Unsicherheiten in Kauf genommen.

6.4.3.2 Berechnung des umsetzbaren Potenzials

Ermittlung Bohrtiefenbegrenzung je Flurstück

Gemäß der in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Methodik wird für jedes Flurstück zunächst aus der Bohrtiefenbegrenzung die in diesem Flurstück maximal erlaubte Bohrtiefe ermittelt. Die Bohrtiefenbegrenzung liegt wie bereits dargelegt in 10 m-Schritten vor. Abbildung 37 zeigt die Bohrtiefenbegrenzung und die maximal erlaubte Bohrtiefe/Flurstück im Vergleich für einen Ausschnitt. Dabei ist zu beachten, dass der kleinste in einem Flurstück auftretende Wert die Bohrtiefenbegrenzung für das gesamte Flurstück bestimmt.

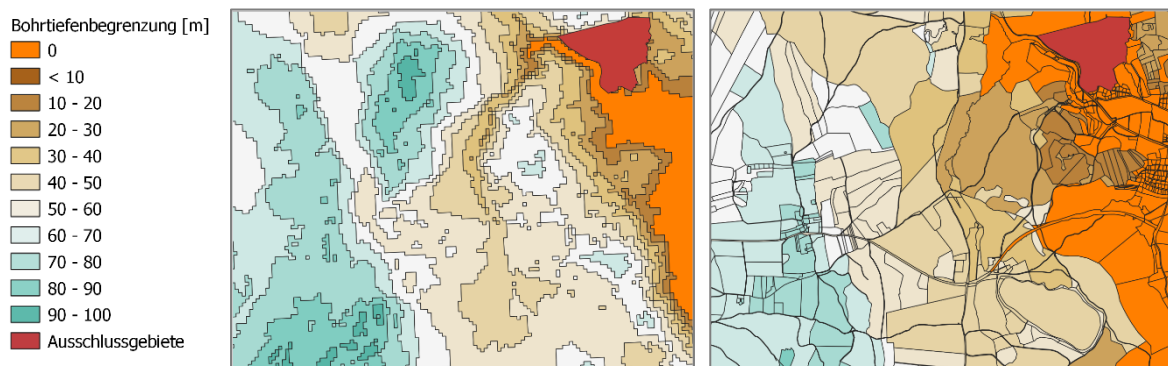


Abbildung 37: Bohrtiefenbegrenzung (links) und Bohrtiefenbegrenzung je Flurstück (rechts) für einen Ausschnitt im Landkreis Ebersberg im Vergleich. Die maximale erlaubte Bohrtiefenbegrenzung in einem Flurstück bestimmt die dort angenommene Bohrtiefenbegrenzung.

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Anschließend wird aus den zur Verfügung stehenden Daten zur Wärmeleitfähigkeit (bis zu 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 100 m) und zur im Flurstück vorliegenden maximal erlaubten Bohrtiefenbegrenzung die zugehörige mittlere Wärmeleitfähigkeit ermittelt (von der Geländeoberkante bis zur Bohrtiefenbegrenzung gemittelt gemäß den vorliegenden Daten des LfU). In Abbildung 38 werden für einen Ausschnitt im Landkreis Ebersberg die Wärmeleitfähigkeit in den fünf verschiedenen Tiefen (kleine Abbildungen) sowie im Ergebnis die mittlere Wärmeleitfähigkeit für jedes Flurstück entsprechend der im Flurstück gegebenen Bohrtiefenbegrenzung (große Abbildung) beispielhaft dargestellt.

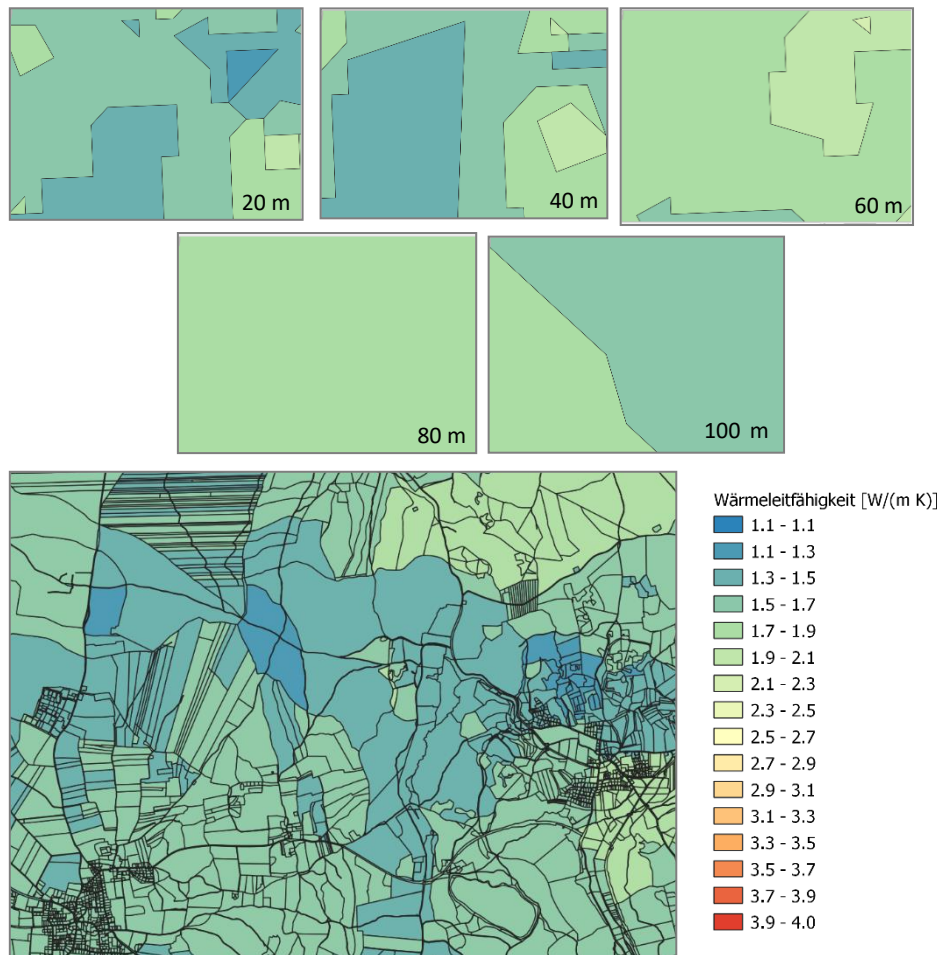


Abbildung 38: Wärmeleitfähigkeit bis zu 20, 40, 60, 80, 100 m sowie mittlere Wärmeleitfähigkeit je Flurstück entsprechend der vorgegebenen minimalen Bohrtiefenbegrenzung für den Ausschnitt im Landkreis Ebersberg.

Flussdiagramm zur Berechnung der Entzugsleistung

Abbildung 39 zeigt das Flussdiagramm zur Datenaufbereitung für die Berechnung des Potenzials von Erdwärmesonden.

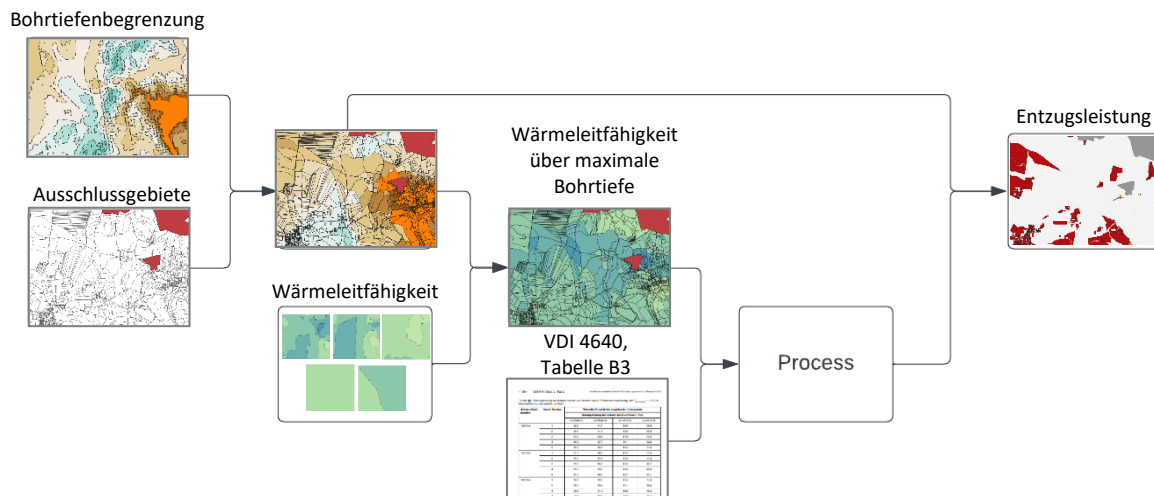


Abbildung 39: Flussdiagramm zur Datenaufbereitung für die Berechnung des Potenzials von Erdwärmesonden

Berechnung der Entzugsleistung

Um eine durchschnittliche, konservative Abschätzung zu erreichen, wird für die Beziehung zwischen mittlerer Wärmeleitfähigkeit und zu erwartender Entzugsleistung aus der VDI 4640 Tabelle B3 gewählt.

Diese setzt folgende Annahmen voraus:

- Volllaststunden = 1.800 h/a,
- minimaler Temperatur des Wärmeträgermediums bei Austritt = -3 °C sowie
- Betriebsmodus der Anlage = nur Heizen

Unter den genannten Bedingungen kann nun die Entzugsleistung einer Sonde aus maximal möglicher Bohrtiefe und der Entzugsleistung je Sondenmeter berechnet werden mit

$$P_{\text{Sonde}} = P_{\text{Sondenmeter}} \frac{btbg}{1000} \quad (14)$$

wobei

P_{Sonde}	kW	Entzugsleistung einer Erdwärmesonde
$P_{\text{Sondenmeter}}$	W/m	Entzugsleistung je Sondenmeter
$btbg$	m	Bohrtiefenbegrenzung = maximale Bohrtiefe

Für die Berechnung der Entzugsleistung für ein Flurstück wird für die Anzahl möglicher Sonden nach Gleichung (12) in Abschnitt 6.4.3.1 das Gesamtpotenzial bestimmt. Bei der Berechnung wird die Minderung des Potenzials einer einzelnen Sonde durch die gegenseitige Beeinflussung der Sonden untereinander gemäß VDI 4640, Blatt 2, Tabelle B3, S. 106 berücksichtigt. Die flurstücksbezogene Entzugsleistung ist beispielhaft in Abbildung 40 dargestellt.

Die Entzugsleistung für eine einzelne Erdwärmesonde ist in Abbildung 42 (siehe Abschnitt 6.4.4) in Form eines bayernweiten 10 m x 10 m Rasters dargestellt.

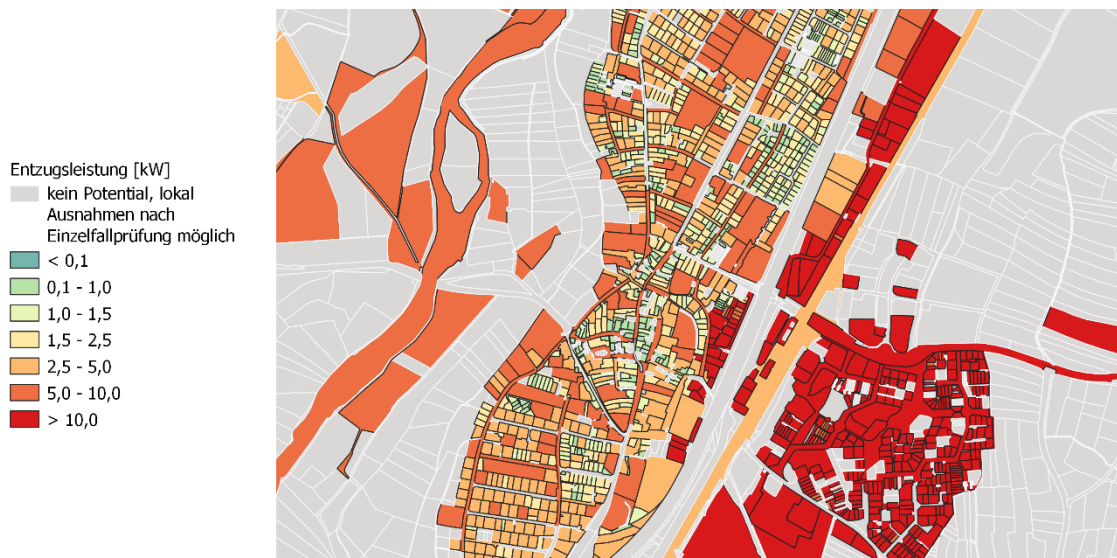


Abbildung 40: Flurstückbezogene Entzugsleistung eines beispielhaften Ausschnitts in Bayern

6.4.4 Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern)

Für die Darstellung des minimal umsetzbaren Potenzials von Erdwärmesonden im Energie-Atlas Bayern werden die mittleren Wärmeleitfähigkeiten in bis zu 20 m, 40 m, 60 m, 80 m und 100 m und die Bohrtiefenbegrenzung in einer räumlichen Analyse so miteinander verschnitten, dass eine Vektordarstellung für jeden Ort die mittlere Wärmeleitfähigkeit über die maximal mögliche Bohrtiefe, abgeleitet aus der Bohrtiefenbegrenzung, angibt (siehe Abbildung 41).

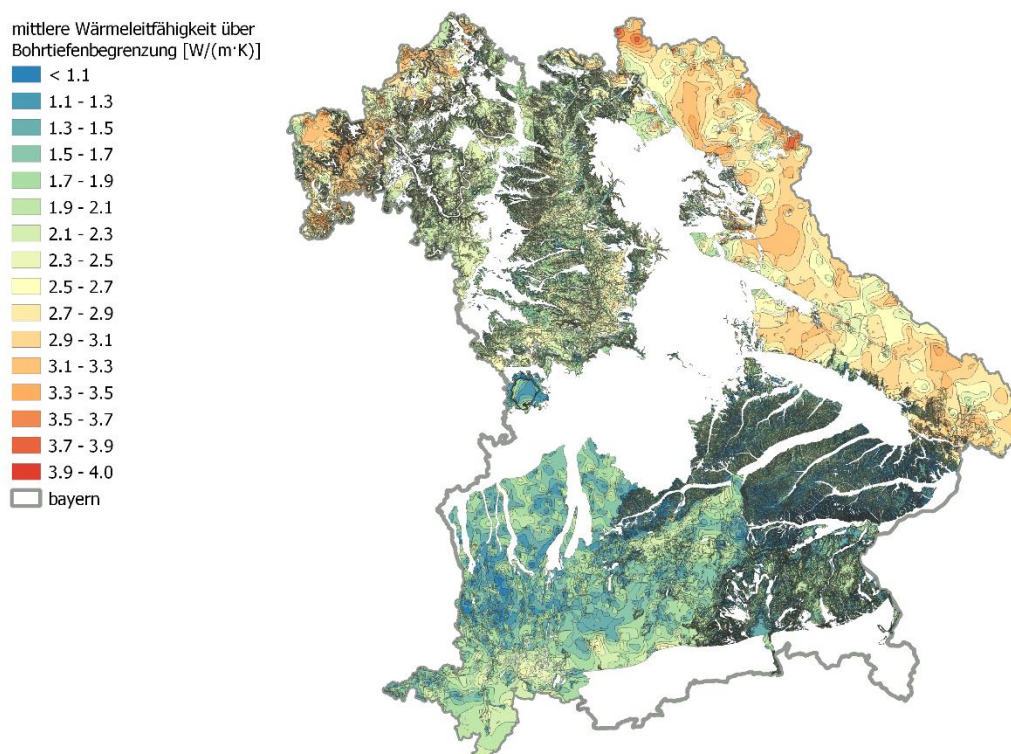


Abbildung 41: Mittlere Wärmeleitfähigkeit in $W/(m \cdot K)$, gemittelt über die vorliegende Bohrtiefenbegrenzung.

Berechnung der Entzugsleistung

Im Anschluss wird daraus wiederum mit Gleichung (14) die Entzugsleistung pro Sonde berechnet. Das sich ergebende Vektorfeld wird abschließend in einer Auflösung von 10 m x 10 m gerastert. Um sich ergebende, kleinräumige Heterogenitäten zu homogenisieren, wird die Entzugsleistung mit einem Gaussfilter geglättet.

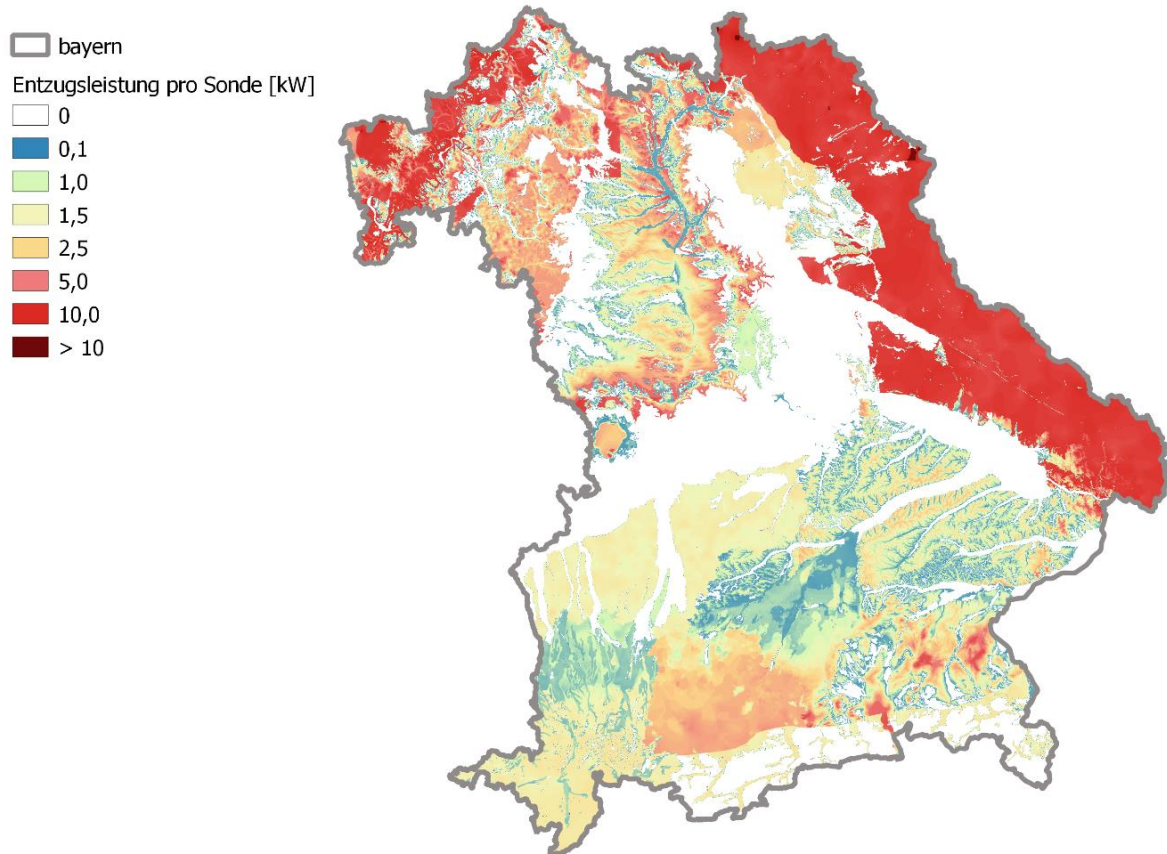


Abbildung 42: Entzugsleistung pro Sonde [kW] für ganz Bayern

Berechnung der Entzugsenergie

Die Umrechnung der Wärmeleitfähigkeit in Entzugsleistung je Sondenmeter erfolgte, wie bereits beschrieben, auf Grundlage der VDI 4640 Blatt 2, Tabelle B3. Diese nimmt eine jährliche Betriebsdauer von 1.800 h an. Die Berechnung der Entzugsenergie erfolgt daher mit Gleichung (15).

$$E_{\text{Sonde}} = P_{\text{Sonde}} T \quad (15)$$

wobei

E_{Sonde}	kWh/a	Entzugsenergie einer Erdwärmesonde
P_{Sonde}	kW	Entzugsleistung einer Erdwärmesonde
T	h/a	Volllaststunden pro Jahr; hier: $T = 1.800 \text{ h}$

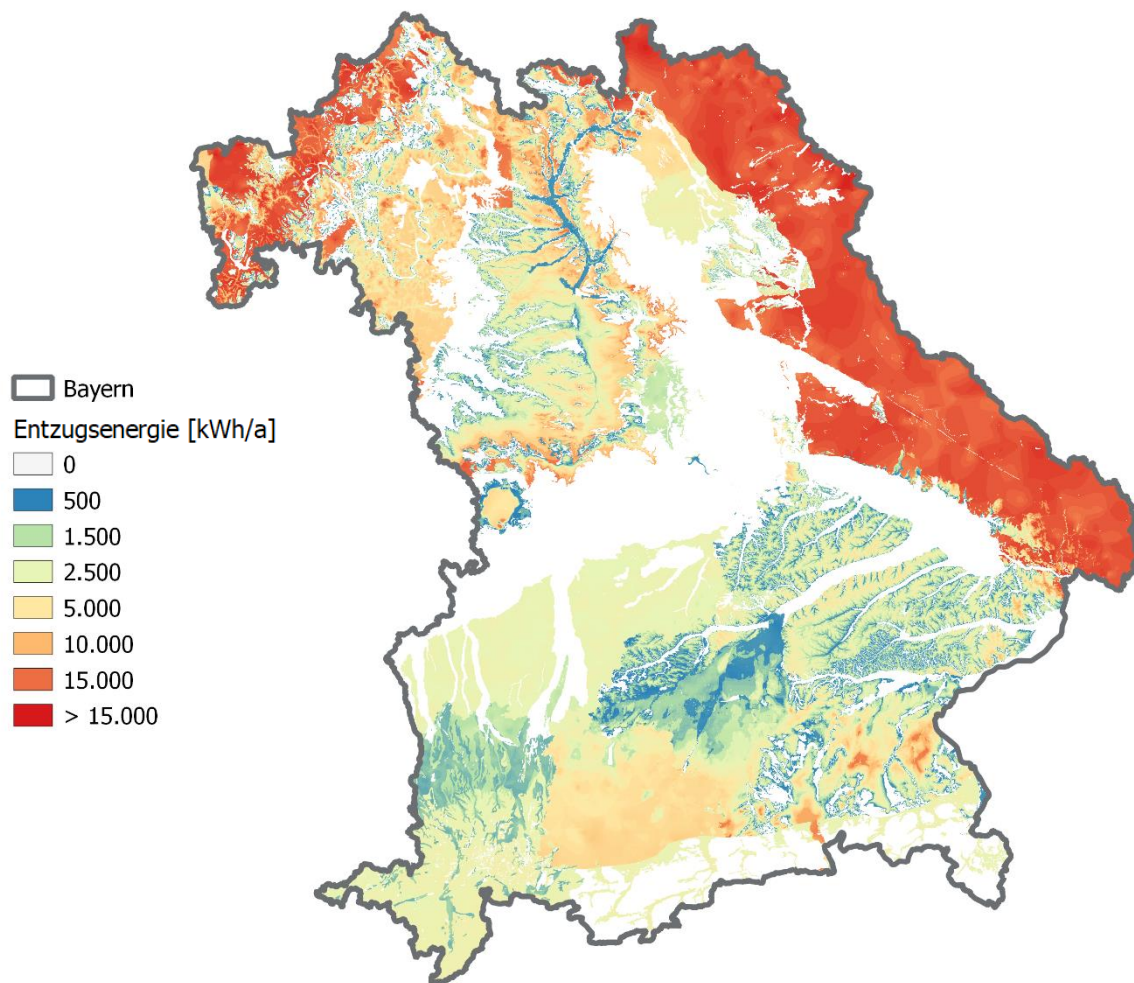


Abbildung 43: Entzugsenergie [kWh/a] pro Sonde für ganz Bayern

6.4.5 Wirtschaftliche Aspekte

Das umsetzbare Potenzial für die Nutzung von Erdwärmesonden in Bayern gibt eine minimale Entzugsleistung pro Sonde in $W/(m \cdot K)$ an. Dies erlaubt einen ersten Hinweis darauf, ob die Sonde wirtschaftlich installiert und betrieben werden kann. In der Praxis werden nach Angaben von Planungsbüros und Bohrfirmen Sonden einer Bohrlänge von weniger als 30 m aufgrund der Kosten für die Bereitstellung der Bohrung in Bezug zur erwartbaren Leistung kaum umgesetzt. Die Wirtschaftlichkeit einer Anlage ändert sich jedoch mit den äußeren Rahmenbedingungen wie Öl-/Gaspreis, Fördermöglichkeiten und persönlichen Entscheidungen der Akteure. In der vorliegenden Studie wurde die minimale Bohrlänge aufgrund der Angaben der Bohrunternehmen zur Wirtschaftlichkeit auf 30 m festgelegt.

Für größere Anlagen mit mehreren Sonden muss einerseits die gegenseitige Beeinflussung der Sonden untereinander verstärkt berücksichtigt werden, d.h. die Entzugsleistung je Sonde sinkt in Feldern von mehreren Sonden. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass wenige, längere Sonden im Verhältnis kostengünstiger umzusetzen sind als mehrere, kurze Sonden. Dennoch kann es sein, dass bei Begrenzung durch geringe Bohrtiefen mehrere kurze Sonden überhaupt erst den Betrieb eines Erdwärmesondenfeldes ermöglichen. Eine Bohrtiefenbegrenzung kann durch eine höhere Anzahl an Sonden (bei genügendem Platz) kompensiert werden, so dass das Potenzial ausreichen würde, um z. B. den Wärmebedarf eines Einfamilienhauses abzudecken. In der Praxis jedoch würde aus Kostengründen ein System mit einer hohen Anzahl Sonden bei einem Einfamilienhaus kaum umgesetzt werden. Auch hier ist wieder auf die Motivation der Akteure (Kapitel 6.1) hinzuweisen, d.h. wenn eine hohe Motivation zur Umsetzung vorhanden ist, könnte rein aus dem vorhandenen technischen Potenzial der Wärmebedarf auch mit kurzen Sonden abgedeckt werden. Eine Umsetzung durch die auftretenden, höheren Kosten ist jedoch sehr unwahrscheinlich. Daher wurden hier bei der Berechnung des umsetzbaren Potenzials für die Nutzung von Erdwärmesonden nur Sonden mit einer Länge über 30 m betrachtet.

6.5 Methodik der Potenzialermittlung für Erdwärmekollektoren (EWK)

Die Abschätzung des quantitativen Potenzials für Erdwärmekollektoren (horizontale Systeme) und deren Spezialformen basiert auf einer von der Arbeitsgruppe Oberflächennahe Geothermie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) entwickelten Methodik. Bei dieser Methodik werden die Ausführungen der VDI 4640, Blatt 2 und VDI 4710 mit den digitalen Flächendaten der Bodenkarte und dem Digitalen Geländemodell verknüpft. Der wichtigste Parameter für die Berechnung des Potenzials ist die Bodenart mit ihren charakteristischen, physikalischen Eigenschaften. Zudem werden klimatologische Daten zur Ableitung der Heizgradtage herangezogen, um regionale Durchschnittstemperaturen zu berücksichtigen.

6.5.1 Einführung in die Methodik

Erdwärmekollektoren und deren Spezialformen sind die am nächsten an der Oberfläche verbauten geothermischen Systeme. Sie nutzen die Wärme, die in den obersten 10 m Tiefe des Untergrundes gespeichert ist. Aus diesem Grund kann man bei diesen Anlagen auch von oberflächennahsten Erdwärmesystemen sprechen. Die verfügbare Wärme wird über die Bodentemperatur ermittelt, welche sich aus der Wechselwirkung des Bodens mit der Atmosphäre und der Sonnenstrahlung sowie aus dem Einfluss von Niederschlag ergibt. Dadurch ist die Leistung der Erdwärmekollektoren sowohl von den standörtlichen Bodenbedingungen als auch vom vorherrschenden Klima abhängig. Wichtigster Faktor bei der Potenzialanalyse ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens.

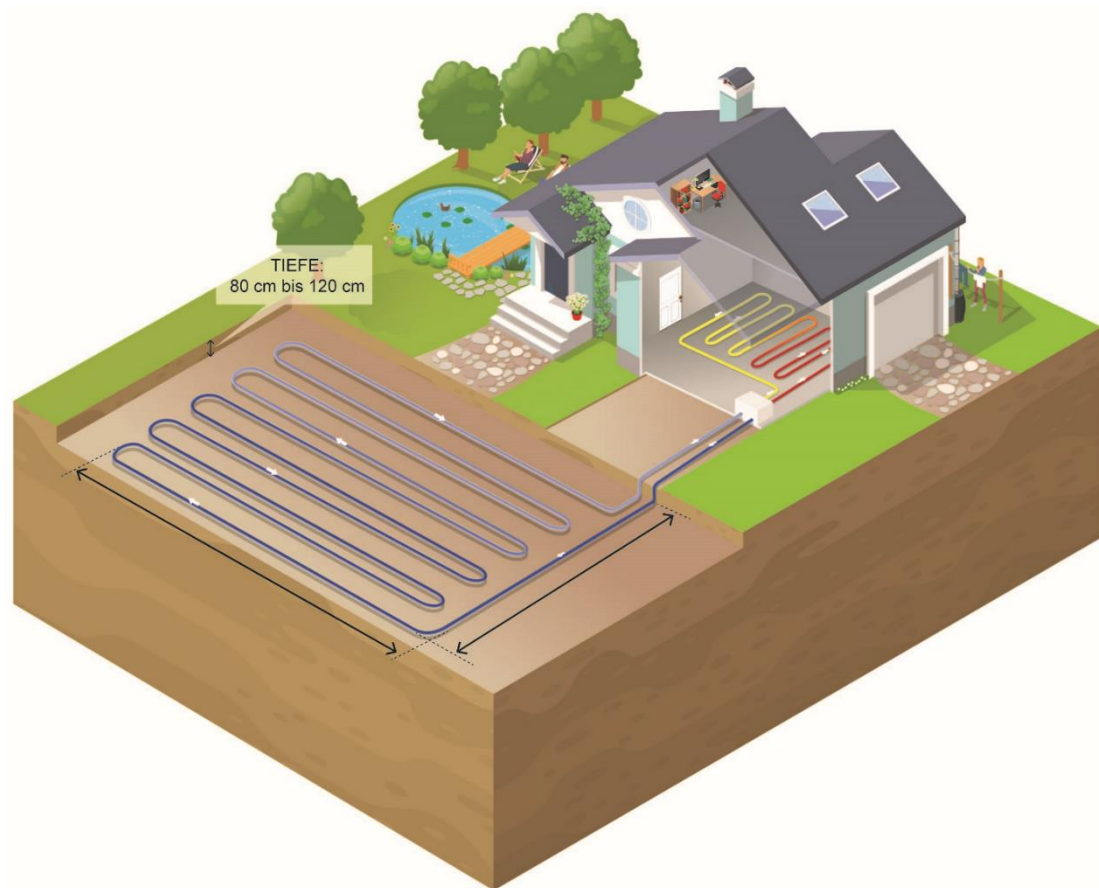


Abbildung 44: Der typische Aufbau eines Erdwärmekollektors
(Quelle: Interreg Alpine Space Programme, Projekt GRETA).

Erdwärmekollektoren sind geschlossene Systeme. In der Regel wird die Wärme dem Boden mithilfe von Kunststoffrohren entzogen, welche in verschiedenen Geometrien unterhalb der Frostgrenze verlegt werden. Durch die Rohre fließt in der Regel ein Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch (Sole). Es existieren viele verschiedene Konstruktionsmöglichkeiten für Erdwärmekollektoren. Neben horizontalen oder vertikalen Kollektoren gibt es Kapillarrohrmatten, zylindrische und konische Erdwärmekörbe, Grabenkollektoren und viele weitere sehr individuell entwickelte Spezialformen. Für die Potenzialermittlung wird ein Referenzsystem horizontaler Kollektoren verwendet, das kleine Anlagen (< 30 kW) abbildet und dem konservativen Ansatz der vorliegenden Studie folgt.

Die Dissertation von Ramming (2007) ist Grundlage für das von der FAU entwickelte Modell zur Bewertung der Entzugsleistung und der Entzugsenergie der oberflächennahsten Geothermiesysteme in der VDI 4640 für wenige Bodenartenhauptgruppen. Um einzelne Bodenarten hinsichtlich Entzugsleistung und Entzugsenergie bewerten zu können, sind die bodenartspezifischen thermischen Bodenparameter entscheidend. Hervorzuheben ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit, welche als Schlüsselparameter auch schon stellvertretend als systemunabhängiges Potenzial für oberflächennahste Geothermiesysteme verwendet werden kann (Bertermann et al. 2015). Nun ist die Wärmeleitfähigkeit im Boden ein sensibler Parameter, welcher in Abhängigkeit anderer bodenphysikalischer Parameter steht wie sie in Bertermann und Schwarz (2017) für ungesättigte und in Bertermann et al. (2018) für gesättigte Bodenverhältnisse behandelt wurden.

Generell beträgt die Einbautiefe (abhängig vom Klima) etwa 1,2 - 1,5 m. Der Kollektor soll in der Regel nicht überbaut werden und mindestens 0,3 m unter der Frostgrenze liegen. Technische Details, die zur Potenzialermittlung notwendig sind, können der VDI 4640 entnommen werden. Zusätzlich zu den

technischen Daten müssen für eine Potenzialbestimmung die klimatischen sowie die standörtlichen Bodenbedingungen berücksichtigt werden. Dazu wurden in dieser Studie die jeweiligen Einflussparameter verknüpft und die Entzugspotenziale für die jeweiligen Systeme in einem Modell in Anlehnung an Schwarz et al. (2022) berechnet. Informationen zu den Klimazonen gibt die DIN 4710.

Die VDI 4640 gibt abhängig von den Systemparametern Klimazone, Bodenart, Wassergehalt und Volllaststunden Entzugsleistungen für Kollektoren in kW/m^2 an. Die für diese Studie verwendeten Informationen zu den Bodenarten entstammen den Flächendaten der Bodenschätzung für Bayern.

Als systemspezifisches geothermisches Potenzial wurden Entzugsleistungen für folgende Systeme bestimmt:

- Horizontaler Kollektor
- zwei Formen von Erdwärmekörpern (1,3 m x 1,3 m und 2 m x 0,5 m)
- Kapillarrohrmatten
- Grabenkollektor

Horizontale Erdwärmekollektoren gelten als das klassische System unter den Kollektoren und dieses weist, aufgrund des einfachen Einbaus (einfache Plastikrohre in großem Abstand und nur in einer horizontalen Ebene verbaut), die geringste Entzugsleistung auf. Spezialformen und individuelle Anpassungen der Kollektorauslegung können durch eine umfassendere Erschließung des „Bodenraumes“ deutlich höhere Entzugsleistungen erreichen. Aber aufgrund des konservativen Ansatzes dieser Studie wird dieses klassische System als Referenzsystem herangezogen.

Die digitalen und georeferenzierten Flächendaten der Bodenschätzungskarten wurden in ein GIS-Projekt implementiert, um für ganz Bayern die entsprechenden Entzugsleistungen und Entzugsenergien zu berechnen. Die Erstellung dieser Potenzialkarten beruht neben den Bodendaten der Bodenschätzung auf Informationen der VDI 4640, Blatt 2 sowie der DIN 4710 und einem Digitalen Geländemodell (DGM 25). Damit stehen neben den bodenkundlichen Flächendaten auch Informationen zur Geländehöhe und zu punktuellen durchschnittlichen Umgebungstemperaturen zur Verfügung. Auf Basis dieser Eingangsdaten wurden unter Zuhilfenahme von Pedotransferfunktionen entsprechende standortspezifische und flächenbezogene Entzugsleistungen sowie Entzugsenergien für gängige bzw. marktübliche oberflächennahste Geothermiesysteme (horizontale Systeme bzw. deren Sonderformen) bayernweit bestimmt. Der Workflow dazu ist nach der GIS-Implementierung in Abbildung 45 dargestellt.

Auf Basis der Klimainformationen konnten Heizgradtage abgeleitet werden, welche mit Hilfe des DGM höhenabhängig für ganz Bayern berechnet wurden. Zusätzlich konnten die Entzugsleistungen mit den Heizgradtagen korreliert werden. Durch die digitale Bodenkarte konnte außerdem der Einfluss unterschiedlicher Bodenarten berücksichtigt werden.

Aufgrund dieser Sensitivität der systemrelevanten Parameter und den sich häufig sehr kleinräumig ändernden Bodenverhältnissen ist die hier abgeleitete und dargestellte Bewertung hinsichtlich Entzugsleistung und Entzugsenergie als Richtwert zu sehen und kann keine auf das Grundstück angepasste Auslegung durch einen Fachplaner ersetzen.

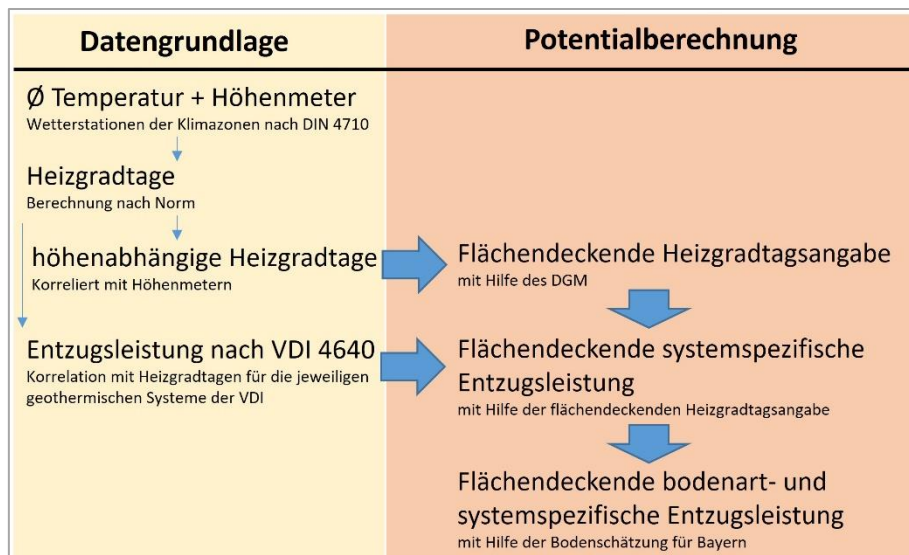


Abbildung 45: Schema der Potenzialberechnung der system- und bodenspezifischen Entzugsleistung.

6.5.2 Beschreibung der Datengrundlage

Für die Zusammenstellung der Datengrundlage werden wieder analog zu den anderen oberflächennahen geothermischen Systemen Ausschluss- und Eignungsgebiete geprüft und festgelegt. Die wichtigsten Parameter für die Ermittlung des geothermischen Potenzials als systemspezifischer Entzugsleistungswert von Erdwärmekollektoren sind die Bodenart und die durchschnittliche Umgebungstemperatur für die regionale Einordnung der bestehenden Informationen aus der VDI 4640.

6.5.2.1 Prüfung der Ausschlussgebiete und Ausweisung von Eignungsgebieten

Ausschlussgebiete

Flächen, die aus rechtlichen Gründen ggf. nicht genutzt werden können, sind bei der Potenzialermittlung speziell zu prüfen (z. B. Wasserschutzgebiete, etc.). Um eine Installation der Technik in diesen Bereichen zu ermöglichen, sind ggf. entsprechende Vorkehrungen (z. B. Verwendung von umweltfreundlichen Wärmeträgermedien) zu treffen.

Eignungsgebiete

In dieser Studie ausgeschlossen wurden auch Flächen mit stark organischen Böden, da diese eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Zusätzlich sind Flächen mit einer Hangneigung von größer als 15 %, anstehender Fels bzw. schlechter Grabbarkeit (siehe UmweltAtlas Bayern (LfU 2023)) oder Flächen mit zu umfassendem Baumbestand und Moore ungeeignet. Diese Gebiete wurden in dieser Studie nicht vorab aus der Berechnung ausgeschlossen, für eine Anlageninstallation ist aber eine Einzelfallprüfung notwendig.

Generell können oberflächennahste Erdwärmesysteme auf allen Flächen installiert werden, auf denen der Bodenaufbau > 1 m Tiefe ist und keine der aufgeführten Kriterien dagegensprechen. Im Bestand ist die zur Verfügung stehende unbebaute Fläche heranzuziehen. Im Neubau können im Einzelfall auch Flächen überbaut werden oder Bauteile an sich aktiviert werden.

6.5.2.2 Bodenschätzungskarte

Die Bestimmung der bodenartspezifischen Entzugsleistung und Entzugsenergie von Erdwärmekollektoren oberflächennahster Geothermiesysteme für Bayern konnte auf Basis der digitalen Bodenschätzungskarte von Bayern (1:5.000) durchgeführt werden. Diese wurde der Arbeitsgruppe an der FAU bereits im Rahmen des Projektes „Erarbeitung eines Handlungsleitfadens

zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potenziale in ländlichen Gemeinden“ für das Amt für Ländliche Entwicklung (ALE) als Teil des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) bereitgestellt. Mit der Karte der Bodenschätzung liegen für die Studie die digitalen Flächendaten zu den benötigten Bodeninformationen für ganz Bayern vor. Die Auflösung dieser Daten mit 1:5.000 ist sehr hoch und ermöglicht eine sehr hoch aufgelöste Potenzialkarte. Demnach stellt die digitale Bodenschätzungskarte im Maßstab 1:5.000 die derzeit bestaufgelöste bodenkundliche Datengrundlage für die Potenzialberechnung in Bayern, aber auch deutschlandweit dar.

6.5.2.3 Digitales Geländemodell

Das verwendete Digitale Geländemodell (DGM 25) wurde mit einem 25 m-Gitter verwendet und ebenfalls als Datengrundlage in das GIS implementiert. Mit Hilfe des DGM werden höhenabhängige Heizgradtage abgeleitet.

6.5.2.4 Klimazonen der DIN 4710 und Klimastationsdaten

Für die Einordnung des jeweiligen Standorts und der standortabhängigen Ableitung der Entzugsleistung wurden die Klimazonen entsprechend der DIN 4710 dem Datensatz hinzugefügt. Eigentlich bestehen diese Klimazonen für ganz Deutschland, wobei einzelne Klimazonen relativ große Areale abdecken (Abbildung 46). Innerhalb der Klimazonen wird aber nicht weiter unterschieden. Deshalb wurden in dem Konzept dieser Studie diese Grunddaten verwendet und mit den Höhenangaben aus dem DGM korreliert. So konnte dieses starre Klimazonenmodell aufgebrochen und regionale und kleinräumige Unterschiede viel besser dargestellt werden.

Als Grundlage dienten somit nicht die Klimazonen an sich. Vielmehr wurden die jeweilige Referenz-Wetterstation und deren Höhe über Normalhöhennull (NHN) benötigt. Für die Berechnung der Heizgradtage mussten zudem die jeweiligen Umgebungstemperaturen im Jahresverlauf eingeholt werden.

6.5.2.5 Systemspezifische Entzugsleistungen

Die VDI 4640, Blatt 2 gibt für jedes System spezifische Entzugsleistungen, Entzugsenergien, Volllaststunden und Rohrabstände in Abhängigkeit der dominierenden Hauptbodenartengruppe sowie Klimazone (entsprechend DIN 4710) an. Das in dieser Studie weiterentwickelte Modell für die oberflächennahen Systeme verknüpft diese Entzugsleistungen mit den standortspezifischen Rahmenbedingungen.

6.5.3 Rasterbezogene Berechnung des umsetzbaren Potenzials (Anwendung für den Energie-Atlas Bayern)

Für die Berechnung des Potenzials von Erdwärmekollektoren ermittelte die FAU Entzugsleistung und Entzugsenergie im Rasterformat. Dazu wurde folgender Ablauf gewählt:

- Verknüpfung der Klimazonen über die Höhe
- Bestimmung der Heizgradtage
- Berechnung des umsetzbaren Potenzials

6.5.3.1 Berechnung des umsetzbaren Potenzials

Generell ist die Ableitung der Entzugsleistung und Entzugsenergie in Anlehnung an die Tabellenwerte zu Entzugsleistungen und Entzugsenergien der VDI 4640 erfolgt. Die VDI 4640 stellt diese für eine Auswahl an sehr oberflächennahen Geothermiesystemen (Horizontale Systeme und deren Sonderformen) bereit, wobei die jeweiligen Entzugsleistungen und -energien für verschiedene über Deutschland verteilte Klimazonen ausgegeben werden. Da diese einzelnen Klimazonen sehr große Bereiche abdecken, wurde ein differenzierterer Ansatz zur Berechnung der jeweiligen Entzugsleistungen entsprechend Schwarz et al. (2022) durchgeführt.

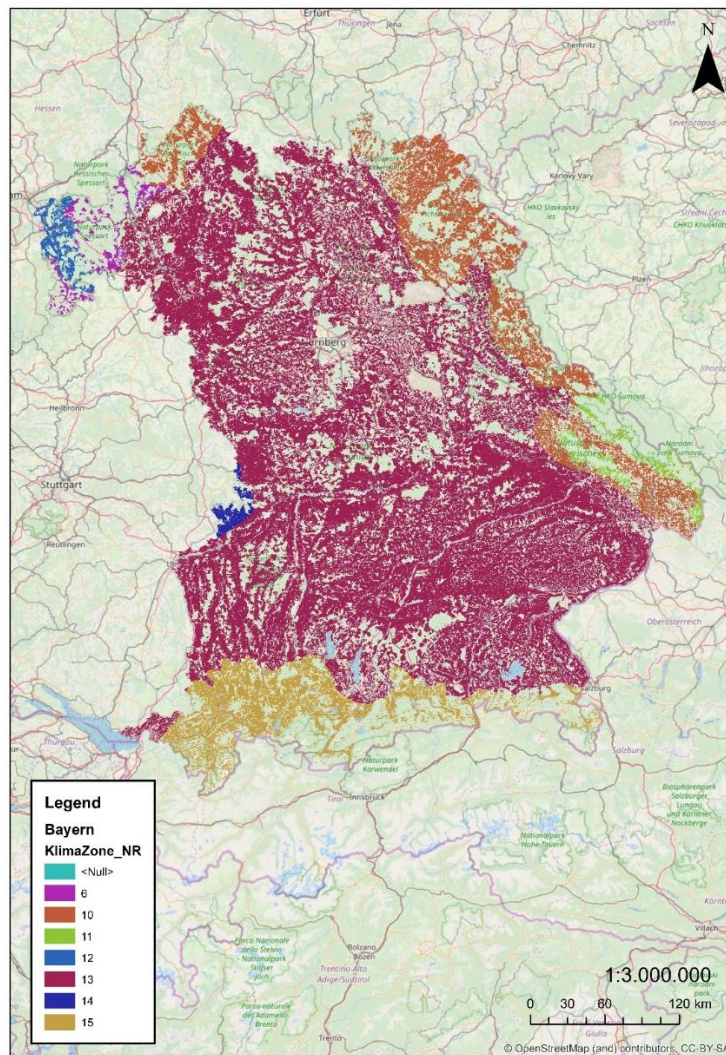


Abbildung 46: Einteilung der Basisdaten aus der Bodenschätzung entsprechend den Klimazonen in Bayern nach DIN 4710, welche den klimatischen Einfluss auf die jeweilige Entzugsleistung begründet.

6.5.3.2 Verknüpfung der Klimazonen über die Höhe

Um diese statische Tabelle für die wenigen Klimazonen aufzubrechen und weiter zu differenzieren, wurden die Informationen der einzelnen Klimazonen mit der Höhe der jeweiligen Referenzlokalität verknüpft. Diese Verknüpfung ist die Basis für die weitere Korrelation mit den berechneten Heizgradtagen.

Tabelle 17: Liste der in der VDI 4640 berücksichtigten und in der DIN 4710 aufgestellten Klimazonen für Deutschland (Auszug aus der Tabelle).

NR.	Lokalität	Höhe [m ü. NHN]	Klimazone
1	Bremerhaven / Norderney	18	(1) Bremerhaven
2	Rostock-Warnemünde / Heiligendamm	13	(2) Rostock-Warnemünde
3	Hamburg-Fuhlsbüttel / Hamburg-Sasel	31	(3) Hamburg-Fuhlsbüttel
4	Potsdam	81	(4) Potsdam
5	Essen / Gelsenkirchen / Bochum	134	(5) Essen
6	Bad Marienberg / Bad Lippspringe	355	(6) Bad Marienberg
7	Kassel	231	(7) Kassel
8	Braunlage	607	(8) Braunlage
9	Chemnitz	418	(9) Chemnitz

10	Hof / Zinnwald	722	(10) Hof
11	Fichtelberg	1213	(11) Fichtelberg
12	Mannheim	96	(12) Mannheim
13	Passau	409	(13) Passau
14	Stötten / Stuttgart-Schnarrenberg	526	(14) Stötten
15	Garmisch-Partenkirchen	596	(15) Garmisch-Partenkirchen

6.5.3.3 Bestimmung der Heizgradtage

Zur Bestimmung der Heizgradtage wurden aus den Wetterdaten bzw. Temperaturdaten der einzelnen Wetterstationen der DIN 4710 die jeweiligen Heizgradtage berechnet (16):

$$\text{Heizgradtage}_{22/14} = \sum (T_{in} - T_{out}) d \quad (16)$$

wobei

$\text{Heizgradtage}_{22/14}$	K d/a	Heizgradtage
T_{in}	°C	Innentemperatur
T_{out}	°C	Außentemperatur
d	d/a	Anzahl der Tage mit Durchschnittstemperatur < 14 °C

Die Berechnung der Heizgradtage erfolgte dabei auf Grundlage der ÖNORM B 8110-5 (Austrian Standards International 2019). Durch den Vergleich mit Referenzprojekten hat sich gezeigt, dass die klimatischen Randbedingungen (zumindest für die Bewertung der Heizphasen) für Bayern besser mit den österreichischen Klimagegebenheiten übereinstimmen als mit den gemittelten Daten für den gesamten deutschen Raum. Den ermittelten Heizgradtage im deutschen Raum entsprechend der VDI 3807 liegen tatsächliche, gebäudespezifische Heizgrenztemperaturen zugrunde und sind daher für die vorliegende Studie nicht anwendbar. Die Heizgradtage nach VDI 3807 liegen bei gutem Energiestandard etwas unter den hier berechneten Werten und würden dadurch zu weniger konservativen Potenzialwerten führen. In der ÖNORM B 8110-5 ist die Innentemperatur (T_{in}) für diese Funktion mit 22 °C definiert, die Außentemperatur (T_{out}) errechnet sich durch die entsprechenden Durchschnittsaußentemperaturen. Berechnet wird die Summe der Differenzen zwischen Heizgrenztemperatur und der durchschnittlichen Außentemperatur an den Tagen (d), deren Durchschnittstemperatur unterhalb von 14 °C liegen.

Die Heizgradtage konnten durch die vorangehende Verknüpfung mit den Wetterstationen der DIN 4710 in Abhängigkeit der Höhe über Normalhöhennull (NHN) dargestellt werden (Abbildung 47).

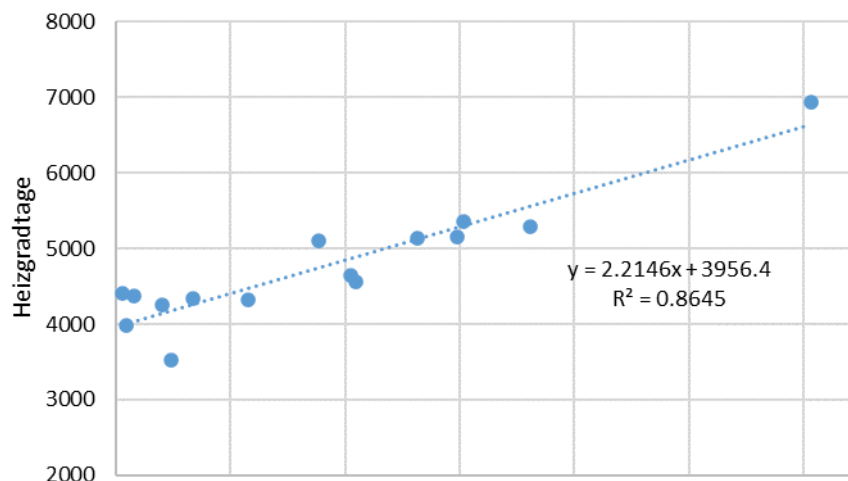


Abbildung 47: Korrelation zwischen den für die jeweiligen Wetterstationen berechneten Heizgradtage und deren Höhe für Deutschland nach Schwarz et al. (2022).

Mit Hilfe dieser Korrelation und unter Verwendung des DGM 25 konnten die vormals punktuellen Angaben der Heizgradtage flächenhaft für das ganze Untersuchungsgebiet ermittelt werden. Dazu wurde die Funktion entsprechend dem linearen Trend der Korrelation verwendet (Gleichung 17):

$$\text{Heizgradtage} = 2,2146 \frac{\text{K d}}{\text{a m}} \text{ Höhe} + 3956,4 \frac{\text{K d}}{\text{a}} \quad (17)$$

wobei

<i>Heizgradtage</i>	K d/a	Heizgradtage
<i>Höhe</i>	m	Höhenmeter ü. NHN

Berechnung der Entzugsleistung

Weiterhin ist die bodenartspezifische sowie systemspezifische Entzugsleistung mit den Heizgradtagen der gleichen Wetterstationen korreliert worden (Beispielhaft Abbildung 48).

Damit wurden für die in der VDI 4640 angewandten Bodenartengruppen Sand, Lehm und Schluff und die in der VDI 4640 aufgelisteten geothermischen Systeme eine Berechnungsgrundlage (Tabelle 18) geschaffen.

Auf der Basis der Heizgradtage als Flächeninformation für ganz Bayern und den bodenspezifischen bzw. systemspezifischen Korrelationen zwischen Entzugsleistung und Heizgradtagen konnte die Entzugsleistung für jeden Standort abgeleitet werden. Für die Ableitung der vorliegenden Bodenartengruppe diente die zur Verfügung gestellte Bodenschätzkarte. Nach Abfrage der Bodenart innerhalb jedes Polygons kann anschließend die Entzugsleistung mit der entsprechenden Entzugsleistungsformel aus Tabelle 18 berechnet werden.

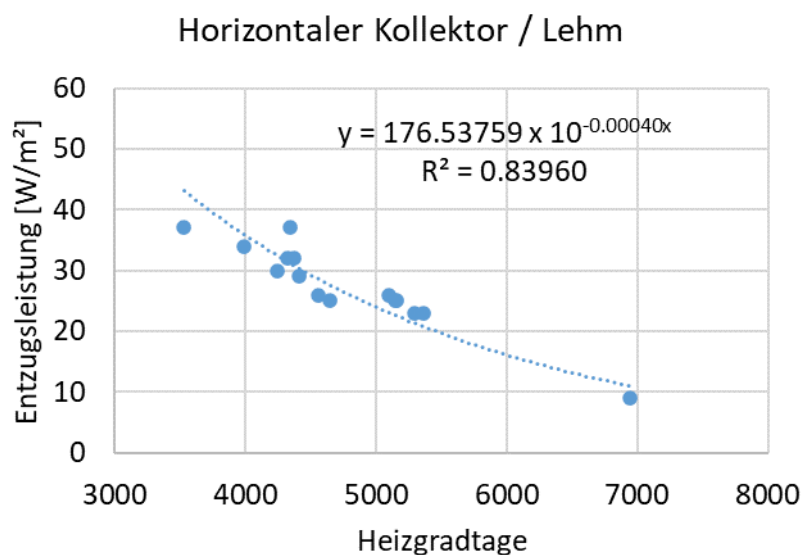


Abbildung 48: Korrelation zwischen den berechneten Heizgradtagen und den Entzugsleistungen der VDI 4640 für das System des Horizontalen Kollektors und der Bodenartenhauptgruppe Lehm.

Tabelle 18: Berechnungsmodell zur Bestimmung der Entzugsleistung verschiedener sehr oberflächennaher Geothermiesysteme auf Basis von Heizgradtagen

Sehr oberflächennahes Geothermie-System	Bodenartengruppe	Berechnung der Entzugsleistung (P) auf Basis der Heizgradtage (x)	
Horizontaler Kollektor	Sand	$P=261.74 \cdot e^{-0.0005667956x}$	[W/m ²]
	Lehm	$P=176.54 \cdot e^{-0.0003992871x}$	[W/m ²]
	Schluff	$P=141.53 \cdot e^{-0.0003357456x}$	[W/m ²]
Kapillarrohrmatten	Sand	$P=971.46 \cdot e^{-0.0008099321x}$	[W/m ²]
	Lehm	$P=146.50 \cdot e^{-0.0003352380x}$	[W/m ²]
	Schluff	$P=152.21 \cdot e^{-0.0003090645x}$	[W/m ²]
Erdwärmekorb 1	Sand	$P=81.67 \cdot e^{-0.0003242691x}$	[W/m ²]
	Lehm	$P=87.27 \cdot e^{-0.0002375047x}$	[W/m ²]
	Schluff	$P=77.37 \cdot e^{-0.0001963163x}$	[W/m ²]
Erwärmekorb 2	Sand	$P=23.05 \cdot e^{-0.0001750295x}$	[W/m ²]
	Lehm	$P=39.96 \cdot e^{-0.0001807998x}$	[W/m ²]
	Schluff	$P=35.13 \cdot e^{-0.0001341375x}$	[W/m ²]
Graben-Kollektor	Sand	$P=49.76 \cdot e^{-0.0001244829x}$	[W/m ²]
	Lehm und Schluff	$P=76.23 \cdot e^{-0.0000715544x}$	[W/m ²]

Im Boden trifft man meistens verschiedene Kornfraktionen an, selten nur reine Sande, Tone oder Schluffe. Daher überwiegt die Verwendung der Bodenartgruppe „Lehm“ bei der Potenzialberechnung der oberflächennahsten geothermischen System in Bayern.

Die Berechnungen der Heizgradtage und der anschließenden standörtlichen Entzugsleistungen wurden über die komplette Fläche von Bayern im Zusammenspiel mit den digitalen Flächendaten des DGM 25 sowie der digitalen Bodenschätzungskarte unter Zuhilfenahme eines Geoinformationssystems (GIS) ausgeführt und visualisiert.

Berechnung der Entzugsenergie

In einem zusätzlichen Schritt wurde die Entzugsenergie auf Basis der Entzugsleistung sowie der Volllaststunden abgeleitet. Dazu wurde folgender Zusammenhang genutzt (Gleichung 18):

$$E = \frac{P \cdot T}{1000} \quad (18)$$

wobei

E	kWh/(a·m ²)	Entzugsenergie
P	W/m ²	Entzugsleistung
T	h/a	Volllaststunden

Da Erdwärmekollektoren oberflächennahst verlegt werden, wurde für die Berechnung der Entzugsenergie weiterhin berücksichtigt, dass in kälteren Regionen eine erhöhte Anzahl an Volllaststunden nötig ist, um den in diesen Regionen erhöhten Heizbedarf zu decken. Zur Ermittlung repräsentativer Volllaststunden für ganz Bayern, wurden die Volllaststunden mit den Höhenmetern der Wetterstationen korreliert (siehe Abbildung 49).

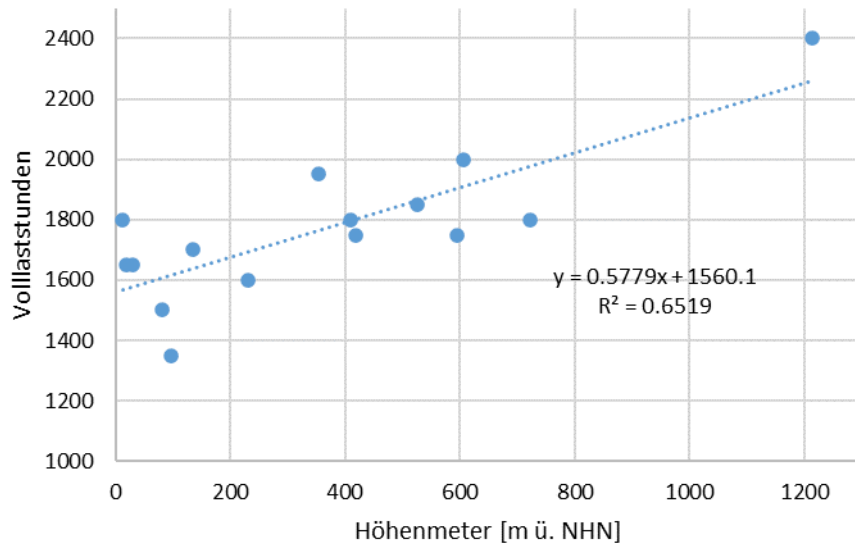


Abbildung 49: Korrelation zwischen der Höhe der einzelnen für die Klimazonen der DIN 4710 repräsentativen Wetterstationen und den empfohlenen Volllaststunden aus der VDI 4640.

Durch diese Korrelation (Gleichung 19) können Volllaststunden für alle Höhen des DGM 25 berechnet werden.

$$\text{Volllaststunden} = 0,5779 \frac{h}{m} * \text{Höhe} + 1560,1 h \quad (19)$$

wobei

<i>Volllaststunden</i>	h	Volllaststunden
<i>Höhe</i>	m	Höhenmeter ü. NHN

Auf diese Weise lassen sich bayernweite Flächendaten zu den nötigen Volllaststunden differenziert und nach Höhenlage im GIS ableiten, mit denen wiederum die standortspezifische Entzugsenergie (Gleichung 18) berechnet werden kann. Für den Berechnungsschritt zur Bestimmung der Entzugsenergie dient die vorher systemspezifisch und flächendeckend bestimmte Entzugsleistung als Basis. Damit kann das systemspezifische Potenzial im Rasterformat sowohl als Entzugsleistung als auch als Entzugsenergie dargestellt werden (siehe Abbildung 50 und Abbildung 51).

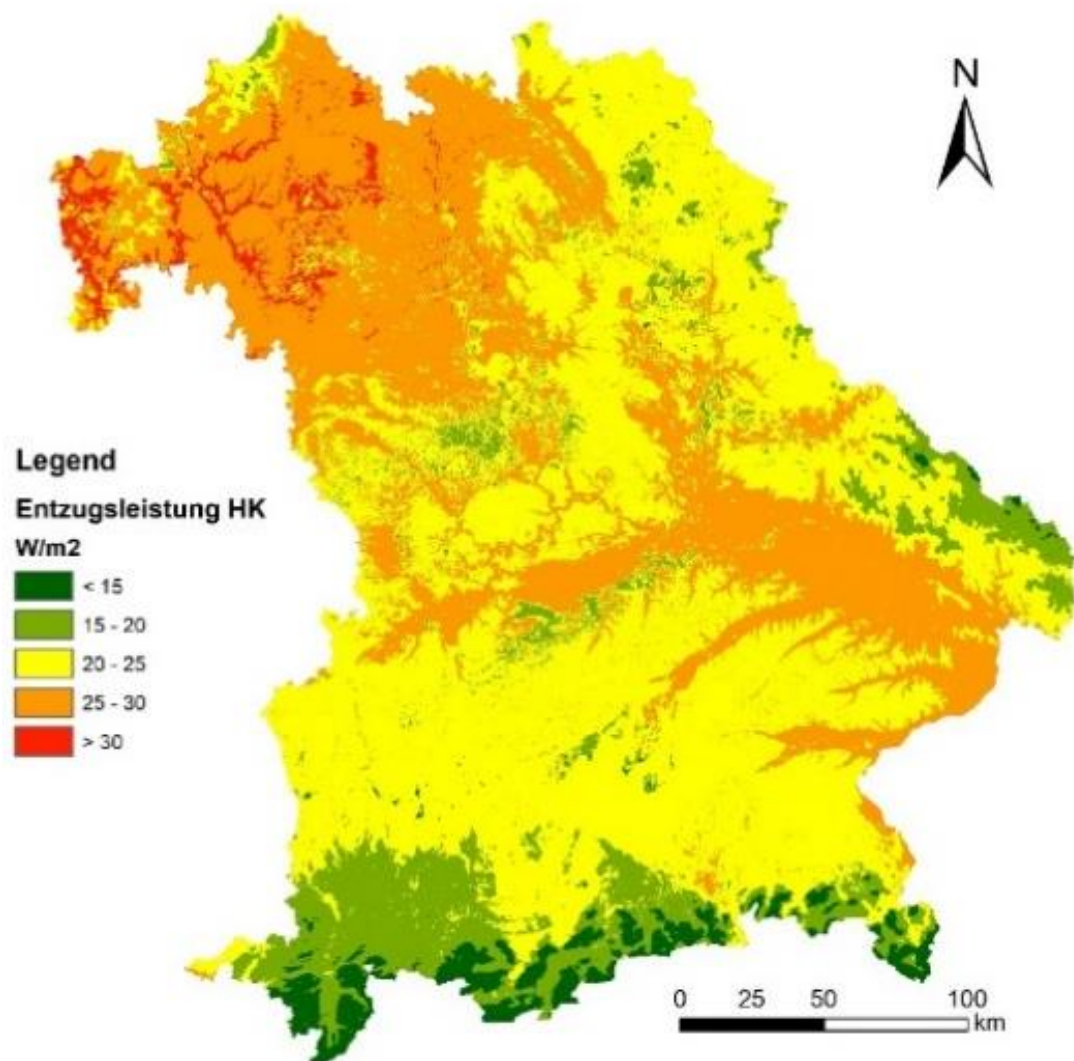


Abbildung 50: Berechnete Entzugsleistung pro m² für horizontale Kollektoren in Bayern

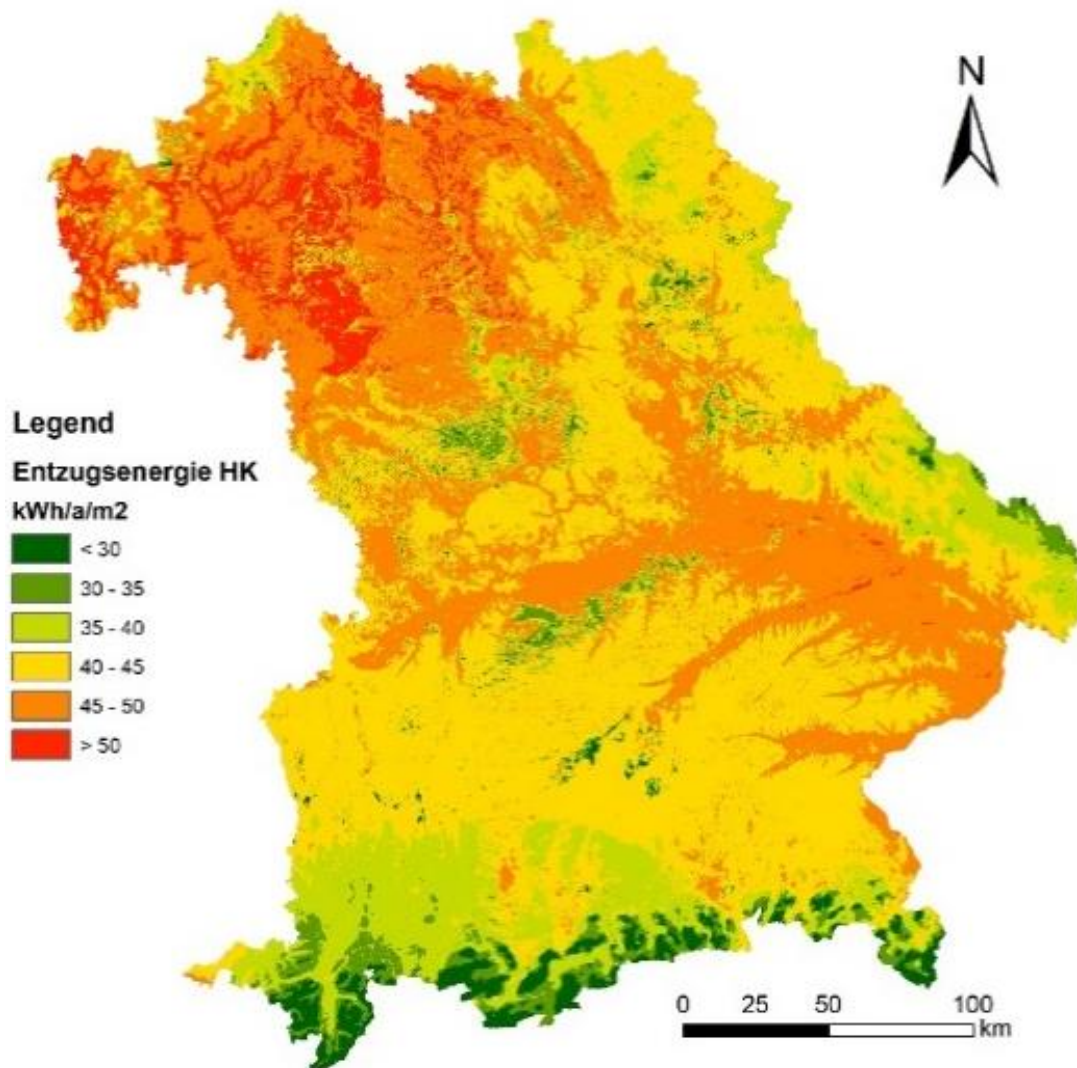


Abbildung 51: Berechnete Entzugsenergie pro m² für horizontale Kollektoren in Bayern

6.5.4 Flurstückbezogene Berechnung des Potenzials (Anwendung für das Mischpult)

Zur weiteren Umsetzung der Berechnung des flurstückbezogenen Potenzials von Erdwärmekollektoren wurde für jedes Flurstück zunächst die zur Verfügung stehende Fläche ermittelt und daraus im Anschluss die dazugehörige Entzugsenergie berechnet.

6.5.4.1 Berechnung der zur Verfügung stehenden Fläche

Für die flurstückbezogene Berechnung des Potenzials für Erdwärmekollektoren wird die zur Verfügung stehende Flächen als Differenz aus Flurstückfläche und Gebäudefläche mit Hilfe der ALKIS Datensätze ermittelt. Dabei müssen Erdwärmekollektoren Grenzabstände zu Gebäuden und Nachbargrundstücken von 1 m einhalten. Die Flurstücke und Gebäudeumrisse wurden dazu mit einem 1 m-Puffer versehen. Die verbleibende Fläche wurde als für Erdwärmekollektoren nutzbare Fläche markiert. Zusätzlich wurde eine maximale Flurstückgröße von 2.000 m² festgelegt, um Flächen wie Wald und Äcker, denen kein Wärmebedarf zugeordnet werden kann, möglichst aus der Analyse auszuschließen.

6.5.4.2 Berechnung der flurstückbezogenen Entzugsenergie

Für alle Flurstücke wird mit Gleichung 20 die flurstückbezogene Entzugsenergie berechnet.

$$P_{HK} = \text{median}(P_{Raster}) * A \quad (20)$$

wobei

P_{HK}	kW	Entzugsenergie des Horizontalkollektors je Flurstück
P_{Raster}	kW/m^2	Entzugsenergie pro m^2
A	m^2	verfügbare Flurstückfläche

6.5.5 Wirtschaftliche Aspekte

Im Gegensatz zu Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden liegen die wirtschaftlichen Einschränkungen bei den horizontalen Systemen und deren Sonderformen weniger in den Kosten als in der benötigten Fläche. Für Anlagen mit 10-30 kW wird bei einem klassischen Kollektor eine Fläche von 400-1.200 m^2 benötigt. Bei Spezialformen wie beispielsweise dem Ringgrabenkollektor oder Slinky benötigt man rund 75-225 m Graben. In urbanen Räumen und Ortskernen ländlicher Gebiete stehen diese Flächen selten am Stück zur Verfügung. Je nach Geometrie bzw. System können die Kollektoren aber standortbedingt platzsparend in einzelnen Segmenten bzw. Strängen installiert werden. Oberflächennahste Systeme haben zudem weniger genehmigungsrechtliche Auflagen und können somit nahezu flächendeckend und mit handelsüblichen und allorts verfügbaren Tiefbaugeräten installiert werden.

Da trotz des Kostenvorteils der oberflächennahsten Geothermiesysteme eine nutzbare Fläche, um ausschließlich Flächenkollektoren zu installieren, meist nicht gegeben ist, werden häufig verschiedene erdgekoppelte Systeme kombiniert. Eine Kombination verschiedener Wärmequellen ergibt vor allem bei einem größeren Wärmebedarf beispielsweise für ganze Quartiere Sinn. Zudem können durch eine Kombination die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Systeme kompensiert, beziehungsweise deren Synergien genutzt werden.

7 Umsetzbares Potenzial der oberflächennahen Geothermie

Das umsetzbare Potenzial zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie für die Beheizung eines Gebäudes ist zum einen durch das naturräumliche, hydrogeologische Potenzial am Standort bestimmt und zum anderen durch die Wärmenachfrage und damit die bauphysikalischen Eigenschaften sowie die Nutzung des jeweiligen Gebäudes. Beide Aspekte sind im Rahmen des gegenständlichen Projektes in Form flächendeckender Analysen bayernweit untersucht und in umfangreichen Geodatenätzen aufbereitet. Diese bilden die Grundlage für die weitere Abschätzung des Potenzials zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Bayern.

Zunächst werden Methoden dargestellt, die eine Bestimmung des gebäudeweisen Potenzials für jede der drei Wärmequellen – Grundwasserbrunnen, Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren – erlauben. Anschließend werden die einzelnen Potenziale in einem Syntheseschritt zu einem „Gesamtpotenzial oberflächennahe Geothermie“ vereint.

7.1 Einbeziehung des Wärmebedarfs im Gebäudebestand in die Potenzialanalyse

Um die Potenziale zur Nutzung von Grundwasserwärme, Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren zu ermitteln, wird eine Methode in Anlehnung an VDI 4640 verwendet, die das flurstückweise ausgewiesene geothermisch-technische Potenzial aufgreift und der Nachfrage der Bestandsgebäude auf dem jeweiligen Flurstück gegenüberstellt. Gebäudeseitig werden zwei Szenarien betrachtet:

- 1) Im ersten Schritt werden Gebäude ausgenommen, deren Heizwärmebedarf (HWB) einen Grenzwert von 100 kWh/(m²a) (LfU (2015), Deutsche Umwelthilfe (2023)) überschreitet. Die Abdeckung von Teillasten wird hier nicht beachtet. Die Verwendung dieses Grenzwertes wurde durch die Absprache mit dem LfU vorgegeben. Damit soll berücksichtigt werden, dass aus wirtschaftlichen Erwägungen für diese Gebäude ggf. andere Heizformen gewählt oder die Gebäude zunächst auf einen höheren Wärmestandard gehoben werden sollten. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hier um einen Orientierungswert für die Potenzialabschätzung handelt. Im Einzelfall müssen bei der Einschätzung, ob ein Gebäude für Wärmepumpen geeignet ist, weitere Aspekte z. B. die mögliche Vorlauftemperatur, einbezogen werden. Dieses Szenario dient als Ausgangslage für die im Projekt vorgenommene Potenzialabschätzung (= IST-Zustand mit Grenzwert HWB 100 kWh/m²a).
- 2) Im zweiten Schritt wird das Untergrundpotenzial auf den sanierten Gebäudebestand nach Kapitel 5.2 bezogen. Diese Betrachtung berücksichtigt, dass mit dem Ziel der Klimaneutralität der Wärmebedarf im Gebäudebestand nach allen derzeit gängigen Energiesystemanalysen deutlich abnehmen wird. Die energetische Sanierung bzw. die sinkende Wärmenachfrage ermöglicht oftmals erst die ausreichende Wärmeversorgung von Gebäuden auf Standorten mit begrenzten Untergrundpotenzialen. Dieses Szenario gilt als Endpunkt für die im Projekt vorgenommene Potenzialabschätzung (= Maximalsanierung mit Grenzwert HWB 100 kWh/m²a).

Weiterhin ist eine Jahresarbeitszahl (JAZ) für den Betrieb der Wärmepumpentechnologie je Gebäudetyp festzulegen. Demnach wird der Gebäudebestand zunächst in folgende Kategorien unterteilt:

- 3) Nutzung einer Grundwasser-/erdgekoppelten Wärmepumpe nicht wirtschaftlich / technisch nicht möglich
- 4) Nutzung einer Grundwasser-/erdgekoppelten Wärmepumpe für Raumwärme und Warmwasserbereitung technisch und wirtschaftlich möglich: JAZ = 3
- 5) Nutzung einer Grundwasser-/erdgekoppelten Wärmepumpe für Raumwärme technisch und wirtschaftlich möglich: JAZ = 4

Bei der Betrachtung der Struktur des Gebäudebestands in Bayern ergeben sich für o. g. Szenarien in der Summe folgende Wärmenachfragen (siehe Tabellen 19 und 20). Es handelt sich hierbei zunächst um ein gebäudeseitiges Potenzial (GEB-Potenzial). Ergibt sich im nächsten Schritt (siehe Kapitel 7.2) auch ein geeignet hohes Untergrundpotenzial, so können die Gebäude maximal mit oberflächennaher Geothermie versorgt werden. In den folgenden Unterkapiteln wird auf diese Ausgangszahlen jeweils Bezug genommen.

Tabelle 19: Energiebezugsfläche und Wärmenachfrage des Gebäudebestands im IST-Zustand bei einem Grenzwert von 100 kWh/m²a (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	GEB-Potenzial HBW ≤ 100 kWh/m²a	kein GEB-Potenzial HBW > 100 kWh/m²a	GEB-Potenzial HBW ≤ 100 kWh/m²a	kein GEB-Potenzial HBW > 100 kWh/m²a
Wohngebäude	110,7	778,2	7.613,3	130.082,9
GHD	11,6	104,7	880,4	13.244,8
Öffentlich	35,1	72,7	2.440,8	11.250,5
Gesamt	157,4	955,6	10.934,5	154.578,2

Tabelle 20:
Energiebezugsfläche und Wärmenachfrage bei maximaler Sanierung des Gebäudebestandes und einem Grenzwert von 100 kWh/m²a (vgl. Szenario 2)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	GEB-Potenzial HBW ≤ 100 kWh/m²a	kein GEB-Potenzial HBW > 100 kWh/m²a	GEB-Potenzial HBW ≤ 100 kWh/m²a	kein GEB-Potenzial HBW > 100 kWh/m²a
Wohngebäude	837,2	51,6	45.963,8	6.001,3
Öffentlich	63,1	44,7	3.698,9	6.647,2
GHD	95,5	20,7	7.236,9	2.385,4
Gesamt	995,8	117,0	56.899,6	15.033,9

7.2 Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Grundwasserwärme

Die als potenziell geeignet identifizierten Gebäude (HBW ≤ 100 kWh/m²a) werden in einem nächsten Schritt dem geothermisch-technischen (in diesem Falle hydrogeologischen) Potenzial am Standort beziehungsweise des jeweiligen Flurstücks gegenübergestellt. Basis bildet hierfür die Entzugsleistung, welche aus dem hydrogeologischen Modell für jedes Flurstück mit Potenzial entnommen werden kann.

$$\sum_{Geb} P_{t,Geb} * \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) \triangleq P_{th,Flurstück} \quad (21)$$

wobei

$P_{t,Geb}$	W	Heizleistung Gebäude
$P_{th,Grundstück}$	W	Thermische Entzugsleistung Flurstück
JAZ	-	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Für Bayern ergeben sich nach Abgleich der gebäudeseitigen Potenziale mit dem flurstückweisen, hydrogeologischen Potenzial folgende umsetzbare Potenziale für die Nutzung von Grundwasser zur Beheizung des Gebäudebestands (ONG-Potenzial):

Tabelle 21: Bayernweites umsetzbares Grundwasserwärmepotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	32,6	856,3	2.266,3	135.429,9
Öffentlich	5,7	102,1	357,8	13.333,5
GHD	2,4	113,9	181,3	13.944,0
Gesamt	40,6	1.072,3	2.805,4	162.707,4

Tabelle 22: Bayernweites umsetzbares Grundwasserpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 2)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	228,9	659,9	12.296,8	39.668,3
GHD	21,4	94,9	1.619,5	8.002,8
Öffentlich	7,8	100,0	304,0	10.042,1
Gesamt	258,1	854,8	14.220,3	57.713,3

7.3 Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Erdwärmesonden

Die als potenziell geeignet identifizierten Gebäude werden nun dem geologischen Potenzial am Standort beziehungsweise des jeweiligen Flurstücks gegenübergestellt. Basis bildet hierfür die mögliche Anzahl an Sonden, die Bohrtiefenbegrenzung bzw. maximale Sondenlänge sowie die spezifische Entzugsleistung, die aus dem hydrogeologischen Modell für jedes Flurstück mit Potenzial entnommen werden können. Als Wirtschaftlichkeitsgrenzwerte für Sondenbohrungen wurde eine Mindestsondenlänge von 30 m und eine Mindestentzugsleistung von 1,2 kW je Sonde festgelegt.

$$\sum_{Geb} Q_{t,Geb} * \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) \triangleq P_{Sonde,Flurstück} * n_{Sonde,Flurstück} * btb_g * T \quad (22)$$

wobei

$Q_{t,Geb}$	kWh	Wärmenachfrage Gebäude
$P_{Sonde,Flurstück}$	W	Thermische Entzugsleistung je Sonde
$n_{Sonde,Flurstück}$	-	Maximale Anzahl an Sonden
btb_g	m	Bohrtiefenbegrenzung
T	h/a	Volllaststunden pro Jahr
JAZ	-	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Für Bayern ergeben sich nach Abgleich der gebäudeseitigen Potenziale mit dem flurstückweisen, geologischen Potenzial folgende umsetzbare Potenziale für die Nutzung von Erdwärmesonden zur Beheizung des Gebäudebestands (ONG-Potenzial):

Tabelle 23: Bayernweites umsetzbares Erdwärmesondenpotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	37,6	851,3	2.539,1	135.157,1
Öffentlich	4,9	102,9	281,4	13.409,9
GHD	2,0	114,3	149,9	13.975,3
Gesamt	44,4	1.068,5	2.970,5	162.542,3

Tabelle 24: Bayernweites umsetzbares Erdwärmesondenpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 2)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	315,4	573,4	17.598,6	34.366,5
GHD	18,4	97,8	1.395,9	8.226,4
Öffentlich	7,0	100,7	251,2	10.094,9
Gesamt	340,9	772,0	19.245,7	52.687,8

7.4 Ermittlung des Potenzials zur Nutzung von Erdwärmekollektoren

Die als potenziell geeignet identifizierten Gebäude werden in einem nächsten Schritt dem geologischen Potenzial am Standort beziehungsweise des jeweiligen Flurstücks gegenübergestellt. Basis bilden hierfür die spezifische Entzugsleistung sowie die verfügbare Flurstückfläche, die aus dem hydrogeologischen Modell für jedes Flurstück mit Potenzial entnommen werden können.

$$\sum_{Geb} Q_{t,Geb} * (1 - \frac{1}{JAZ}) \triangleq P_{Raster,Flurstück} * A_{Flurstück} * T \quad (23)$$

wobei

$Q_{t,Geb}$	<i>kWh</i>	Wärmenachfrage Gebäude
$P_{Raster,Flurstück}$	<i>kW</i>	Thermische Entzugsleistung pro m² Kollektorfläche
$A_{Flurstück}$	<i>m²</i>	verfügbare Kollektorfläche des Flurstücks
T	<i>h/a</i>	Volllaststunden pro Jahr
JAZ	-	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Für Bayern ergeben sich nach Abgleich der gebäudeseitigen Potenziale mit dem Flurstückweisen, geologischen Potenzial folgende umsetzbare Potenziale für die Nutzung von Erdwärmekollektoren zur Beheizung des Gebäudebestands (ONG-Potenzial):

Tabelle 25: Bayernweites umsetzbares Erdwärmekollektorenpotenzial, begrenzt auf die Gebäude, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	65,7	823,2	4.427,3	133.269,0
Öffentlich	9,1	98,7	489,1	13.202,2
GHD	3,7	112,6	276,2	13.849,0
Gesamt	78,4	1.034,5	5.192,6	160.320,2

Tabelle 26: Bayernweites umsetzbares Erdwärmekollektorpotenzial bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 2)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	580,7	308,1	32.205,9	19.759,2
GHD	29,9	86,4	2.264,8	7.357,5
Öffentlich	15,1	92,6	522,5	9.823,6
Gesamt	625,8	487,1	34.993,2	36.940,3

7.5 Synthese des technologieübergreifenden Potenzials

Zur Ausweisung des gesamten Potenzials der oberflächennahen Geothermie zur Beheizung des bayrischen Gebäudebestands wurden alle drei untersuchten Technologiepotenziale zusammengeführt. Zusammengefasst stellen sich die einzelnen ONG-Potenziale wie folgt dar:

Tabelle 27: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf die **Energiebezugsfläche** des bayerischen Gebäudebestands, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		
	Erdwärmekollektor	Erdwärmesonde	Grundwasserwärme
Wohngebäude	65,7	37,6	32,6
Öffentlich	9,1	4,9	5,7
GHD	3,7	2,0	2,4
Gesamt	78,4	44,5	40,6

Tabelle 28: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf den **Heizwärmebedarf** des bayerischen Gebäudebestands, die im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 1)

	Wärmebedarf in GWh/a		
	Erdwärmekollektor	Erdwärmesonde	Grundwasserwärme
Wohngebäude	4.427,3	2.539,1	2.266,3
Öffentlich	489,1	281,4	357,8
GHD	276,2	149,9	181,3
Gesamt	5.192,6	2.970,5	2.805,4

Tabelle 29: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf die **Energiebezugsfläche** bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 2)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		
	Erdwärmekollektor	Erdwärmesonde	Grundwasserwärme
Wohngebäude	580,7	315,4	228,9
Öffentlich	29,9	18,4	21,4
GHD	15,1	7,0	7,8
Gesamt	625,8	340,9	258,1

Tabelle 30: Bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial aller drei Technologien bezogen auf den **Heizwärmebedarf** bei maximaler Sanierung, begrenzt auf die Gebäude, die im Sanierungszustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweisen (vgl. Szenario 2)

	Wärmebedarf in GWh/a		
	Erdwärmekollektor	Erdwärmesonde	Grundwasserwärme
Wohngebäude	32.205,9	17.598,6	12.296,8
Öffentlich	2.264,8	1.395,9	1.619,5
GHD	522,5	251,2	304,0
Gesamt	34.993,2	19.245,7	14.220,3

Da die Potenziale jedoch räumlich sehr differenziert sind und sich teils überlagern, ist eine flurstückscharfe Synthese der Potenziale erforderlich, die über die technischen Potenziale der einzelnen Technologien erfolgt: Grundwasserwärme, Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren. Das Potenzial sowie ggf. vorliegende Überlagerungen werden hier einbezogen, um die theoretisch maximale Abdeckbarkeit durch alle Technologien abzubilden. Die Berücksichtigung dieser Potenziale und Überlagerungen ermöglicht es, die theoretisch maximale Abdeckbarkeit unter den erfolgten Annahmen und Grenzwerten durch die oberflächennahen geothermischen Technologien zu quantifizieren.

Hierbei wird hervorgehoben, dass die theoretische maximale Abdeckbarkeit nicht immer praktisch umsetzbar ist. Es können lokale technische, wirtschaftliche oder umweltbezogene Einschränkungen auftreten, die die tatsächliche Nutzung der geothermischen Ressourcen begrenzen können.

Das gesamte umsetzbare Potenzial für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie zur Beheizung des Gebäudebestands unter diesen Randbedingungen ergibt sich demnach zu:

Tabelle 31: **Gesamtes bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial**, begrenzt auf den bayerischen Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweist (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	88,7	800,1	6.055,4	131.640,8
Öffentlich	14,0	93,8	833,2	12.858,1
GHD	5,9	110,4	445,4	13.679,8
Gesamt	108,6	1004,3	7.334,1	158.178,7

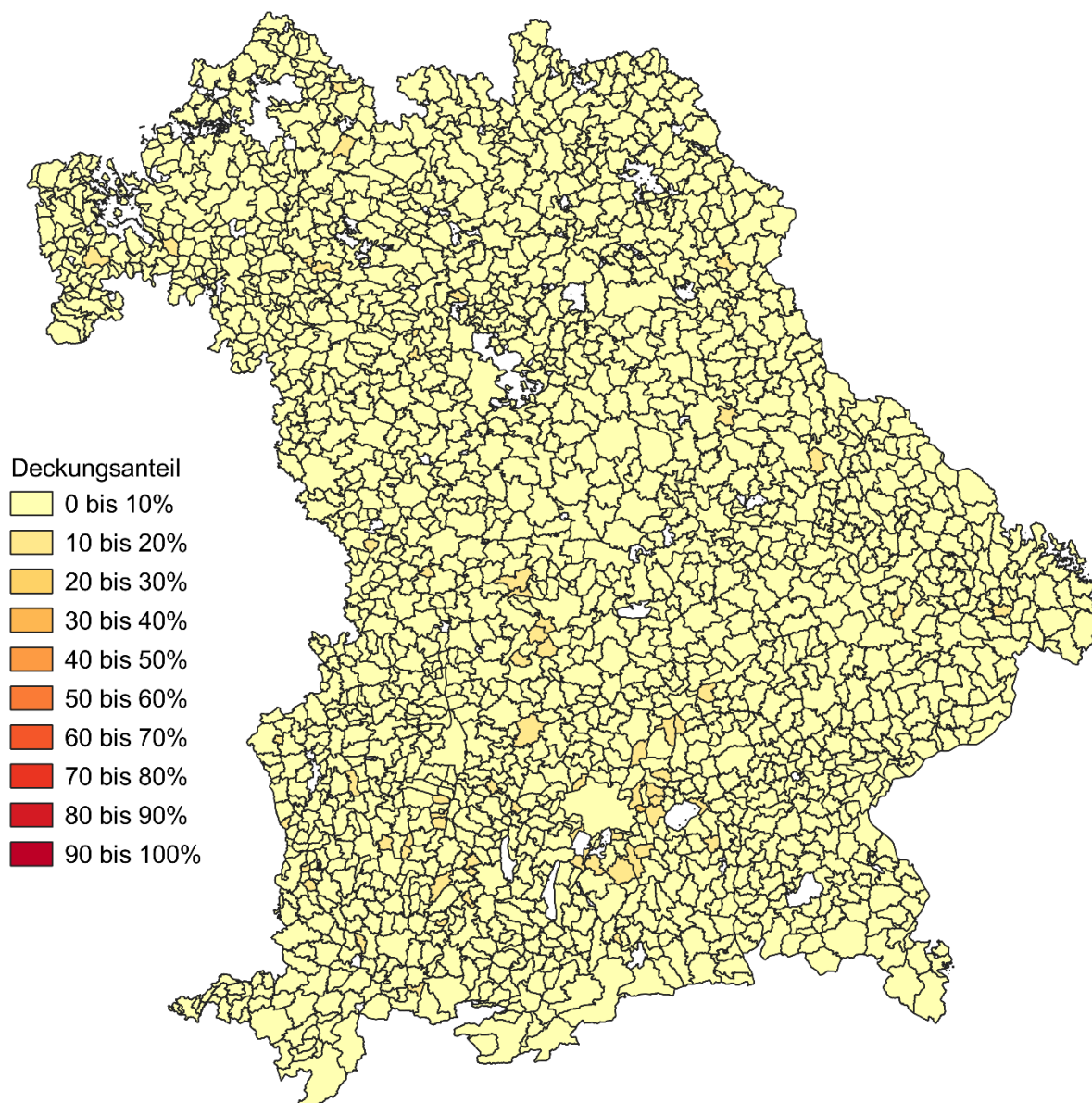


Abbildung 52: Deckungsanteil des Heizwärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie je Gemeinde, begrenzt auf den Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweist (vgl. Szenario 1).

Tabelle 32: **Gesamtes bayernweites umsetzbares ONG-Potenzial bei maximaler Sanierung**, begrenzt auf den bayerischen Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweist (vgl. Szenario 1)

	Energiebezugsfläche in Mio. m ²		Wärmebedarf in GWh/a	
	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial	ONG-Potenzial	kein ONG-Potenzial
Wohngebäude	709,2	179,6	39.068,7	12.896,5
GHD	51,6	64,7	3.909,6	5.712,7
Öffentlich	20,5	87,3	758,8	9.587,3
Gesamt	781,3	331,6	43.737,1	28.196,4

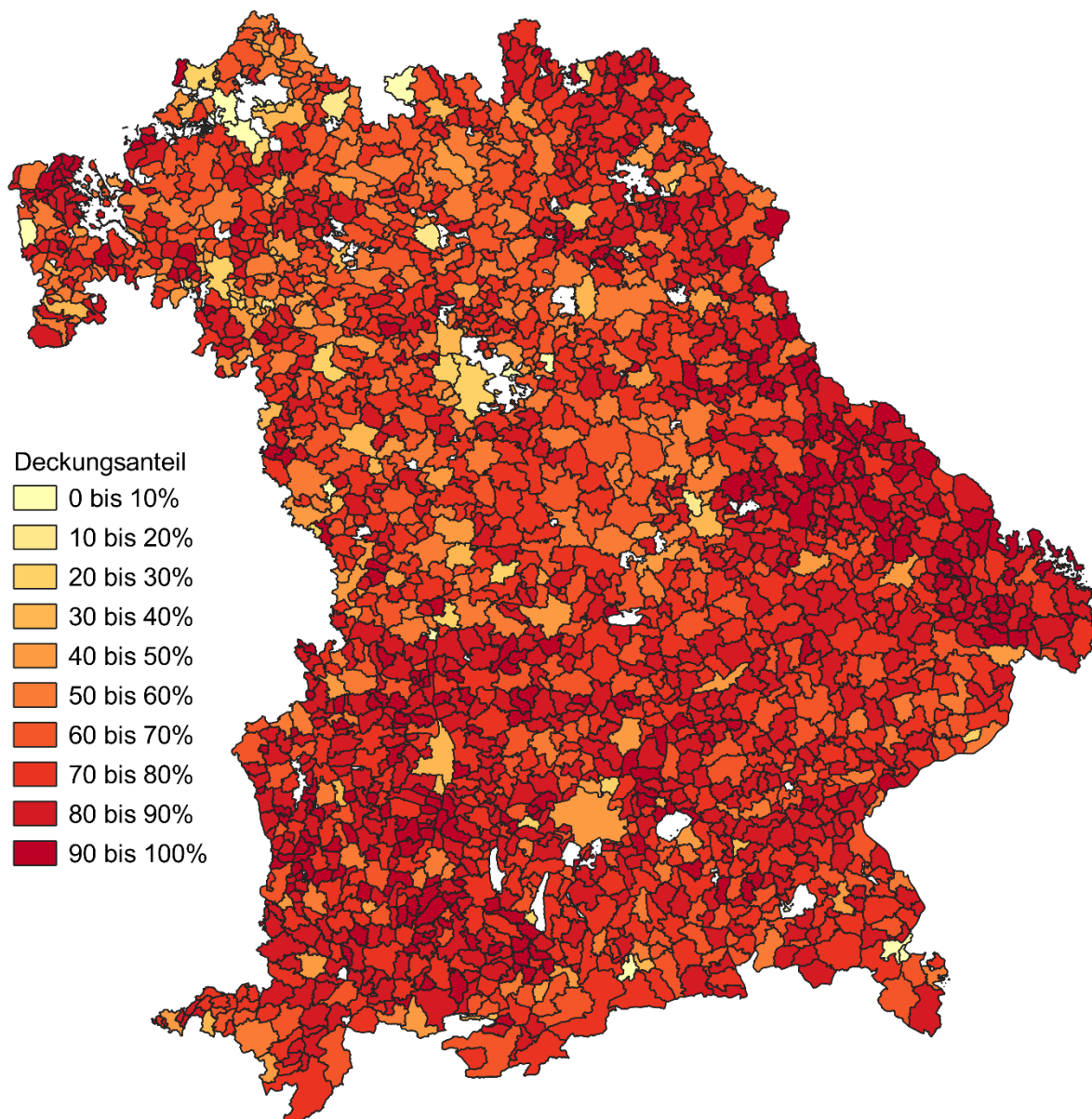


Abbildung 53: Deckungsanteil des Heizwärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie bei maximaler Sanierung je Gemeinde, begrenzt auf den Gebäudebestand, der im IST-Zustand einen Wärmebedarf unter 100 kWh/m²a aufweist (vgl. Szenario 2).

Durch energetische Sanierung kann der Anteil des Gebäudebestands, der durch oberflächennahe geothermische Technologien versorgt werden kann, deutlich erhöht werden. Bayernweit sind durch die energetische Sanierung 71,4 % der Energiebezugsfläche durch oberflächennahe Geothermie versorgbar, sowie 61,9 % der Wärmenachfrage. Dies steht dem Anteil vor energetischer Sanierung von 10 % (Energiebezugsfläche) und 4,5 % (Wärmenachfrage) gegenüber (siehe Tabelle 33).

Zu beachten ist, dass hier keine Teillasten betrachtet wurden, sondern in die prozentuale Abschätzung nur Gebäude mit einem Grenzwert von 100 kWh/(m²a) eingegangen sind, die vollständig über die oberflächennahe Geothermie versorgt werden können (siehe Kapitel 7.1). Durch die energetische Sanierung kann die Deckung somit um 61,4 % der Energiebezugsfläche und 57,4 % der Wärmenachfrage gehoben werden. Aufgrund der energetischen Sanierung geht der Anstieg des Deckungsanteils mit einer Reduzierung der absoluten Wärmenachfrage einher. Diese hier aufgeführten Zahlen verdeutlichen die Bedeutung der energetischen Sanierung im Kontext des Ausbaus der oberflächennahen Geothermie in Bayern.

Tabelle 33: Versorgbarer Anteil der Energiebezugsfläche sowie des Wärmebedarfs des Gebäudebestandes durch geothermische Technologien vor und nach der Sanierung

Deckungsanteil Energiebezugsfläche in Mio. m ²		Deckungsanteil Wärmebedarf in GWh/a	
vor Sanierung	nach Sanierung	vor Sanierung	nach Sanierung
10,0 %	71,4 %	4,5 %	61,9 %

8 Fazit und Diskussion der Analyse

Oberflächennahe Geothermiesysteme wie Grundwasserwärmepumpen, Erdwärmesonden und horizontale Erdwärmekollektoren sind in der Lage, einen großen Teil des Wärmebedarfs in Bayern zu decken. Sie zeichnen sich durch eine Reihe von Vorteilen aus (z. B. Born et al., 2022): Skalierbarkeit, Heizen und Kühlen, Umweltverträglichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Flächenverbrauch, Wirtschaftlichkeit, Sektorkopplung, Unabhängigkeit, Effizienz. In der vorliegenden Studie wurde das technische und umsetzbare Potenzial für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie mit einem konservativen Ansatz bayernweit ermittelt, d.h. Eingangsparameter und Rahmenbedingungen bei der Potenzialbestimmung wurden so gewählt, dass ein minimal mögliches umsetzbares Potenzial bestimmt wurde. Dadurch soll vermieden werden, dass lokal ein Potenzial ausgewiesen wird, dass unter Umständen (z. B. durch die Verwendung von vorteilhafteren Rahmenbedingungen) dort so nicht in der praktischen Umsetzung erreicht werden kann.

8.1 Diskussion der verwendeten Datengrundlage

Für die Durchführung der Potenzialanalysen zur oberflächennahen Geothermie wurde hauptsächlich auf die Datengrundlage des LfU zurückgegriffen. Diese ist über hauptsächlich bei der TUM vorhandene Detailanalysen ergänzt worden. Lücken in der Datengrundlage wurden versucht über vereinfachte Verfahren und Abschätzungen zu schließen. Bei der Analyse zu den Erdwärmekollektoren waren zudem detaillierte Bodenschätzkarten von Seiten des ALE/StMELF verfügbar.

Die Ausschlussgebiete beruhen auf aktuellen genehmigungsrechtlichen Vorgaben und sind von Seiten des LfU erstellt worden. Hierbei ist zu beachten, dass sich bei einer Änderung dieser Vorgaben und ihrer Auslegung die Anwendungsflächen oberflächennaher geothermischer Systeme deutlich ändern können und somit auch das umsetzbare, bayernweite Potenzial.

Die Potenzialanalyse der Erdwärmesonden beruht im Wesentlichen einmal auf den verfügbaren Abschätzungen zu den Wärmeleitfähigkeiten im Untergrund, die vom LfU erhoben wurden, und den Bohrtiefenbegrenzungen. Bei Letzteren ist zu erwähnen, dass zu einigen wenigen Teilflächen noch keine Bestimmung der Bohrtiefenbegrenzung vorlag. In einem Teil dieser Gebiete wurde die Bohrtiefenbegrenzung in Abstimmung mit dem LfU und unter Verwendung von Bohrdateninformationen im Projekt abschätzend definiert.

Für die Analyse des Potenzials zur Nutzung von Grundwasserwärmepumpen wurden in einem ersten Schritt, neben den Ausschlussgebieten, die vom LfU ausgewiesenen Eignungsgebiete aus der Standortinformation des UmweltAtlas Bayern herangezogen. Dabei war festzustellen, dass einige geologisch geeignet erscheinende Bereiche (alluviale Schotterablagerungen) nicht in den Eignungsgebieten integriert waren. Diese wurden hier ebenfalls in Absprache mit dem LfU nach geologischen Gesichtspunkten ergänzt. Für größere Bereiche der geeigneten Gebiete zur thermischen Nutzung des Grundwassers lagen keine detaillierten Grundlagendaten zur Verfügung (siehe Kapitel 6.3.2.8). Hier wurde versucht, die Datengrundlage zur Bestimmung des umsetzbaren Potenzials über Bohrungsinformation aus dem BIS-Bayern, analoge Annahmen mittels des DGM (hydraulisches Gefälle, Flurabstände) und Literaturwerten (Durchlässigkeitsbeiwerte) zu ergänzen. Die relevanten Informationen für die Analyse (z. B. grundwassererfüllte Mächtigkeit, kf-Werte, etc., siehe Kapitel 6.3.2) wurden gemittelt und ganzheitlich auf die jeweilige Fläche übertragen. Räumliche Variationen innerhalb dieser Eignungsgebiete konnten dabei im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Die Mittelung über Medianwerte weicht dabei etwas vom Ansatz einer streng konservativen Annahme ab. Da jedoch größere Flächen betrachtet werden, wurde eine Zuweisung von Minimalwerten für die gesamten Flächen als zu wenig repräsentativ eingeschätzt und der Medianwert als statistisch signifikanter Wert verwendet. Diese Gebiete wurden als Potenzialflächen mit einer Datenqualität

„mittlerer Güte“ gekennzeichnet. Insbesondere hier können in der Realität lokal deutliche Abweichungen von dem in dieser Studie ausgewiesenen umsetzbaren Potenzial auftreten.

8.2 Versorgungsanteil von oberflächennahen geothermischen Systemen in Bayern

Mit den gesetzten Rahmenbedingungen und den angesetzten Grenzwerten der vorliegenden Analyse ergibt sich, dass etwa 10 % der Energiebezugsfläche bzw. 4,5 % der Wärmenachfrage durch oberflächennahe geothermische Systeme in Bayern versorgt werden können. Um im Gebäudebestand den Anteil zu erhöhen, spielt die energetische Sanierung der Gebäude eine wichtige Rolle, wie dies auch in der Analyse deutlich wird. Durch sie kann der Anteil der Wärmebedarfsabdeckung durch oberflächennahe geothermische Systeme auf 71,4 % bzw. 61,9 % angehoben werden. Dieser Anstieg der Abdeckung des Wärmebedarfs verdeutlicht die Bedeutung der energetischen Sanierung im Kontext des Ausbaus der oberflächennahen Geothermie in Bayern und stellt damit einen indirekten strategischen Baustein zur verstärkten Umsetzung der Sektorenkoppelung und damit zu einer erfolgreichen Umsetzung der Wärmewende dar. Diese Betrachtung berücksichtigt, dass mit dem Ziel der Klimaneutralität der Wärmebedarf im Gebäudebestand nach allen derzeit gängigen Energiesystemanalysen deutlich abnehmen wird.

Bezüglich der relativ geringen Abdeckung des Wärmebedarfs im Ist-Zustand des Gebäudebestands ist aber nochmals anzumerken, dass in der Analyse keine Abdeckung von Teillasten betrachtet wurde und nur Gebäude berücksichtigt wurden, die vollständig über oberflächennahe Geothermie bei einem Grenzwert von 100 kWh/(m²·a) versorgt werden können (siehe Kapitel 7.1). Damit soll berücksichtigt werden, dass aus wirtschaftlichen Erwägungen für diese Gebäude ggf. andere Heizformen gewählt oder wie oben dargestellt, die Gebäude zunächst auf einen höheren Wärmestandard gehoben werden sollten. Andere Studien, wie etwa die „Roadmap oberflächennahe Geothermie“ (Born et al., 2022) berücksichtigen in ihren Analysen diese konservativ gewählten Grenzwerte nicht, da in der Praxis die oberflächennahe Geothermie durchaus als Teillastabdeckung umgesetzt wird, bzw. die Wärmepumpentechnologie generell auch im Bereich des Gebäudebestands bei einem höheren Wärmebedarf erfolgreich eingesetzt werden kann (z. B. Günther et al., 2020). So wird die oberflächennahe Geothermie beispielsweise zur Grundlastabdeckung eingesetzt und Spitzenlast oder Warmwasser werden durch eine kombinierte Energiequelle abgedeckt (z. B. Koenigsdorff, 2011). Bei einer Beachtung der Eignung auch bei höheren Lasten oder Teillastabdeckungen wird die prozentuale Abdeckung des Wärmebedarfs in Bayern durch die oberflächennahe Geothermie in der Analyse signifikant höher.

Darüber hinaus ist mit einzubeziehen, dass sich die vorliegende Abschätzung auf den aktuellen Gebäudebestand bezieht. Im Neubau mit den heutigen Energiestandards wird das vorhandene, technische Potenzial der oberflächennahen geothermischen Systeme häufig genutzt. In der aktuellen Diskussion zur kommunalen Wärmewende besteht weiter die Herausforderung, lokale erneuerbare Potenziale zur Abdeckung des Wärmebedarfs von Quartieren oder Wohnblöcken ausweisen zu können. Dafür eignen sich in erster Linie Nahwärmenetze (bzw. Kalte Nahwärmenetze). Die oberflächennahe Geothermie stellt für solche Netze eine passende Energiequelle dar und wird dafür oft eingesetzt (z. B. Wirtz et al., 2022). Für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Nahwärmenetzen muss die Lokalität der Quelle nicht deckungsgleich (auf dem gleichen Grundstück/Flurstück) mit dem Standort des Wärmebedarfs sein. Diese Nutzungsart der oberflächennahen Geothermie wird in der vorliegenden Analyse nicht mit betrachtet, jedoch liegt hier eine vielversprechende Anwendung der oberflächennahen geothermischen Technologie, welche das hier analysierte Abdeckungspotenzial in der Realität weiter anhebt.

Generell können oberflächennahe geothermische Systeme bayernweit nahezu flächendeckend eingesetzt werden. Insbesondere bei Erdwärmekollektoren bestehen kaum Ausschlussflächen für ihren Einsatz. Ihre Verwendung ist besonders im urbanen Raum durch die nur begrenzt zur Verfügung

stehenden Flächen für eine Installation auf einzelnen Grundstücken bzw. Flurstücken limitiert. Aber aufgrund der geringen genehmigungsrechtlichen Ausschlussgebiete und da die Erdwärmekollektoren als oberflächennahste Technologie auch in verschiedensten geologischen Rahmenbedingungen anwendbar sind, weisen sie, trotz generell geringerer einzelner Entzugsleistungen, summarisch das größte Potenzial der drei betrachteten oberflächennahen geothermischen Systeme in Bayern auf.

Erdwärmesonden zeigen ein etwas niedrigeres Gesamtpotenzial, das im Wesentlichen durch die in Bayern geltenden Bohrtiefenbegrenzungen beschränkt ist. Nach Auskunft von Planungs- und Bohrungsfirmen sind Erdwärmesonden erst ab Bohrtiefen größer als 30 m bzw. sogar 60 m wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar. Auf 31 % der Fläche in Bayern ist das Bohren von Erdwärmesonden grundsätzlich nicht erlaubt und auf weiteren 15 % können Erdwärmesonden nur flacher als 30 m abgeteuft werden (Abbildung 54). Diese 46 % der Fläche Bayerns fallen in der Analyse als Potenziale heraus. Zusätzlich ist die Bohrtiefe in weiteren 17 % der Fläche auf unter 60 m beschränkt. Diese Fläche wurde zwar in der Analyse als mögliches Potenzial für Erdwärmesonden berücksichtigt, jedoch müssen hier aufgrund der geringen Tiefe meist mehrere Sonden auf einem Flurstück gebohrt werden, um die Wärme des Gebäudes abdecken zu können. Dieser Platz ist aber auf einem Flurstück mit Gebäude oftmals begrenzt. Mehrere Erdwärmesonden, die auf einem Flurstück platziert werden, können sich durch ihre Nähe auch beeinflussen und weisen dadurch eine etwas geringere Entzugsleistung auf, was in der Analyse berücksichtigt wurde (Kapitel 6.4.3). Durch diese Aspekte verringert sich das analysierte Potenzial zur Nutzung von Erdwärmesonden zusätzlich. Optimale Bedingungen für die Umsetzung von Erdwärmesonden in Bayern mit erlaubten Bohrtiefen über 100 m sind lediglich in 20 % der Fläche vorzufinden. Dies erklärt den geringeren Deckungsanteil des Wärmebedarfs von Erdwärmesonden-Systemen in der vorliegenden Studie.

Der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen ist natürlicherweise auf die Lokalisationen beschränkt, bei denen eine grundwasserführende, geologische Schicht (Grundwasserleiter) in erreichbarer Tiefe vorhanden ist. Wiederum aufgrund der bestehenden Bohrtiefenbegrenzung fokussiert sich die vorliegende Analyse auf die oberflächennahen, quartären Grundwasserleiter. Diese stellen die relevantesten Grundwasserleiter für die oberflächennahe thermische Nutzung dar. Tieferliegende Grundwasserstockwerke, aber auch oberflächennahe Grundwasserleiter, die z. B. in tertiären Horizonten liegen, wurden nicht in die Analyse mit aufgenommen, um die genehmigungsrechtlichen Anforderungen in jedem Fall mit hoher Sicherheit zu gewährleisten. Hier können stellenweise in Bayern durchaus Potenziale für eine thermische Grundwassernutzung vorhanden sein. Diese konnten aber in einem bayernweiten Ansatz im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Die großen Potenziale für die thermische Grundwassernutzung liegen dabei im Süden Bayerns in den weiträumigen, glazio-fluviatilen Flächen. Insgesamt umfassen diese geologisch und genehmigungsrechtlich (Ausschlussflächen wie Trinkwasserschutzgebiete und Bohrtiefenbegrenzung) geeignete Gebiete ca. 16 % der Fläche Bayerns. Diese begrenzte Eignungsfläche erklärt auch (neben den oben genannten Aspekten), dass die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen die geringste Abdeckung des Wärmebedarfs der drei betrachteten geothermischen Systeme in Bayern erzielt, obwohl sie in der Regel die effizienteste Technologie (nach JAZ) anbietet.

Bei der thermischen Nutzung des Grundwassers ist weiterhin zu betrachten, dass eine gegenseitige Beeinflussung benachbarter Anlagen durch die Dynamik des Grundwassers auftreten kann. In der vorliegenden Studie konnten im Abstrom des Injektionsbrunnens entstehende Kältefahnen, die eine im Grundwasserstrom nachfolgende Anlage negativ beeinflusst, nicht berücksichtigt werden. Einzelne ausgewiesene Potenziale in der Fläche können sich dadurch in der Umsetzung verringern. Hier wurde vereinfacht angenommen, dass alle Grundwasserwärmepumpen umgesetzt werden. In der Regel entstehen, natürlich auch in Abhängigkeit der hydrogeologischen Verhältnisse, bei kleinen Anlagen auch nur geringe Kältefahnen. Bei größeren Anlagen und in dicht besiedelten Gebieten muss eine gegenseitige negative Beeinflussung jedoch deutlicher berücksichtigt werden.

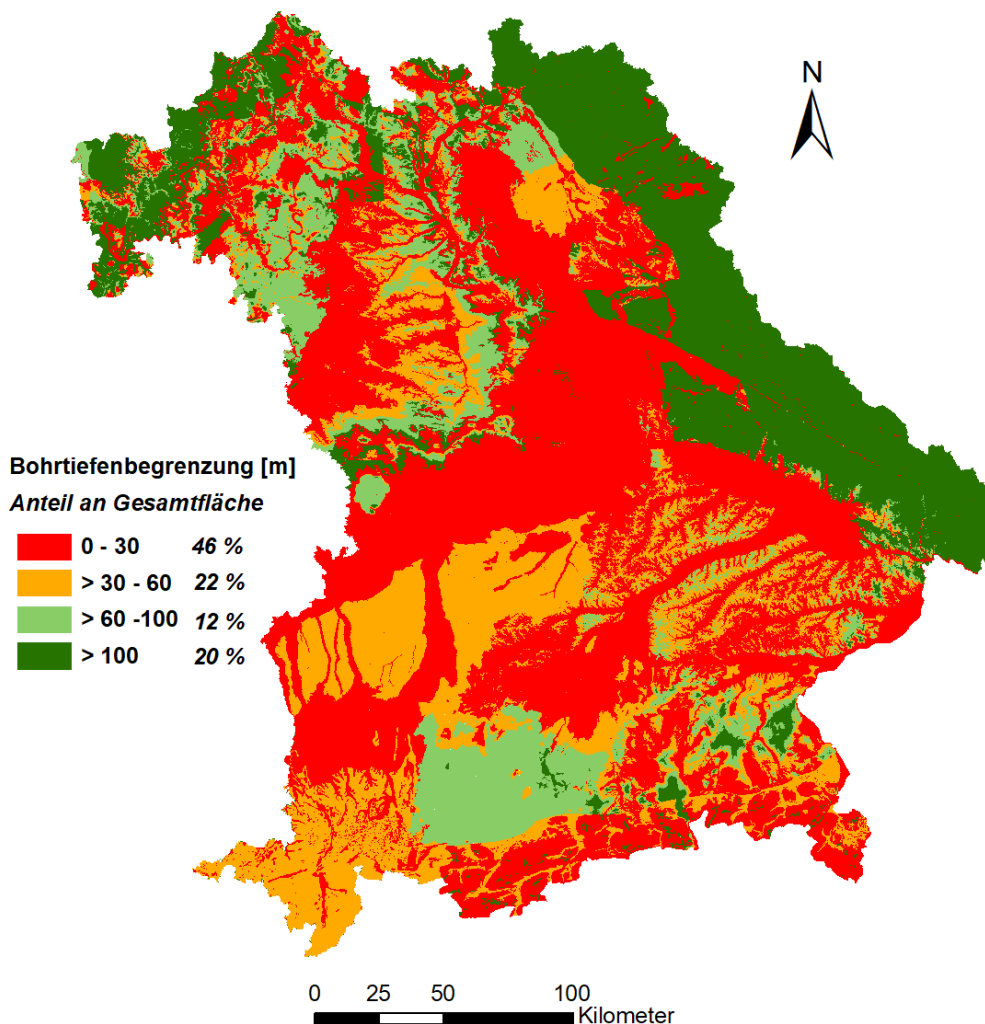


Abbildung 54: Darstellung prozentualer Anteile von relevanten Flächen mit Bohrtiefenbegrenzung in Bayern.

Eine Detailstudie für die Stadt München, in der dieser Sachverhalt untersucht wurde, kam zu dem Ergebnis, dass ca. 60 % der Grundwasserwärmepumpen in diesem Gebiet mit sehr hoher Wärmebedarfsdichte und enger Besiedlungsstruktur ohne irgendeine Beeinflussung anderer Anlagen umgesetzt werden konnten (Watzlowik, 2018). Nebenbei ist zu beachten, dass sich der Untergrund und damit das Grundwasser in urbanen Räumen durch die fortschreitende Urbanisierung und klimatischen Veränderungen über die Jahre erwärmt (Menberg et al., 2013, Böttcher et al., 2022). Damit stehen zum einen in Städten erhöhte Quelltemperaturen für die Nutzung von grundwassergeführten Wärmepumpen zur Verfügung, die ihre Effizienz steigern. Zum anderen entsteht der ökologische Nebeneffekt, dass die thermische Nutzung des Grundwassers zur Wärmebedarfsabdeckung die Untergrund- bzw. Grundwassertemperatur reduzieren und den zusätzlichen Wärmeeintrag bilanziell in den urbanen Räumen ausgleichen kann.

Wichtig herauszustellen ist, dass in der vorliegenden Studie das Potenzial der oberflächennahen Geothermie nur hinsichtlich des Wärmebedarfs ausgewertet wurde. Von zunehmender Bedeutung ist jedoch auch der Einsatz zu Kühlzwecken. Dass oberflächennahe geothermische Systeme sowohl zum

Heizen als auch zum Kühlen (passiv und aktiv) eingesetzt werden können, stellt einen der großen Vorteile dieser Technologie dar. Vorwiegend bedingt durch die Folgen des Klimawandels und der Urbanisierung, die zu intensiveren urbanen Wärmeinseln führen, wächst der zukünftige Kühlbedarf, so dass die Kühlanwendung, auch für die Gebäudeklimatisierung, an Bedeutung gewinnt. Bei der saisonalen Nutzung (Wärme und Kälte) oberflächennaher geothermischer Systeme steigt einmal die Effizienz der Systeme (Regeneration der Systeme, höhere verfügbare Quelltemperaturen) sowie natürlich die Abdeckung des Energiebedarfs und damit auch ihr umsetzbares Potenzial.

Weiter bieten die oberflächennahen geothermischen Systeme auch die Möglichkeit der Wärmespeicherung. Dies spielt insbesondere im Rahmen von Nahwärmenetzen eine bedeutende Rolle und kann zur Effizienzsteigerung durch die Sektorkopplung beitragen. Auch dieser Aspekt ist bei der vorliegenden Analyse nicht integriert. Je nach Potenzial und Wärmebedarf können auch verschiedene erdgekoppelte Systeme kombiniert werden. Dies ist insbesondere bei großem Wärmebedarf oder in Quartieren wiederum in Nahwärmenetzen sinnvoll. Zudem können durch eine Kombination die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Systeme kompensiert beziehungsweise deren Synergien genutzt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die oberflächennahe Geothermie bayernweit eingesetzt werden und einen signifikanten Teil des Wärmebedarfs in Bayern abdecken kann, insbesondere wenn die energetische Sanierung der Gebäude voranschreitet und Teillastabdeckungen Berücksichtigung finden. Zusätzliche Vorteile der oberflächennahen Geothermie wie Kälteversorgung, Wärmespeicherung und die Nutzung als Energiequelle in Wärmenetze erhöhen das dargestellte umsetzbare Potenzial der Technologie weiter.

9 Literaturverzeichnis

- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Adv) (2018): ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM unter <https://www.adv-online.de/icc/extdeu/nav/a63/binarywriterservlet?imgUid=9201016e-7efa-8461-e336-b6951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>
- Austrian Standards International. ÖNORM B 8110-5, 2019, Wärmeschutz im Hochbau – Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile. Wien: Austrian Standards International, 2019.
- Bay StMUGV (2007): Oberflächennahe Geothermie - Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund - Ein Überblick für Bauherren, Planer und Fachhandwerker in Bayern
- Bayerische Vermessungsverwaltung BVV, 2018: Kundeninformation LoD2 Gebäudemodelle, Stand 3/2018; abgerufen am 20.10.2022 unter https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/6723/Kundeninformation_LoD2.pdf
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (BStMWi) (2022): Energiedaten.Bayern – Schätzbilanz (Daten bis zum Jahr 2021)
- Bertermann, D., Klug, H., & Morper-Busch, L. (2015). A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy Potenzials. *Renewable energy*, 75, 335-347.
- Bertermann, D., & Schwarz, H. (2017). Laboratory device to analyse the impact of soil properties on electrical and thermal conductivity. *International Agrophysics*, 31(2), 157.
- Bertermann, D., Müller, J., Freitag, S., & Schwarz, H. (2018). Comparison between measured and calculated thermal conductivities within different grain size classes and their related depth ranges. *Soil Systems*, 2(3), 50.
- Böttcher, F., Casasso, A., Götzl, G., Zosseder, K. (2019): TAP - Thermal aquifer Potenzial: A quantitative method to assess the spatial Potenzial for the thermal use of groundwater. *Renewable Energy*, 142, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.086>
- Böttcher, F., Zosseder, K. (2022): Thermal influences on groundwater in urban environments – A multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich, *Science of The Total Environment* 810(4). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152193>
- Born, H., Bracke, R., Eicker, T. & Rath, M. (2022): Roadmap Oberflächennahe Geothermie, Erdwärmepumpen für die Energiewende - Potenziale, Hemmnisse und Handlungsempfehlungen. Fraunhofer IEG, Bochum 2022. <https://doi.org/10.24406/publica-70>,
- Deutsche Umwelthilfe (2023): Faktenpapier Wärmepumpe. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/W%C3%A4rmepumpen/300623_Waermepumpen_Faktenpapier_Neuaufgabe_Digital.pdf
- DIN 4710, Statistics on German Meteorological Data for Calculating the Energy Requirements for Heating and Air Conditioning Equipment; DIN, Beuth Publishing House: Berlin, Germany, 2003
- Günther, D., Wapler, J., Langner, R., Helmling, H., Miara, M., Fischer, D., Zimmermann, D., Wolf, T. & Wille-Hausmann, B. (2020): WPSMART IM BESTAND - Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen so wie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Abschlussbericht FKZ 03ET1272A: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wpsmart-im-bestand.html>.

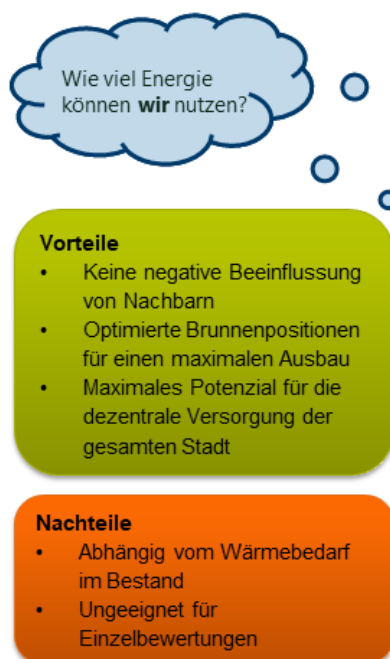
- Hörner, M., Bischof, J. (2022): Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt
- LfU (2023): Bayerisches Landesamt für Umwelt, UmweltAtlas, abgerufen am 22.08.2023 unter <https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/kartendienste/UmweltAtlas/index.htm>
- LfU (2015): Mischpult „Wärme“ Information zur Berechnung. https://www.energieatlas.bayern.de/sites/default/files/Berechnung_Mischpult_Waerme_2022.pdf
- Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt 2015. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcope/2015_IWU_LogeEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf
- Menberg K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *Sci of Total Environ.*, 442: 123-133.
- Koenigsdorff, R. (2011). Oberflächennahe Geothermie für Gebäude.: Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. –Fraunhofer IRB Verlag, 323 S.
- Ramming, K. (2007): Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle (Doctoral dissertation), Dresden, Techn. Univ.
- Schubert, J. [UBA] (2018): Jahresarbeitszahlen von Elektro-Wärmepumpen im Feldtest. UBA-Grafik; www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#Effizienz, abgerufen am 26.10.2023.
- Schwarz, H., Jovic, N., & Bertermann, D. (2022). Development of a Calculation Concept for Mapping Specific Heat Extraction for Very Shallow Geothermal Systems. *Sustainability*, 14(7), 4199.
- Schwarz H., Jovic N., Bertermann D. (2022): Development of a Calculation Concept for Mapping Specific Heat Extraction for Very Shallow Geothermal Systems. *Sustainability* 14, 4199. <http://doi.org/10.3390/su14074199>
- StMWi (2019): Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, Ergebnisbericht des Energiegipfels-AG1
- VDI 4640-2—Technical Rule 4640-2, Thermal Use of the Underground, Ground Source Heat Pump Systems; VDI, Beuth Publishing House: Berlin, Germany, 2019.
- Watzlowik, J. (2018): Kopplung von Potential- und Nachfragemodellen zur thermischen Grundwassernutzung am Beispiel der Landeshauptstadt München. Unveröff. Masterarbeit am Lehrstuhl Hydrogeologie der Technischen Universität München, 51 S.
- Wirtz, M., Schreiber, T. & Müller, D. (2022): Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany. *Energy Technol.* 10, 2200749. DOI: 10.1002/ente.202200749.

10 Anhang: Räumliches Potenzial und Potenzial von Baublöcken

Um auf kommunaler Ebene Aussagen zur maximalen Versorgung des Bestandes treffen zu können, kann für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen zusätzlich zum umsetzbaren Potenzial ein räumliches Potenzial der thermischen Grundwassernutzung bestimmt werden. Im Gegensatz zum umsetzbaren Potenzial, das ein „egoistisches“ maximales Potenzial ohne Berücksichtigung möglicher Nachbarnutzungen darstellt, beschreibt das räumliche Potenzial den maximalen Ausbau der thermischen Grundwassernutzung in einem bestimmten Gebiet (siehe Abbildung 55). Hierbei wird die Temperaturanomalie, die sich vom Schluckbrunnen jeder Anlage im Grundwasserleiter ausbreitet, als thermischer Fußabdruck berücksichtigt.

Im Wasserrecht gilt für die Genehmigung von neuen thermischen Nutzungen das „first come – first served“ Prinzip. Existierende Anlagen sind entsprechend wasserrechtlich geschützt, was bedeutet, dass während des Zeitraums der wasserrechtlichen Genehmigung negative thermische oder hydraulische Einflüsse auf bestehende benachbarte Anlagen vermieden werden müssen (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009). In der Beurteilungspraxis wird hier üblicherweise eine Temperaturveränderung von mehr als 1 K gegenüber der natürlichen Grundwassertemperatur als maßgeblich angesehen. Dieses Vorgehen verhindert, dass oberstromige Nutzer einer Anlage stromabwärts die Wärme abgraben, indem sie ihre Schluckbrunnen im Zustrom eines stromabwärts gelegenen Förderbrunnens installieren und so die Kältefahne in der Anlage stromabwärts zu Effizienzeinbußen führt.

Räumliches Potenzial



Technisch umsetzbares Potenzial

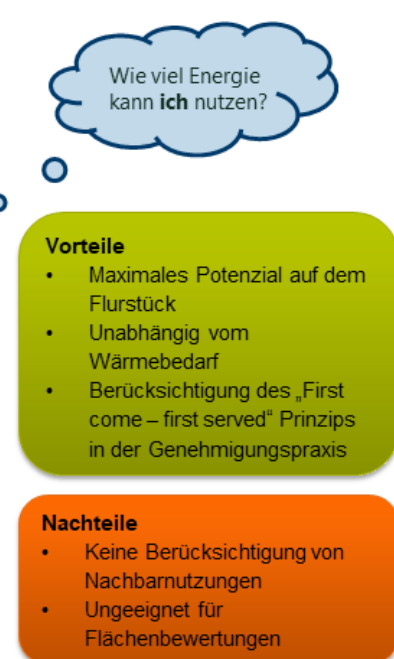


Abbildung 55: Vor- und Nachteile bei der Interpretation der verschiedenen Potenzialevaluationen.

Aufgrund des thermischen Fußabdrucks von Grundwasserwärmepumpen entsteht ein Flächenverbrauch, der die räumliche Verbreitung von Anlagen beschränkt. Um die Frage zu beantworten, wie viele Grundwasserwärmepumpen in einem Gebiet maximal gebaut werden können, müssen die Brunnen räumlich optimal angeordnet werden, ohne dass sich die Anlagen thermisch negativ beeinflussen. Durch die räumliche Optimierung der Brunnenpositionen wird folglich ein

maximales Ausbauszenario in der Fläche ermittelt, das als hypothetische Obergrenze für die Wärmeplanung herangezogen werden kann.

Es gibt verschiedene Anwendungsmöglichkeiten dieser Potenzialevaluation in der Dekarbonisierung der dezentralen Wärmeversorgung. Beispielsweise kann die Auswirkung auf das Stromnetz in stadtweiten Szenarien analysiert werden, da ein gewisser Anteil an Gebäuden mit alternativen Lösungen, wie z. B. weniger effizienten und stromintensiveren Luftwärmepumpen, versorgt werden muss. Für die Multi-Agenten Simulation im Modell München wird beispielsweise das räumliche Potenzial zur Abschätzung des maximalen Ausbaus in der Fläche integriert, um zudem die nachhaltige thermische Bewirtschaftung der Ressource Grundwasser sicherzustellen.

Bestimmung des baublockscharfen Potenzials (räumliches Potenzial): Analog zum Flurstückansatz werden für das baublockscharfe Potenzial die hydrogeologischen Parameter im Median für jeden Baublock bestimmt und anschließend die Funktionen aus Abschnitt 6.3.3 verwendet, um das umsetzbare Potenzial zu berechnen. Für die Positionierung der Brunnen wird ebenfalls, die im Baublock zur Verfügung stehende Freifläche kartiert. Im Unterschied zum Flurstückansatz wird hier nur der 3 m Mindestabstand zu Gebäuden berücksichtigt. Die Entscheidung keinen Abstand zu Baublockgrenzen einzubeziehen erfolgte hier in Abstimmung mit den Stadtwerken München, da sie als kommunaler Energieversorger auch auf öffentlichem Grund bzw. auf den Verkehrsflächen die Erlaubnis haben, Brunnen zu bohren. Das Potenzial auf Baublocken wird zur Machbarkeitsbewertung von Verbundlösungen, wie kalten Nahwärmenetzen, herangezogen und deren Betrieb erfolgt typischerweise durch den Energieversorger. Es kann also davon ausgegangen werden, dass bei der Brunnenplanung auch Verkehrsflächen zur Verfügung stehen.

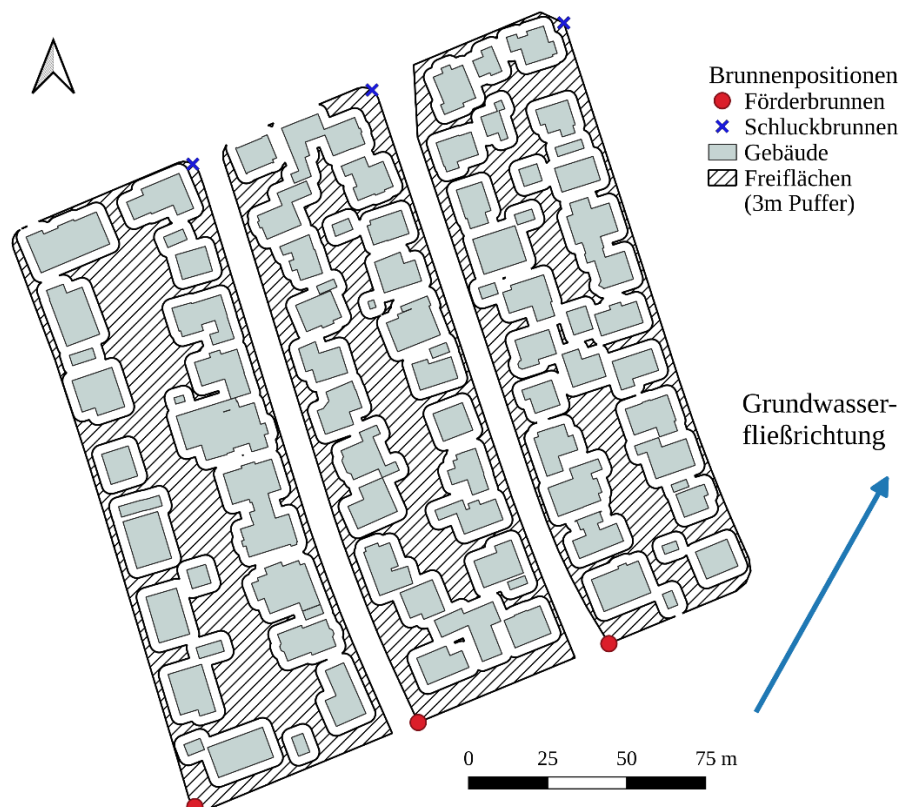


Abbildung 56: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Baublocken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden.

Abbildung 56 zeigt beispielhaft eine Verteilung der Brunnen auf drei Baublocken mit den möglichen Freiflächen nach Abzug des 3 m Mindestabstands von Gebäuden. Da die Brunnen hier generell weiter entfernt voneinander stehen können als beim Flurstückansatz (vgl. Abbildung 28), wird der hydraulische Kurzschluss immer weniger zum beschränkenden Faktor für die technisch umsetzbare

Entnahmemenge. Es werden häufiger Grenzzustände erreicht, bei denen die maximale Absenkung oder der maximale Aufstau maßgeblich für die umsetzbare Entnahmerate sind. Nach der Berechnung der Potenziale aus den zwei Aggregationsebenen, i. e. Flurstück und Baublock, erfolgt im nächsten Schritt der Abgleich mit dem gebäudeseitigen Wärmebedarf.