



Ländliche Entwicklung in Bayern



Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

## Erarbeitung eines Handlungsleitfadens zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden

Beschaffung geeigneter bodenkundlicher und klimatischer Datensätze mit anschließendem Einpflegen der Datensätze in ein Geographisches Informationssystem (GIS).  
Entwicklung eines Algorithmus zur Ermittlung der oberflächennahen geothermischen Potentiale auf Basis von Flächendaten

Projektbeginn: 01. Oktober 2019

Zeichen: F/G4-/503

Abschlussbericht

Dokument:

2023-03-09\_Potentialanalyse für Bayern-Oberflächennahe Geothermie\_FAU\_V2

**Projektleitung**            **Dr. David Bertermann**

**Ort**                            **Erlangen**

**Datum**                     **09.03.2023**

**Dokumentenhistorie**

<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Autor:</b>	<b>Prüfung durch:</b>	<b>Freigabe durch:</b>
1	07.03.2023	Jan Wagner Hans Schwarz Mario Rammler	Dr. David Bertermann Hans Schwarz	Dr. David Bertermann
2	09.03.2023	Jan Wagner Hans Schwarz Mario Rammler	Dr. David Bertermann Hans Schwarz	Dr. David Bertermann

**Autoren**

**Dr. David Bertermann** *FAU Erlangen-Nürnberg*

**Hans Schwarz** *FAU Erlangen-Nürnberg*

**Jan Wagner** *FAU Erlangen-Nürnberg*

**Mario Rammler** *FAU Erlangen-Nürnberg*

**GeoZentrum Nordbayern – Friedrich-Alexander-Universität**

Lehrstuhl für Geologie - Arbeitsgruppe oberflächennahe Geothermie

Schlossgarten 5

91054 Erlangen

Tel: +49 9131 85 25824

E-Mail: david.bertermann@fau.de

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	ii
Abbildungsverzeichnis .....	ii
Tabellenverzeichnis .....	iv
Anhang .....	v
Veranlassung .....	6
AP1: Beschaffung Datensätze und Einpflegen in GIS .....	8
AP2: Algorithmus zur Ermittlung der geothermischen Potentiale .....	9
AP3: Vergleich des Flächenbedarfs unterschiedlicher Kollektorsysteme .....	15
AP4 Selektion von Mustergemeinden mit bodenkundlichen Untersuchungen .....	17
AP5: Einbauanleitungen verschiedener Geothermiesysteme .....	34
AP6: Erstellung von oberflächennahen geothermischen Potenzialkarten .....	41
AP7: Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation .....	43
Zusammenfassung .....	44
Literaturverzeichnis .....	46
Anhang .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kemmern bei Bamberg <b>(a)</b> beispielhaft für den ländlichen Raum mit Forstbereichen im Vergleich zu einem städtischen Bereich der Landeshauptstadt München <b>(b)</b> ; Polygone mit verfügbaren Informationen des Datensatzes sind bei <b>(a)</b> lila und bei <b>(b)</b> gelb eingefärbt. ....	8
Abbildung 2: Konzept zur Potentialberechnung am Beispiel eines stark lehmigen Sandes .....	10
Abbildung 3: Schema der systemunspezifischen Potentialberechnung mit dem Zielparameter Wärmeleitfähigkeit über die Ableitung relevanter physikalischer Bodenparameter .....	10
Abbildung 4: Flächenspezifische Entzugsleistung, Entzugsenergie, Volllaststunden und Rohrabstand für horizontale Erdwärmekollektoren (PE-Rohr 32 mm × 3,0 mm) und unterschiedliche Klimazonen (Quelle: VDI 4640-2, 2019) .....	13
Abbildung 5: Einteilung der Basisdaten aus der Bodenschätzung entsprechend den Klimazonen in Bayern nach DIN 4710, welche den Klimaeinfluss auf die jeweilige Entzugsleistung begründet. ....	13
Abbildung 6: Schema der Potentialberechnung der jeweiligen system- und bodenspezifischen Entzugsleistung .....	14
Abbildung 7: Testgebiet für die in Tabelle 4 aufgeführten Berechnungen im Süden der Mustergemeinde Merkendorf .....	17
Abbildung 8: <b>(a)</b> Beispiel für geeignete Datengrundlage: Bohrprofil nach DIN 4023 der Bohrung 2 in Merkendorf, gebohrt durch KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH; <b>(b)</b> Beispiel für ungeeignete Datengrundlage aufgrund zu geringer Bohrtiefe: Bohrprofil der Kleinrammbohrung KB5 des Baugrundgutachtens Sanierung der Straße Riedlingen – Trunzen der Fa. ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH .....	19

Abbildung 9: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet des Markts Schwaben.....	21
Abbildung 10: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet des Markts Schwaben .....	22
Abbildung 11: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet von Regenstauf.....	23
Abbildung 12: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet von Regenstauf.....	24
Abbildung 13: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet von Wiggensbach .....	25
Abbildung 14: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet von Wiggensbach.....	26
Abbildung 15: (a) Lage der vier Bohrungen zur Probenahme in Kasendorf (hier vereinfacht als eine Bohrung) und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die Bodenarten nach KA 5; (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für das entsprechende Polygon bei einem pF-Wert von 3,0. ....	29
Abbildung 16: (a) Lage der Probenahmestellen in Spiegelau und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die Bodenarten nach KA5; die beiden beprobten Polygone unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer abgeleiteten Korngrößenverteilung, sodass die Darstellung als einzelner Punkt erfolgt (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für die entsprechende Polygone bei einem pF-Wert von 3,0.....	30
Abbildung 17: (a) Lage der Probenahmestellen in Merkendorf und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die Bodenarten nach KA5; die beiden beprobten Polygone unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer abgeleiteten Korngrößenverteilung, sodass die Darstellung als einzelner Punkt erfolgt (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für die entsprechende Polygone bei einem pF-Wert von 3,0. Dadurch dass sich die abgeleiteten Werte der beiden Polygone nicht unterscheiden, erfolgt die Darstellung als ein Wert.....	32
Abbildung 18: (a) Wärmeleitfähigkeit nach Kersten und (b) Entzugsleistung nach VDI 4640 .....	36
Abbildung 19: Bodenart nach KA 5 .....	36
Abbildung 20: Bohrprofile RKS 3 und RKS 4 .....	37
Abbildung 21: Vertikaler Einbau des Boden-Klima-Tauschers der Fa. Steinhäuser .....	39

Abbildung 22: Einbau des 8er-Kollektors der Fa. Freisolar .....	39
Abbildung 23: Einbau des Ringgrabenkollektors der Fa. RGK .....	40
Abbildung 24: Als Senke geplanter Bürocontainer .....	41
Abbildung 25: Potentialkarte: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten in Bayern und Lage der Mustergemeinden (Quelle: Bertermann et al. (2021)).....	42
Abbildung 26: Potentialkarte: Verteilung der berechneten Entzugsenergie in Bayern für horizontale Erdwärmekollektoren (Quelle: Bertermann et al. (2021)) .....	42
Abbildung 27: Vorschlag für die Infotafeln der jeweiligen Systeme am Beispiel der Fa. Steinhäuser .....	43

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete im Forschungsvorhaben „Erarbeitung eines Handlungsleitfadens zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden“.....	7
Tabelle 2: Berechnete Wärmeleitfähigkeiten nach Kersten (1949); Angabe jeweils als Mittelwert für alle durch die digitale Bodenschätzung abgedeckten Flächen .....	12
Tabelle 3: Alle implementierten Haustypen mit dem jeweiligen Energiebedarf.....	15
Tabelle 4: Flächenbedarf der fünf genannten Systeme entsprechend den Entzugsleistungen der VDI 4640 bei gleichem Standort (Abbildung 7) und bestimmten Haustyp bzw. Verbrauch mit 97,87 m <sup>2</sup> .....	16
Tabelle 5: Mustergemeinden und deren Datengrundlage zur Validierung des Algorithmus .....	18
Tabelle 6: Übersetzungsschema der Bodenansprache nach DIN 4023 bzw. DIN EN ISO 14688 in Anteile der Korngrößen in Masseprozent .....	19
Tabelle 7: Messgeräte und Messkonfiguration der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen je Mustergemeinde mit der Evaporationsmethode.....	27
Tabelle 8: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des entsprechenden Polygons bei einem Matrixpotential von $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 19 %) verglichen. ....	29
Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit den abgeleiteten Werten der entsprechenden Polygone bei einem Matrixpotential von $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 19 %) verglichen. Die Werte des Algorithmus werden als Mittelwerte angegeben, da sie sich nur geringfügig unterscheiden. Der Wassergehalt der Probe 3 bei Sättigung liegt unterhalb der berücksichtigten 19 %.....	31
Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit den abgeleiteten Werten der entsprechenden Polygone bei einem Matrixpotential von $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 13 %) verglichen. Die Werte der beiden beprobten Polygone des Algorithmus werden als einziger Wert angegeben, da sie sich nicht unterscheiden.....	33
Tabelle 11: Ergebnisse der Korngrößenanalyse und der Wassergehaltsbestimmung.....	35
Tabelle 12: Einbaudokumentation Fa. Steinhäuser .....	38

## Anhang

Anhang 1: Einbaudokumentation Ringgrabenkollektor .....	47
Anhang 2: Einbaudokumentation 8er-Kollektor .....	48
Anhang 3: Porentialkarte für Markt Schwaben für Entzugsleistung am Beispiel Grabenkollektor .....	49
Anhang 4: Porentialkarte für Regenstauf für Entzugsleistung am Beispiel Grabenkollektor .....	49
Anhang 5: Porentialkarte für Wiggensbach für Entzugsleistung am Beispiel Grabenkollektor .....	50

## Veranlassung

Im Zuge des gegenwärtigen Klimawandels und der daraus resultierenden Diskussion von Gegenmaßnahmen auf dem Energie-Sektor sind regenerative Energiequellen vermehrt in den Fokus gerückt. In dem Mix alternativer Energien stellt die oberflächennahe Geothermie eine CO<sub>2</sub>-arme Möglichkeit einer konstanten Wärmebereitstellung dar. Raumwärme und Warmwasser machen mehr als 30 % des Energieverbrauchs in Deutschland aus (BMWi, 2019). Eine CO<sub>2</sub>-arme Energiegewinnung für diesen Anwendungsbereich ist somit unerlässlich für die angestrebte Energiewende.

Neben der Wärmebereitstellung in den Heizperioden kann die oberflächennahe Geothermie ebenso zur Kühlung von Gebäuden in den warmen Sommermonaten herangezogen werden und ist somit über den kompletten Jahresverlauf einsetzbar.

Die klimaschonende Wärmeversorgung durch oberflächennahe Geothermie kann - durch ihren Flächenbezug vor allem im ländlichen Raum - einen erheblichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Wärmeversorgung von Gebäuden und Quartieren leisten. Neben Erdwärmesonden, für die oftmals aufwändige wasserrechtliche Verfahren sowie teure Bohrungen erforderlich sind, können horizontale, kostengünstige Kollektorsysteme sowie deren Sonderformen ebenfalls zur Energiebereitstellung herangezogen werden. Diese oberflächennahsten Geothermiesysteme werden in Verlegetiefen zwischen 1 bis 4 m installiert. Somit eignen sich diese Systeme speziell für die Infrastruktur im ländlichen Raum, da hier die Freiflächenanteile der einzelnen Grundstücke bzw. Flurstücke größer sind als in dichtbesiedelten urbanen Räumen mit erhöhtem Nutzungsdruck.

Um eine effiziente Nutzung dieser dezentralen und regenerativen Energieversorgung für den ländlichen Raum gewährleisten zu können, ist eine korrekte Dimensionierung der geothermischen Systeme essenziell. Die Dimensionierung dieser Systeme ist abhängig von den thermischen Parametern des umgebenden Bodenmaterials und des vorherrschenden Klimas.

Es ist deshalb in diesem Projekt in einem ersten Schritt eine bayernweite Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale mit speziellem Fokus auf den ländlichen Raum notwendig. Das Vorgehen der Potentialabschätzung wurde mittels eines Handlungsleitfadens erarbeitet und dokumentiert.

Dazu wurden bodenkundliche und klimatische Datensätze in einem Geographischen Informationssystem (GIS) eingepflegt und prozessiert. Anschließend wurden die Ergebnisse der Potentialberechnungen auf Basis der Flächendaten in mehreren Mustergemeinden verifiziert.

Ziel des Projektes war die Erstellung einer Potentialkarte zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden Bayerns.

Um verlegungstechnische Rahmenbedingungen für die Installation oberflächennaher Geothermiesysteme aufzuzeigen, wurde seitens der FAU ein Testfeld eingerichtet. Auf dem Testfeld wurde der Einbau mehrerer marktrelevanter Systeme dokumentiert.

Im Folgenden werden die Forschungsergebnisse der einzelnen Arbeitspakete im Detail vorgestellt. Eine Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete des Forschungsvorhabens ist in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Arbeitspakete im Forschungsvorhaben „Erarbeitung eines Handlungsleitfadens zur Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale in ländlichen Gemeinden“.*

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Beschreibung</b>
AP1	Beschaffung geeigneter bodenkundlicher und klimatischer Datensätze und Einpflegen der Datensätze in ein Geographisches Informationssystem (GIS)
AP2	Entwicklung eines Algorithmus zur Ermittlung der oberflächennahen geothermischen Potentiale auf Basis von Flächendaten
AP3	Vergleich des Flächenbedarfs unterschiedlicher Kollektorsysteme durch Auswertung und Aufbereitung der Datensätze aus dem Erdkollektor - Testfeld in Schmerldorf / Memmelsdorf
AP4	Selektion von drei Mustergemeinden, Probenentnahme und Laboruntersuchung der Bodenproben zur Verifizierung des Datensatzes und des Berechnungsalgorithmus
AP5	Erstellung eines fundierten praxistauglichen Leitfadens bezüglich oberflächennaher geothermischer Potentiale mit entsprechenden Einbauanleitungen für die jeweiligen Geothermiesysteme
AP6	Erstellung von oberflächennahen geothermischen Potentialkarten differenziert nach den jeweiligen Systemtypen
AP7	Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation des Handlungsleitfadens an den Schulen der Dorf- und Landentwicklung sowie am Bereich Zentrale Aufgaben der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung



## AP1: Beschaffung Datensätze und Einpflegen in GIS

Die Bodenschätzung 1:5000 wurde seitens des Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten auf Anfrage der FAU bereitgestellt. Dieser Datensatz wurde im GIS-kompatiblen Shapefile-Format (.shp) übergeben. Durch die hohe Auflösung ist eine solide Basis für die Potentialberechnung gegeben. Die Bearbeitung des Datensatzes erfolgte mit der Software ArcGIS (ArcMap und ArcCatalog). Die mit dem Datensatz übermittelten Polygone enthalten jeweils eine umfassende Attributliste.

Die Daten der Bodenschätzung repräsentieren vorrangig Acker- und Grünlandflächen. Waldbereiche sind von der Bodenschätzung ausgenommen (Abbildung 1), jedoch findet dort eine geothermische Nutzung des Untergrunds nur sehr vereinzelt statt.

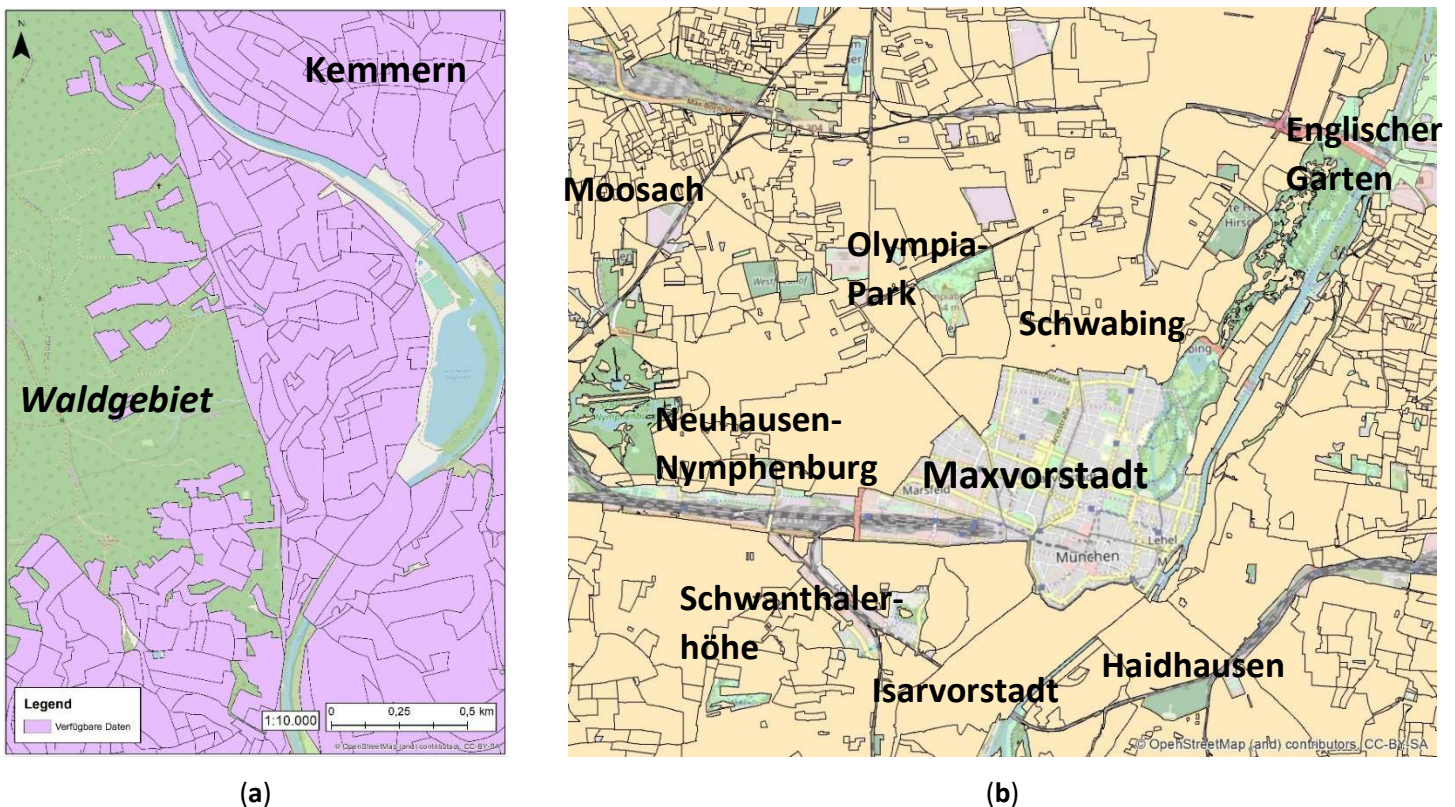


Abbildung 1: Kimmern bei Bamberg (a) beispielhaft für den ländlichen Raum mit Forstbereichen im Vergleich zu einem städtischen Bereich der Landeshauptstadt München (b); Polygone mit verfügbaren Informationen des Datensatzes sind bei (a) lila und bei (b) gelb eingefärbt.

Datenlücken in Waldgebieten könnten nach Bedarf mit Daten aus der forstlichen Standortkartierung geschlossen werden. In Siedlungsbereichen bzw. innerstädtischen Gebieten richtet sich die Datenverfügbarkeit in Abhängigkeit nach der ursprünglichen Nutzung. Für ehemalige Acker- und Grünlandbereiche liegen Daten vor.

Der Datensatz umfasst Flächeninformationen zu allen bayerischen Landkreisen und besteht aus mehr als 2 Millionen Polygonen.

Zusätzlich wurden Informationen zu den Klimazonen der DIN 4710 entnommen und in das GIS System eingepflegt. Die klimatischen Daten sind für eine Abschätzung der oberflächennahen geothermischen Potentiale entsprechend der VDI 4640 erforderlich. Des Weiteren wurden Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) z.B. in Form von Niederschlagsdaten zur Potentialberechnung hinzugezogen.

## **AP2: Algorithmus zur Ermittlung der geothermischen Potentiale**

Für die Ermittlung der geothermischen Potentiale ist es essenziell die relevanten Systemparameter zu definieren und in den Algorithmus zu implementieren. Die Effektivität der Geothermie-Installationen ist vorwiegend abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Untergrunds. Aus diesem Grund wird der Bodenparameter Wärmeleitfähigkeit zur Beurteilung des systemunabhängigen Potentials für oberflächennahe Geothermiesysteme herangezogen. Die Wärmeleitfähigkeit ist dabei hauptsächlich von den bodenphysikalischen Parametern Dichte und Wassergehalt abhängig. Diese Wechselwirkung der beiden bodenphysikalischen Parameter wird in gängigen Modellen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit dementsprechend berücksichtigt.

Wassergehalt und Dichte werden durch die Korngrößenverteilung eines Bodens und damit durch die Bodenart entscheidend beeinflusst. So können verschiedenen Bodenarten unterschiedliche Poreneigenschaften sowie hydraulische Parameter wie Wasserrückhaltevermögen zugeordnet werden. Aufgrund dieses Systemzusammenhangs bildet die Bodenart den Hauptparameter für den Handlungsleitfaden bzw. Algorithmus.

Im zur Verfügung gestellten Datensatz ist der Parameter Bodenart gemäß der Bodenschätzung unter KN1 angegeben. Zur weiteren Verarbeitung der Basisdaten wurde ein Konzept erarbeitet (Abbildung 2). Die Nomenklatur der Bodenschätzung musste in einem ersten Schritt in die gängige Klassifizierung der Bodenarten nach KA 5 (Bodenkundliche Kartieranleitung) übersetzt werden. Anschließend wurden den Bodenarten nach KA 5 anhand der DIN 4220 prozentuale Angaben zu den Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton zugewiesen. Diese Anteile bilden den Grundstein weiterer Schritte des Berechnungsalgorithmus.

Neben dem Parameter Wärmeleitfähigkeit, der das systemunabhängige geothermische Potential beschreibt, kann durch die Entzugsleistung das systemspezifische Potential auf Basis der VDI 4640 angegeben werden.

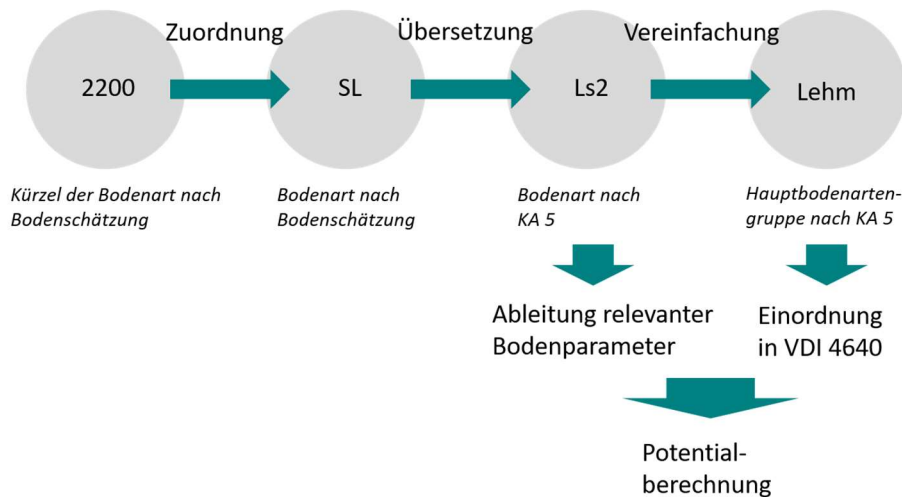


Abbildung 2: Konzept zur Potentialberechnung am Beispiel eines stark lehmigen Sandes

Das detaillierte Vorgehen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit unter der Berücksichtigung weiterer Bodenparameter und Zwischenschritte ist in Abbildung 3 dargestellt.

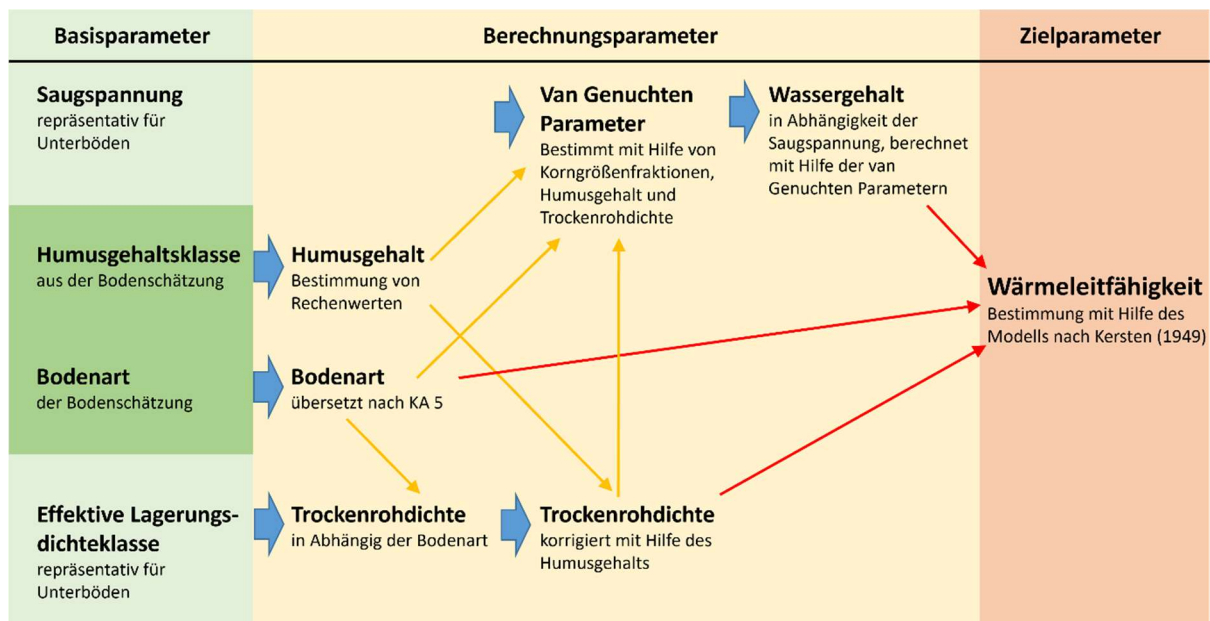


Abbildung 3: Schema der systemunspezifischen Potentialberechnung mit dem Zielparame-ter Wärmeleitfähigkeit über die Ableitung relevanter physikalischer Bodenparameter

Für die betrachtete Verlegetiefe wurde eine mittlere effektive Lagerungsdichteklasse (Ld3) angenommen. Unter Berücksichtigung der effektiven Lagerungsdichteklassen wurde eine bodenartabhängige Lagerungsdichte gemäß DIN 4220 bestimmt. Außerdem wurden mit Hilfe der

bodenartsspezifischen Van-Genuchten-Parameter die jeweiligen Wassergehalte berechnet. Dabei hat die Humusklasse im Falle von organischen Böden eine korrigierende Funktion. Abschließend konnte dann auf dieser Grundlage die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

Die zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit verwendeten Formeln (1+2) nach Kersten (1949) gelten für die Berechnung von Böden im ungefrorenen Zustand. Innerhalb des Kersten-Modells werden zwei Formeln angewandt. Eine Formel für die Sandfraktion (>50 % Sand) und eine für die feinkörnigen Fraktionen (<50 % Sand). Je nach Sandanteil wird also die entsprechende Formel gewählt. Außerdem werden als Eingangsparameter die Lagerungsdichte und der gravimetrische Wassergehalt benötigt.

Bei einem Sandanteil < 50%, wird nach Kersten (1949) folgende Formel verwendet:

$$(1) \quad \lambda = 0.1442 * (0.9 * (\text{Log}(\theta)) - 0.2) * 10^{(0.6243 * \rho_d)}$$

Bei einem Sandanteil > 50%, wird nach Kersten (1949) folgende Formel verwendet:

$$(2) \quad \lambda = 0.1442 * (0.7 * (\text{Log}(\theta)) + 0.4) * 10^{(0.6243 * \rho_d)}$$

mit:

$\theta$  = hier gravimetrischer Wassergehalt;

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit;

$\rho_d$  = Lagerungsdichte.

In Tabelle 2 sind die Wärmeleitfähigkeiten für zwei verschiedene Saugspannungen bzw. Matrixpotentiale (pF-Wert) dargestellt. Die zwei gewählten pF-Werte entsprechen repräsentativen Feuchteverhältnissen in der Installationstiefe von horizontalen Geothermiesystemen (in der Regel > 1 m). Für einen für das geothermische Potential konservativeren Wassergehalt kann auch ein Matrixpotential von pF=3,0 angenommen werden.

Die Berechnungs-Algorithmen wurden in die GIS-Software implementiert. Darauf aufbauend wurden die geothermischen Potentialkarten für Arbeitspaket 6 erstellt.

Die Berechnungen zeigen, dass die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit in Bayern zwischen 1,2 und 1,3 W/(m\*K) liegt. Innerhalb dieses Wertebereichs können geothermische Anlagen effizient betrieben werden.

Tabelle 2: Berechnete Wärmeleitfähigkeiten nach Kersten (1949); Angabe jeweils als Mittelwert für alle durch die digitale Bodenschätzung abgedeckten Flächen

Matrixpotential	pF 1,8	pF 2,5
Min	1,03 W/(m·K)	1,02 W/(m·K)
Max	1,73 W/(m·K)	1,61 W/(m·K)
Mean	1,29 W/(m·K)	1,23 W/(m·K)

Als systemspezifisches geothermisches Potential wurden Entzugsleistungen für folgende Systeme bestimmt:

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

Die VDI 4640-2 (2019) gibt für jedes System spezifische Entzugsleistungen, Entzugsenergien, Volllaststunden und Rohrabstände in Abhängigkeit der dominierenden Hauptbodenartengruppe sowie Klimazone an (Abbildung 4). Diese Parameter sind in der Datenbank des GIS-Projekts implementiert.

Klimazonen	Entzugsleistung in W/m <sup>2</sup> Entzugsenergie in kWh/(m <sup>2</sup> ·a) Volllaststunden in h/a Rohrabstand in m	Sand	Lehm	Schluff	Sandiger Ton
Klimazone 1	Entzugsleistung	28	34	36	39
	Entzugsenergie	46	56	59	64
	Volllaststunden	1650	1650	1650	1650
	Rohrabstand	0,2...0,3	0,45...0,55	0,45...0,55	0,45...0,55
Klimazone 2	Entzugsleistung	21	29	29	31
	Entzugsenergie	37	52	52	55
	Volllaststunden	1800	1800	1800	1800
	Rohrabstand	0,3...0,4	0,5...0,6	0,55...0,65	0,55...0,65
Klimazone 3	Entzugsleistung	25	32	35	38
	Entzugsenergie	41	52	57	62
	Volllaststunden	1650	1650	1650	1650
	Rohrabstand	0,25...0,35	0,45...0,55	0,45...0,55	0,45...0,55
Klimazone 4	Entzugsleistung	23	30	33	36
	Entzugsenergie	34	45	49	54
	Volllaststunden	1500	1500	1500	1500
	Rohrabstand	0,25...0,35	0,5...0,6	0,5...0,6	0,5...0,6

Klimazone 13	Entzugsleistung	16	25	27	29
	Entzugsenergie	28	45	48	52
	Volllaststunden	1800	1800	1800	1800
	Rohrabstand	0,5...0,6	0,6...0,7	0,6...0,7	0,6...0,7

Abbildung 4: Flächenspezifische Entzugsleistung, Entzugsenergie, Volllaststunden und Rohrabstand für horizontale Erdwärmekollektoren (PE-Rohr 32 mm × 3,0 mm) und unterschiedliche Klimazonen (Quelle: VDI 4640-2, 2019)

Für die Einordnung des jeweiligen Standorts und der Ableitung von Entzugsleistung und Entzugsenergie nach VDI 4640 wurden die Klimazonen entsprechend der DIN 4710 dem Datensatz hinzugefügt (Abbildung 5).

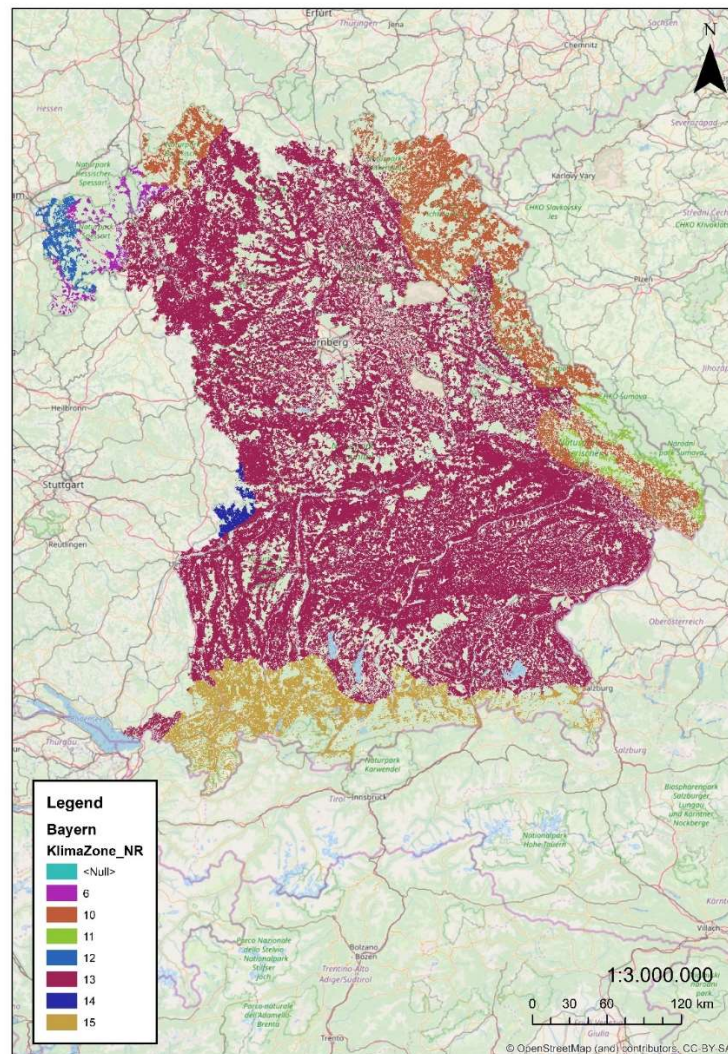


Abbildung 5: Einteilung der Basisdaten aus der Bodenschätzung entsprechend den Klimazonen in Bayern nach DIN 4710, welche den Klimaeinfluss auf die jeweilige Entzugsleistung begründet.

Zur detaillierten Integration des Klimaeinflusses wurden die Angaben der DIN 4710 bzw. der VDI 4640 mit den Höhenangaben der Bezugswetterstationen (m NHN) ergänzt. Mit dem frei verfügbaren Digitalen Geländemodell (DGM) wurden die Entzugsleistungen in einem weiteren Schritt mit den Höhen korreliert (Abbildung 6). Auf diese Weise wurden standort- bzw. höhenspezifische Entzugsleistungen flächendeckend für Bayern ermittelt.

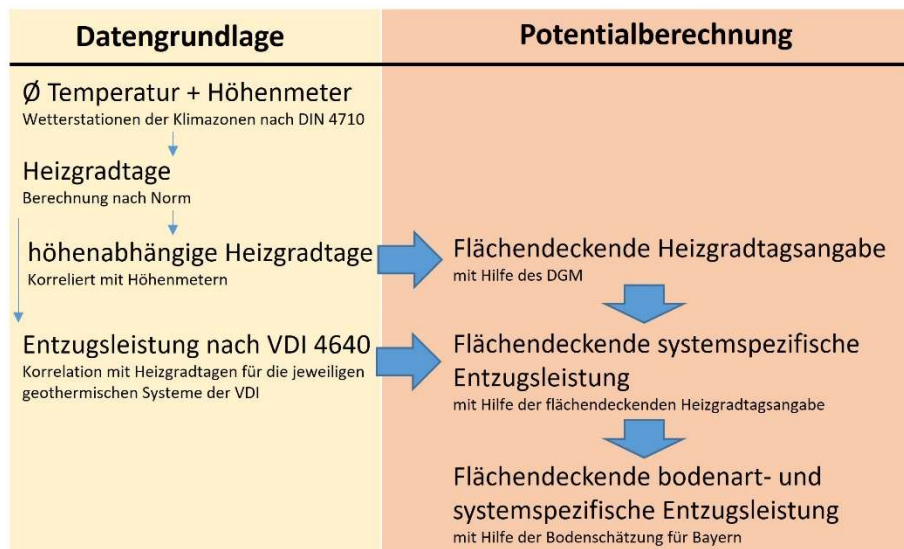


Abbildung 6: Schema der Potentialberechnung der jeweiligen system- und bodenspezifischen Entzugsleistung

### AP3: Vergleich des Flächenbedarfs unterschiedlicher Kollektorsysteme

Die Datenbank des Instituts Wohnen und Umwelt enthält den Heizenergiebedarf für verschiedene Haustypen in Deutschland. Diese Informationen wurden mit Hilfe des Webtools TABULA für 12 verschiedenen Generationen unterschiedlicher Energieeffizienzstandards von Gebäuden ausgelesen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Alle implementierten Haustypen mit dem jeweiligen Energiebedarf

	<b>Haustyp</b>	<b>Baujahr</b>	<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>Energiebedarf für Heizung</b> [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
1	Einfamilienhaus	bis 1859	SFH_01	93,0
2	Mehrfamilienhaus	bis 1859	MFH_01	98,3
3	Einfamilienhaus	1860 - 1918	SFH_02	95,9
4	Mehrfamilienhaus	1860 - 1918	MFH_02	80,5
5	Einfamilienhaus	1919 - 1948	SFH_03	83,7
6	Mehrfamilienhaus	1919 - 1948	MFH_03	82,5
7	Einfamilienhaus	1949 - 1957	SFH_04	111,5
8	Mehrfamilienhaus	1949 - 1957	MFH_04	79,3
9	Einfamilienhaus	1958 - 1968	SFH_05	117,4
10	Mehrfamilienhaus	1958 - 1968	MFH_05	67,2
11	Einfamilienhaus	1969 - 1978	SFH_06	90,4
12	Mehrfamilienhaus	1969 - 1978	MFH_06	74,0
13	Einfamilienhaus	1979 - 1983	SFH_07	74,9
14	Mehrfamilienhaus	1979 - 1983	MFH_07	68,6
15	Einfamilienhaus	1984 - 1994	SFH_08	94,4
16	Mehrfamilienhaus	1984 - 1994	MFH_08	72,6
17	Einfamilienhaus	1995 - 2001	SFH_09	97,6
18	Mehrfamilienhaus	1995 - 2001	MFH_09	68,8
19	Einfamilienhaus	2002 - 2009	SFH_10	72,9
20	Mehrfamilienhaus	2002 - 2009	MFH_10	54,0
21	Einfamilienhaus	2010 - 2015	SFH_11	47,8
22	Mehrfamilienhaus	2010 - 2015	MFH_11	46,5
23	Einfamilienhaus	von 2016	SFH_12	40,8
24	Mehrfamilienhaus	von 2016	MFH_12	27,6



Die Kombination dieser Angaben mit Daten aus der VDI 4640-2 ermöglicht die Berechnung von grundlegenden Heizenergieleistungen mit verschiedenen Kollektortypen. In Tabelle 4 ist der Flächenbedarf verschiedener Systeme exemplarisch für einen Teststandort im Süden der Mustergemeinde Merkendorf des AP 4 dargestellt (Abbildung 7).

*Tabelle 4: Flächenbedarf der fünf genannten Systeme entsprechend den Entzugsleistungen der VDI 4640 bei gleichem Standort (Abbildung 7) und bestimmten Haustyp bzw. Verbrauch mit 97,87 m<sup>2</sup>*

System	Haustyp	Baujahr	Kurz- bezeichnung	benötigte Fläche [m <sup>2</sup> ]	
Horizontaler Kollektor				196,61	
Kapillarrohrmatte				192,34	
Erdkorb 1,3x1,3		1969 - 1978	SFH_06	154,00	
Erdkorb 2,0x0,5				266,00	
Grabenkollektor				90,74	
Horizontaler Kollektor				212,27	
Kapillarrohrmatte				207,65	
Erdkorb 1,3x1,3		1995 - 2001	SFH_09	168,00	
Erdkorb 2,0x0,5				280,00	
Grabenkollektor				97,97	
Horizontaler Kollektor	Einfamilienhaus			103,96	
Kapillarrohrmatte				101,70	
Erdkorb 1,3x1,3		2010 - 2015	SFH_10	84,00	
Erdkorb 2,0x0,5				140,00	
Grabenkollektor				47,98	
Horizontaler Kollektor					196,61
Kapillarrohrmatte					192,34
Erdkorb 1,3x1,3		1969 - 1978	SFH_06	154,00	
Erdkorb 2,0x0,5					266,00
Grabenkollektor					90,74

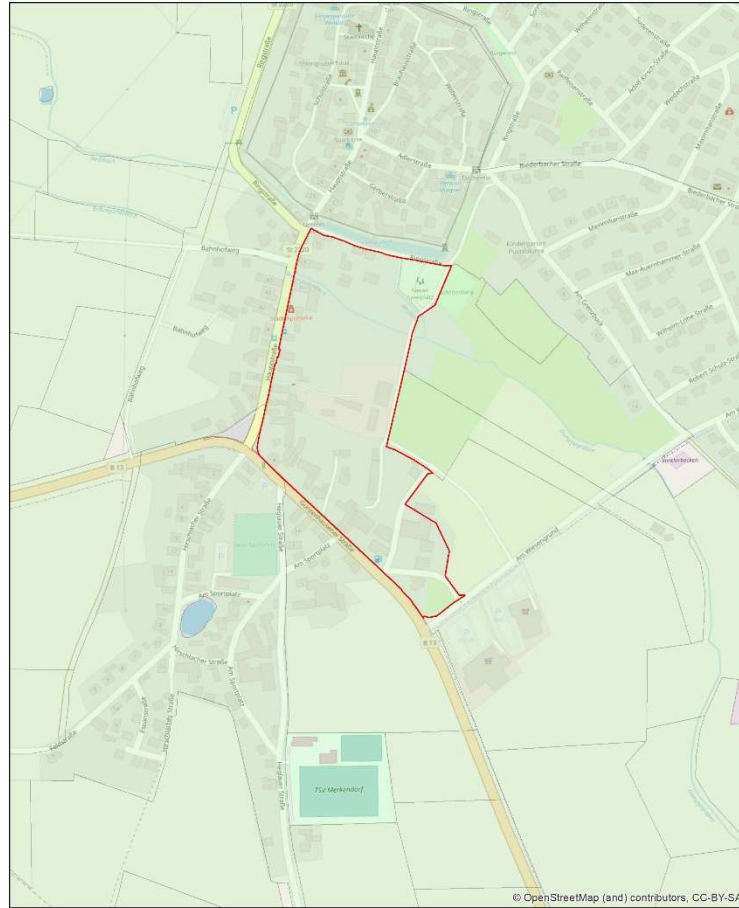


Abbildung 7: Testgebiet für die in Tabelle 4 aufgeführten Berechnungen im Süden der Mustergemeinde Merkendorf

## AP4 Selektion von Mustergemeinden mit bodenkundlichen Untersuchungen

Für die Selektion der Mustergemeinden wurde sich an den Regierungsbezirken in Bayern orientiert. Letztendlich wurden sechs ländliche Mustergemeinden zur Validierung des Berechnungsalgorithmus herangezogen. Bei der Mustergemeinde für Unterfranken wurde keine Rückmeldung erhalten, sodass dieser Regierungsbezirk nicht berücksichtigt wurde. Entgegen der ursprünglichen Planung mit drei Mustergemeinden (Tabelle 1) konnte mit der höheren Anzahl eine größere Varianz von repräsentativen Bodenverhältnissen abgedeckt werden.

Die sechs Mustergemeinden können je nach Datengrundlage für die Validierung in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen wurden seitens der Gemeinden Baugrundgutachten übermittelt. Dadurch konnten anhand einer großen Zahl an Bodenaufschlüssen Informationen über den anstehenden Untergrund im Gemeindegebiet herausgefiltert und mit den Informationen des Algorithmus verglichen werden. Zum anderen wurden in drei Mustergemeinden in-situ-Proben des

anstehenden Bodens durch Rammkernsondierungen oder durch Probenahme aus Baugruben gewonnen. Zum Abgleich mit den berechneten Bodenparametern erfolgten anschließend Korngrößenanalysen sowie Wärmeleitfähigkeitsmessungen.

Eine Übersicht der Mustergemeinden und deren Datengrundlage ist in folgender Tabelle dargestellt:

*Tabelle 5: Mustergemeinden und deren Datengrundlage zur Validierung des Algorithmus*

Regierungsbezirk	Mustergemeinde	Datengrundlage
Oberbayern	Markt Schwaben	
Oberpfalz	Regenstauf	Baugrundgutachten
Schwaben	Wiggensbach	
Oberfranken	Kasendorf	
Niederbayern	Spiegelau	Probenahme und Laboruntersuchungen
Mittelfranken	Merkendorf	
Unterfranken	keine Rückmeldung	-

Die Validierung anhand von Baugrundgutachten wurde mit Fokus auf die Wärmeleitfähigkeit in einem großflächigen Ansatz durchgeführt. Mit den Laboruntersuchungen erfolgte ein kleinräumiger Vergleich der Wärmeleitfähigkeit und zusätzlich eine Validierung der übersetzten KA 5 – Bodenarten, da in diesem Fall tatsächliche Korngrößenanalysen vorliegen.

#### **Validierung durch Baugrundgutachten**

Für die Validierung des Algorithmus wurden seitens der Gemeinden Markt Schwaben, Regenstauf und Wiggensbach jeweils mehrere Baugrundgutachten von unterschiedlichen Baumaßnahmen im Gemeindegebiet übermittelt. Diese enthalten Bodenprofile von Rammkernsondierungen, Bohrungen oder Baggerschürfen mit Angaben über den Schichtaufbau sowie über die Bodenzusammensetzung. Da für oberflächennahe Systeme weitestgehend der Tiefenbereich zwischen 1,0 und 2,0 m relevant ist, wurden die entsprechenden Angaben der Bodenprofile für diese Tiefe herausgefiltert. Bodenaufschlüsse mit einer zu geringen Endteufe oder künstlichen Auffüllungen im zu untersuchenden Tiefenintervall wurden zur Validierung nicht herangezogen (Abbildung 8).

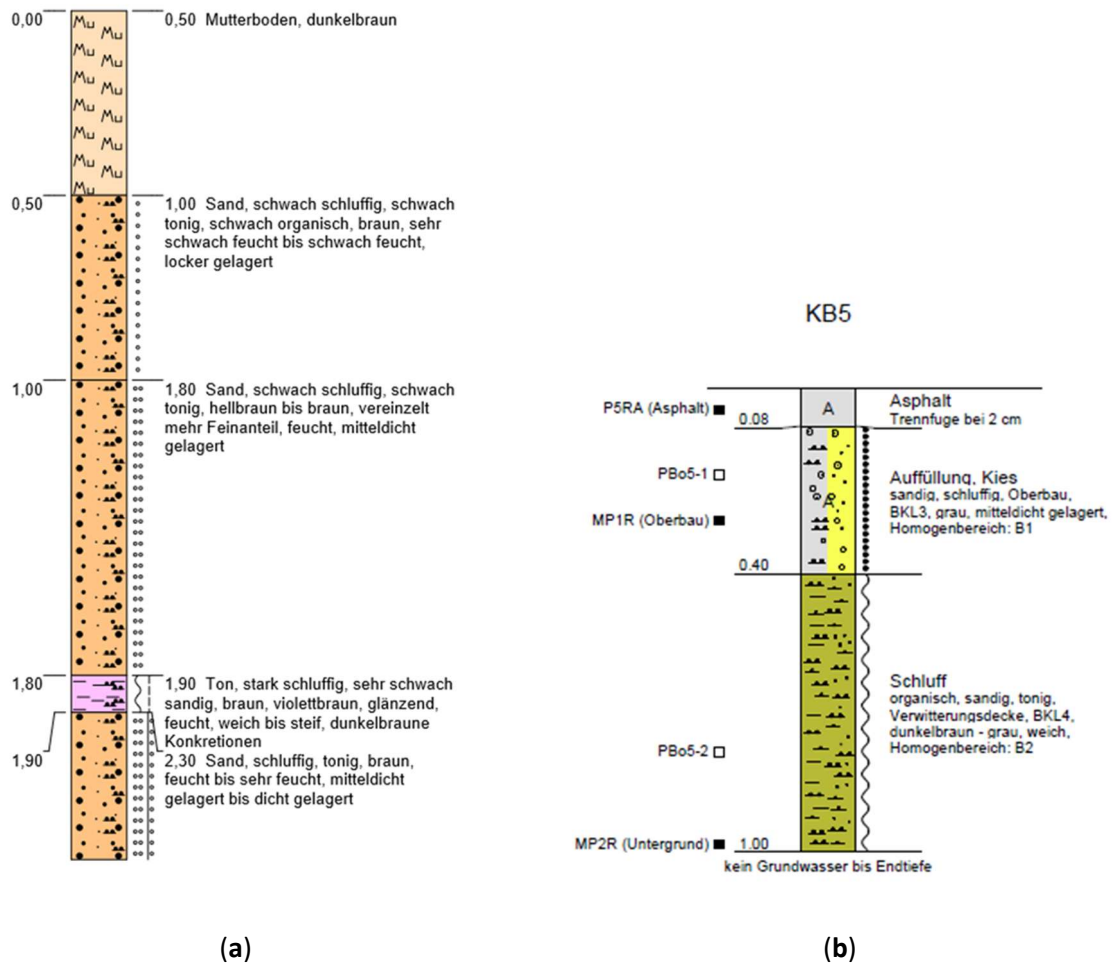


Abbildung 8: (a) Beispiel für geeignete Datengrundlage: Bohrprofil nach DIN 4023 der Bohrung 2 in Merkendorf, gebohrt durch KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH; (b) Beispiel für ungeeignete Datengrundlage aufgrund zu geringer Bohrtiefe: Bohrprofil der Kleinrammbohrung KB5 des Baugrundgutachtens Sanierung der Straße Riedlingen – Trunzen der Fa. ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH

Für die weitestgehend geotechnischen Betrachtungen in den übermittelten Gutachten erfolgten die Bodenansprachen bzw. -klassifizierungen nach DIN 4023 bzw. DIN EN ISO 14688. Aus diesem Grund musste nach Filterung der Aufschlusssdaten eine Übersetzung nach der Bodenklassifikation nach KA 5 erfolgen. Hierfür wurde folgendes Schema angewandt:

Tabelle 6: Übersetzungsschema der Bodenansprache nach DIN 4023 bzw. DIN EN ISO 14688 in Anteile der Korngrößen in Masseprozent

Geotechnische Ansprache	Anteil in Masse-%
schwach (z.B. Sand, schwach schluffig / S,u')	10,0
mittel (z.B. Sand, kiesig / S,g)	22,5
stark (z.B. Sand, stark tonig / S,t*)	35,0
Hauptbodenart (z.B. Sand, tonig / S,t)	>40 %, abzgl. Nebenbodenarten

Anschließend wurde der Grobbodenanteil (>2 mm, Kiesfraktion oder gröber) für die Übersetzung herausgerechnet, sodass anhand der prozentualen Verteilung von Ton, Schluff und Sand eine Einteilung in die Bodenarten nach KA5 erfolgen konnte. Informationen über organische Anteile in den jeweiligen Schichten wurden zusätzlich berücksichtigt. Ausgehend von den durch die Baugrundgutachten erhaltenen standortartabhängigen bodenphysikalischen Bodendaten wurden anschließend entsprechend dem in AP2 beschriebenen Vorgehen die Wärmeleitfähigkeit und die systemspezifische Entzugsleistung berechnet.

Die Lage der Bohrungen wurde entweder aus Angaben zu Einmessdaten aus den Bodengutachten entnommen oder händisch im BayernAtlas anhand des vorliegenden Kartenmaterials bestimmt.

Für die Validierung wird sich im Folgenden weitestgehend auf den Vergleich der abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten fokussiert. Entsprechend dem Vorgehen aus AP2 wurden außerdem systemspezifische Entzugsleistungen abgeleitet.

### **Markt Schwaben**

Der östlich von München gelegene Markt Schwaben befindet sich im Landkreis Ebersberg und gehört zum Regierungsbezirk Oberbayern. Gemäß der digitalen Geologischen Karte 1:25.000 (dGK25) des UmweltAtlas des Bayerischen Landesamtes für Umwelt stehen im Gemeindegebiet vorwiegend pleistozäner Lößlehm und quartäre Talfüllungen an. Die Bodenschätzung im Maßstab 1:5.000 weist nach erfolgter Übersetzung nach KA 5 vorwiegend die Bodenart Lt2 (schwach toniger Lehm) aus (Abbildung 9).

Seitens der Gemeinde wurden Baugrundgutachten aus sechs Bauvorhaben übermittelt. Die darin enthaltenen Bodenprofile wurden entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise gefiltert, sodass zur Validierung insgesamt 19 Bohrungen zur Verfügung standen.

Der Vergleich der dadurch abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten mit den Werten des Algorithmus ist in Abbildung 10 dargestellt. Wie dort zu sehen ist, werden durch den Algorithmus für das Gemeindegebiet weitestgehend Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1,0 und 1,2 W/(m·K) angegeben. Die abgeleiteten Werte der Bohrungen liegen zwischen 0,9 und 1,3 W/(m·K) und stimmen demnach mit den Flächendaten überein oder weisen nur geringe Abweichungen auf. An einer Bohrung ergibt sich eine höhere Wärmeleitfähigkeit (> 1,5 W/(m·K)), was auf den im Vergleich höheren Sandgehalt nach der Übersetzung nach KA 5 (Ls4, stark sandiger Lehm) zurückzuführen ist.

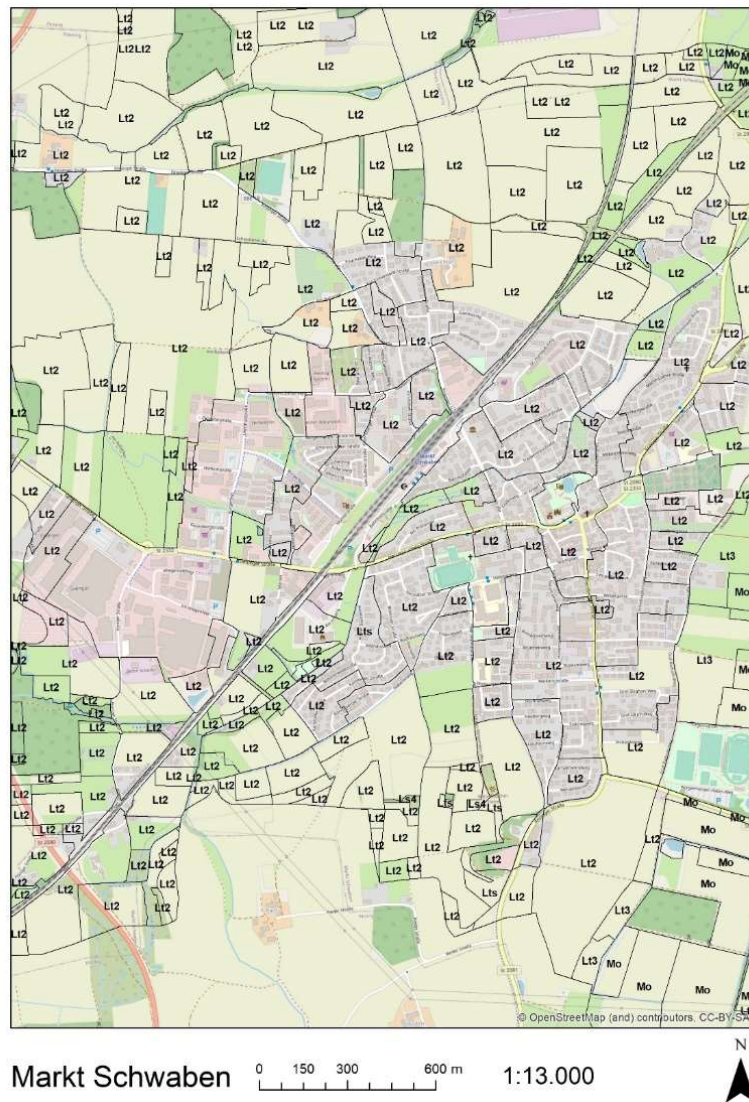


Abbildung 9: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet des Markts Schwaben

Bei den aus den Bohrungen abgeleiteten Bodenarten handelt es sich vor allem um die Bodenarten Tt (tonige Tone), Uu (schluffige Schluffe) und Us (sandige Schluffe). Diese weichen hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilungen von den nach den Flächendaten abgeleiteten Lt2-Böden ab, weisen jedoch ähnlich geringe Sandgehalte (< 50 %) auf.

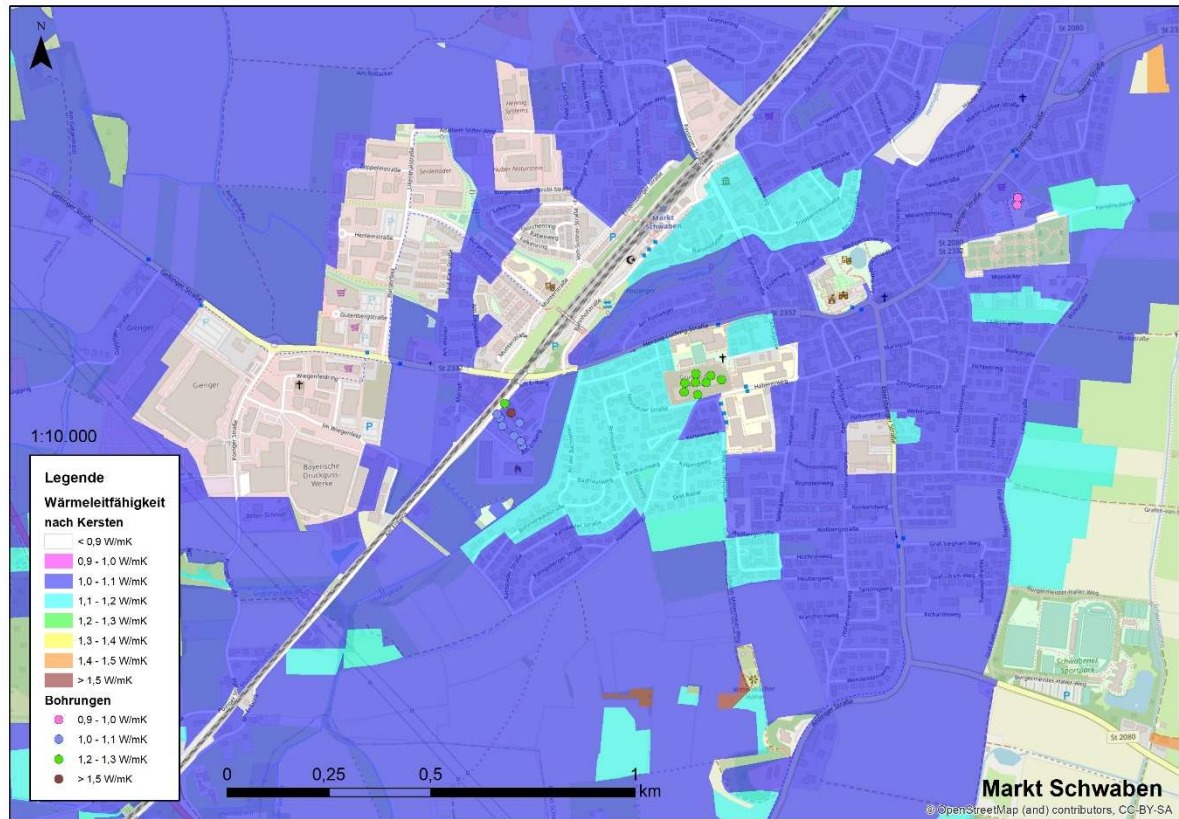


Abbildung 10: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet des Markts Schwaben

Für das Beispiel des Grabenkollektors geben die Flächendaten für das Gemeindegebiet Entzugsleistungen zwischen 52 und 54 W/m<sup>2</sup> an (Anhang 3). Die abgeleiteten Werte der Bohrungen stimmen damit mit Werten von rd. 53 W/m<sup>2</sup> weitestgehend überein.

Die zukünftigen Auswertungen zu dieser Mustergemeinde wurden zudem als Beitrag für den Energienutzungsplan für den Landkreis Ebersberg herangezogen. Dieser wird durch die Energieagentur Ebersberg-München gGmbH in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München hinsichtlich oberflächennaher Systeme zur geothermischen Energiegewinnung erweitert.

### Regenstauf

Der Markt Regenstauf gehört zum Regierungsbezirk Oberpfalz und befindet sich im Landkreis Regensburg. Neben quartären Talfüllungen sowie Flussschottern stehen dort gemäß dGK25 tertiärer Lehm sowie Naabtertiär an. Ebenso sind östlich von Regenstauf Plutonite des Karbon bis Perm

anzutreffen. Die Bodenschätzung weist vorwiegend die Bodenarten Ls4 (stark sandiger Lehm), Lt2 (schwach toniger Lehm) und untergeordnet die Bodenart SI2 (schwach lehmiger Sand) aus (Abbildung 11).

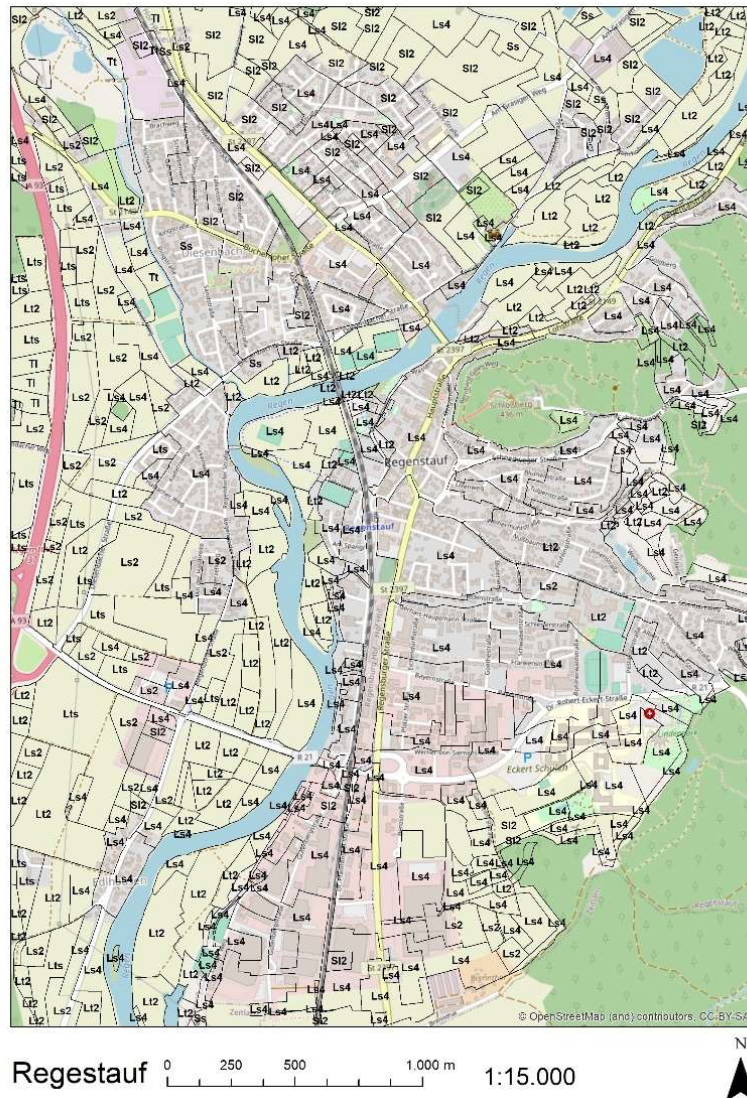


Abbildung 11: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet von Regestauf

Seitens der Gemeinde wurden Baugrundgutachten aus neun Bauvorhaben übermittelt. Die darin enthaltenen Bodenprofile wurden entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise gefiltert, sodass zur Validierung insgesamt 44 Aufschlüsse zur Verfügung standen. Die Bauvorhaben umfassen neben dem Gemeindegebiet auch die Nebenorte Eitlbrunn und Steinsberg.

Der Vergleich der dadurch abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten mit den Werten des Algorithmus ist in Abbildung 12 dargestellt. Wie dort zu sehen ist, werden in den Flächendaten für das Gemeindegebiet



weitestgehend Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1,2 und 1,5 W/(m·K) angegeben. In diesen Bereichen weisen die aus den Bohrungen abgeleiteten Werte weitestgehend Werte  $> 1,5$  W/(m·K) und damit höhere Werte auf. Vereinzelt liegen die Wärmeleitfähigkeiten mit  $< 0,9$  W/(m·K) im Vergleich zu den Flächendaten deutlich darunter. In den westlichen Nebenorten liegt die Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung der Flächendaten vorwiegend zwischen 1,0 und 1,1 W/(m·K) und untergeordnet zwischen 1,1 und 1,2 W/(m·K). Die Werte der Bohrungen in diesem Bereich weisen größere Schwankungen von 1,0 bis  $> 1,5$  W/(m·K) auf.

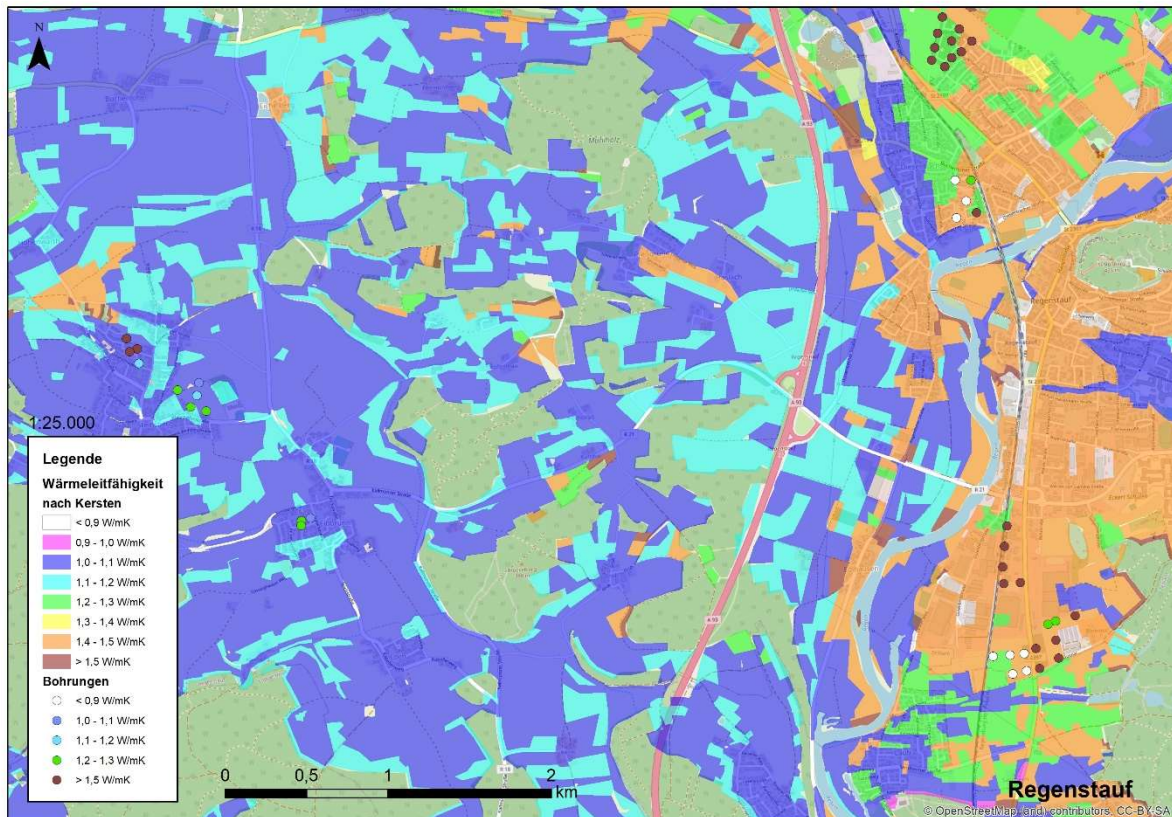


Abbildung 12: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet von Regenstauf

Die im gesamten Untersuchungsbereich auftretenden größeren Abweichungen können durch die vorwiegend anstehenden sehr sandigen Böden (z.B. Ss, Su2, Su3 gemäß Baugrundgutachten) erklärt werden. Bereits geringe Änderungen im Feinanteil (Ton und Schluff) bewirken bei der Berechnung größere Unterschiede hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit. Die Schwankungen innerhalb der Flächendaten sind durch die ausgeprägte Heterogenität der anstehenden Böden im Untersuchungsgebiet zu erklären.

Dementsprechend ergeben sich bei den Flächendaten und bei den Bohrdaten große Unterschiede bei den berechneten Entzugsleistungen (Anhang 4). Diese liegen im gesamten Untersuchungsbereich

zwischen 20 und 55 W/m<sup>2</sup> für das Beispiel Grabenkollektor. Ebenso weisen die Bohrungen Entzugsleistungen von 27 W/m<sup>2</sup> oder 54 W/m<sup>2</sup> auf mit lokal deutlichen Unterschieden oder Übereinstimmungen zu den Flächendaten.

### Wiggensbach

Die Gemeinde Wiggensbach gehört zum Regierungsbezirk Schwaben und liegt im Landkreis Oberallgäu. Gemäß dGK25 stehen vorwiegend würmzeitliche Geschiebemergel sowie Ablagerungen von End- oder Seitenmoränen an. Ebenso sind für das Gemeindegebiet quartäre Talfüllungen ausgewiesen. Nach der Bodenschätzung 1:5.000 ist vorwiegend mit der Bodenart Lt2 (schwach toniger Lehm) zu rechnen (Abbildung 13).

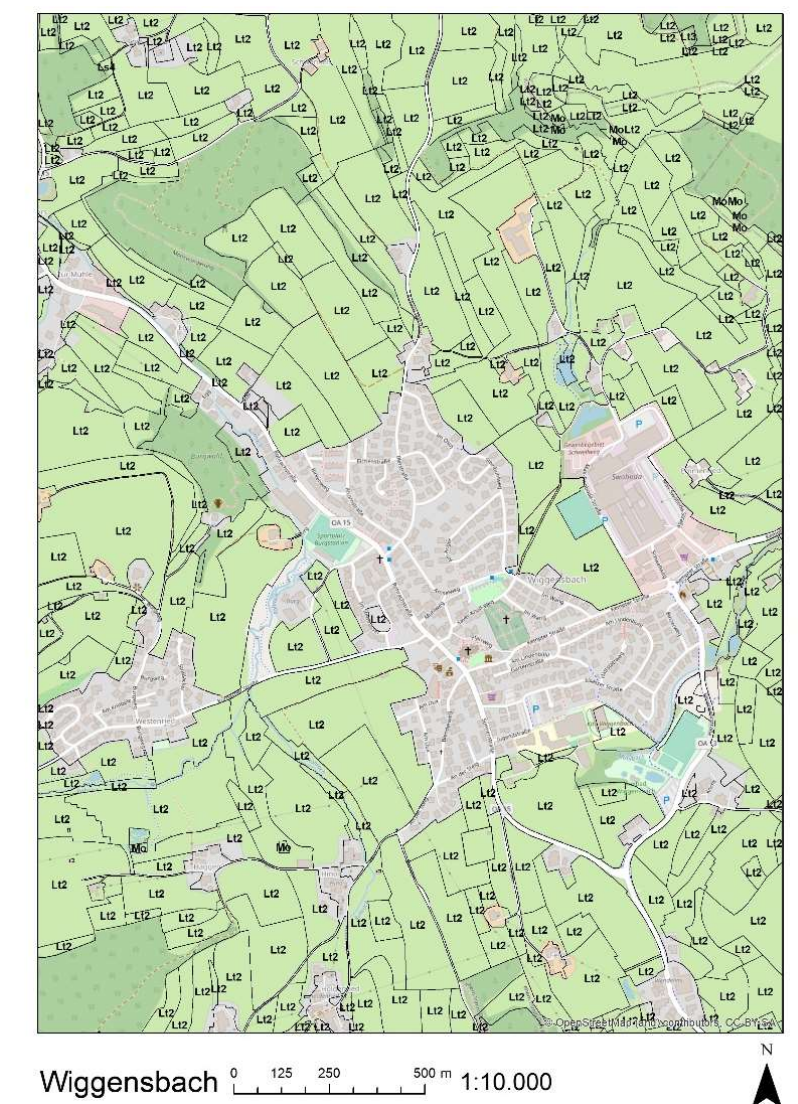


Abbildung 13: Angaben zur Bodenart der Bodenschätzung 1:5.000 nach Übersetzung in KA 5 für das Gemeindegebiet von Wiggensbach

Seitens der Gemeinde Wiggensbach wurden Gutachten von neun Bauvorhaben oder hydrogeologischen Untersuchungen übermittelt. Nach Filterung standen zur Validierung 60 Aufschlüsse zur Verfügung. Die Bauvorhaben umfassen das Gemeindegebiet Wiggensbach sowie die Nebenorte Ermenderst und Ahegg.

Der Vergleich der dadurch abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten mit den Werten des Algorithmus ist in Abbildung 12 dargestellt.

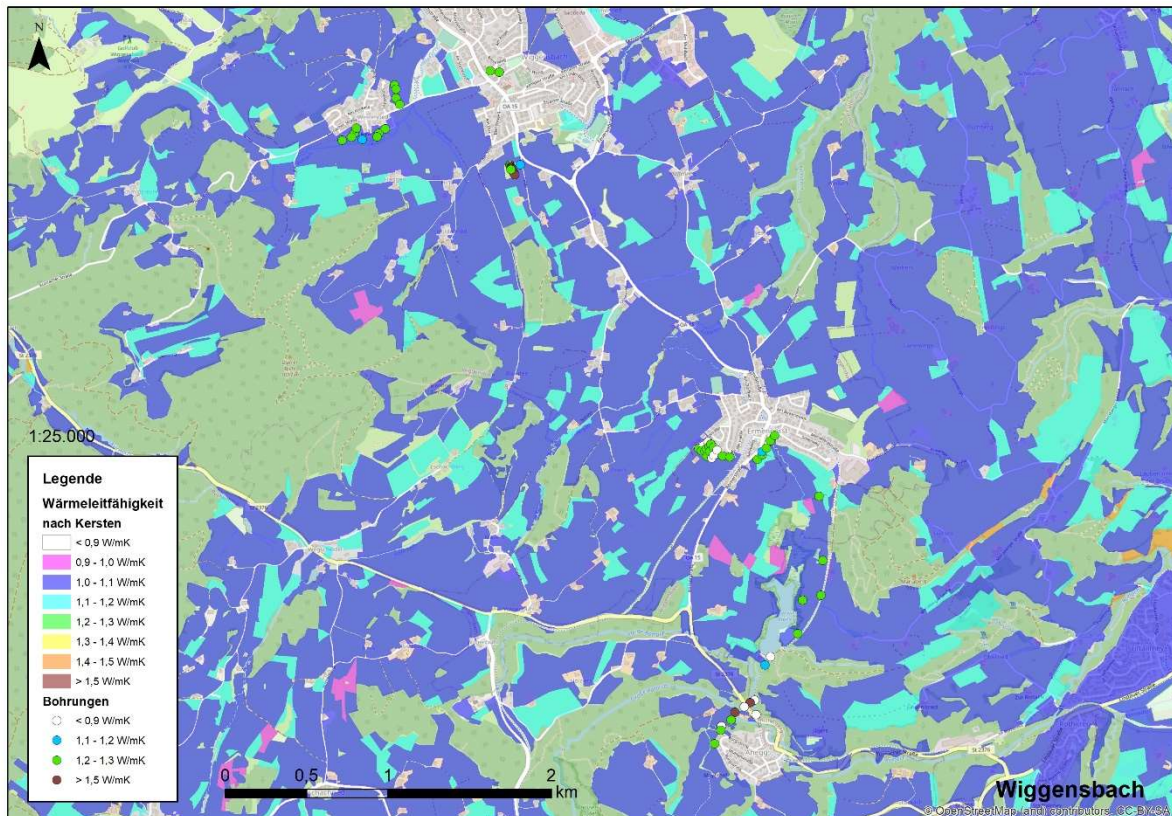


Abbildung 14: Abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten des Algorithmus basierend auf den Flächendaten der Bodenschätzung und abgeleitete Wärmeleitfähigkeiten aus den Bodenprofilen der übermittelten Baugrundgutachten im Gemeindegebiet von Wiggensbach

Weitestgehend werden durch die Flächendaten Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1,0 und 1,2 W/(m·K), im Bereich der Bohrungen vor allem 1,0 bis 1,1 W/(m·K), angegeben. Aus den Bohrdaten können vor allem Wärmeleitfähigkeiten von rd. 1,2 W/(m·K) und somit etwas höhere Werte abgeleitet werden. Bei den auftretenden sehr geringen Werten (< 0,9 W/(m·K)) handelt es sich um anstehenden Fels oder Felszersatz, wodurch keine Bodenart nach KA5 abgeleitet und somit keine Wärmeleitfähigkeit berechnet werden konnte. Ebenso treten vereinzelt deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten auf.

Durch die Bohrdaten wurden weitestgehend sehr schluffige Böden (Lu, Ut2, Us) abgeleitet, welche vor allem hinsichtlich ihres Sandgehalts (< 50 %) mit den Lt2-Böden der Flächendaten übereinstimmen.

Für das Beispiel Grabenkollektor werden gemäß den Flächendaten für das Untersuchungsgebiet weitestgehend Entzugsleistungen zwischen 40 und 51 W/m<sup>2</sup> angegeben (Anhang 5). Auch die Werte der Bohrungen liegen mit 49 und 50 W/m<sup>2</sup> in diesem Bereich.

### **Validierung durch Laboruntersuchungen**

Für die Mustergemeinden Kasendorf, Spiegelau und Merkendorf wurden Bodenproben aus Aufschlüssen wie Bohrungen oder Baugruben im Rahmen von aktuellen Baugrunduntersuchungen oder Baumaßnahmen entnommen. Ausgewählte Proben im Tiefenbereich 1,0 bis 2,0 m wurden anschließend im Labor hinsichtlich Korngrößenverteilung und Wärmeleitfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse wurden für die Validierung des Algorithmus an den ausgewählten Standorten herangezogen.

Die Korngrößenverteilung des Feinbodens (Sand, Schluff, Ton) wurde jeweils durch Siebung und mittels Sedigraph ermittelt. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden mit der Evaporationsmethode in Anlehnung an Markert et al. (2016) gemessen, um Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit eines großen Wassergehaltspektrums zu erhalten. Weitere Information zu den Wärmeleitfähigkeitsmessungen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

*Tabelle 7: Messgeräte und Messkonfiguration der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen je Mustergemeinde mit der Evaporationsmethode*

<b>Mustergemeinde</b>	<b>Messgerät</b>	<b>Nadelsonde</b>	<b>Messgenauigkeit</b>	<b>Messintervall</b>
Kasendorf	Tempos (METER Group, Inc.)	TR-3 (10 cm)	± 10 % im Bereich 0,1 - 4,0 W/(m·K)	variabel
Spiegelau Merkendorf	KD2Pro (Decagon Devices, Inc.)	TR-1 (10 cm)	± 10 % im Bereich 0,2 - 4,0 W/(m·K)	15 min

Für die Validierung wurde sich auf die ermittelten Bodenarten nach KA5 und die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten fokussiert. Die Wärmeleitfähigkeit des Algorithmus basiert auf dem jeweiligen Wassergehalt bei einem Matrixpotential  $p_F = 3,0$ . Da die Laboruntersuchungen teilweise Abweichungen hinsichtlich ihrer Dichte zu den im Algorithmus hinterlegten Werten aufweisen, werden die Wärmeleitfähigkeiten bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt ( $\omega$ ) verglichen.

Im Folgenden werden die Mustergemeinden kurz geologisch sowie bodenkundlich eingeordnet und die Laboruntersuchungen mit den Ergebnissen der Flächendaten verglichen.

### ***Kasendorf***

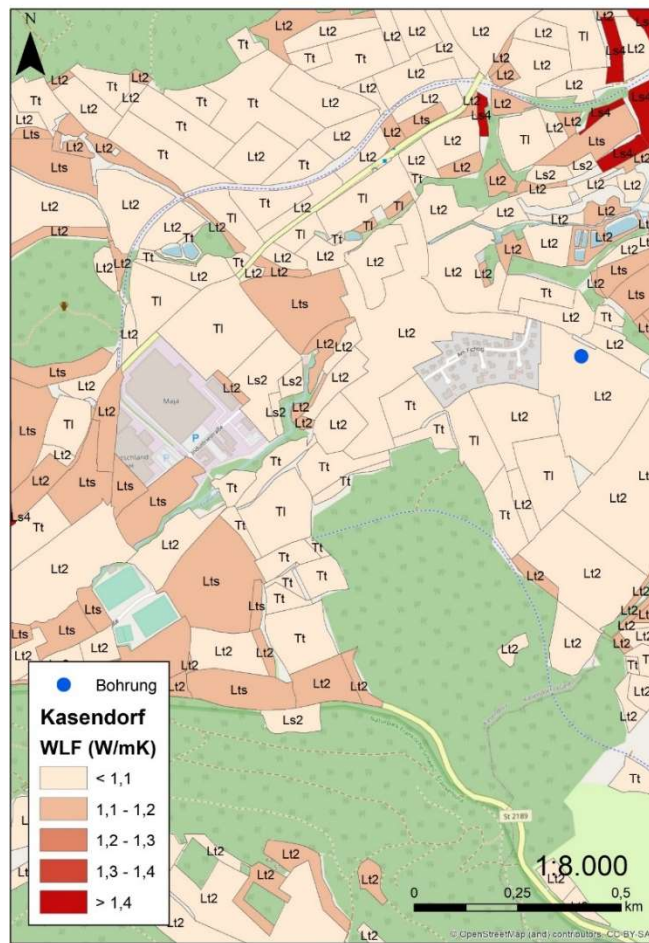
Der Markt Kasendorf gehört zum Regierungsbezirk Oberfranken und liegt im Landkreis Kulmbach. Aufgrund der Lage am Fuß einer Albhochfläche weist das Gemeindegebiet gemäß dGK25 das Anstehen unterschiedlichster geologischer Schichten auf. Hierbei werden Gesteine des Jura (Oberjura bis Unterjura) und quartäre Talfüllungen oder Sinterkalkstein ausgewiesen. Gemäß der Bodenschätzung liegt ebenso eine heterogene Bodenartverteilung vor, wobei vorwiegend Lt2 (schwach toniger Lehm) und untergeordnet Tt (toniger Ton) ausgewiesen ist.

Für die Validierung wurden im Rahmen einer Baugrunduntersuchung an vier Bohrungen Proben entnommen. Die Lage der vier Bohrungen ist in Abbildung 15a dargestellt. Die Laboruntersuchungen erfolgten jeweils an Proben aus dem Tiefenintervall 1,0 bis 2,0 m.

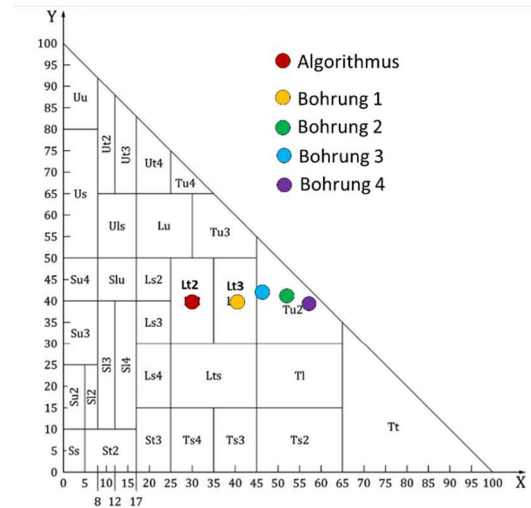
Die Vergleiche der Laboruntersuchungen mit den Werten des Algorithmus sind in Abbildung 15b und Abbildung 15c dargestellt.

Nach Bodenschätzung bzw. Übersetzung durch den Algorithmus steht am Untersuchungsstandort Lt2-Boden (schwach toniger Lehm) an. Die Laboruntersuchungen stufen die Böden in die Kategorien Lt3 (toniger Lehm) und Tu2 (schwach schluffiger Ton) ein. Wie in Abbildung 15b zu sehen ist, weichen die Laborergebnisse von der Korngrößenverteilung des Algorithmus vor allem hinsichtlich ihrer Ton- und Sandgehalte ab. Der Schluffgehalt mit annähernd 40 % stimmt jeweils überein. Die Laborergebnisse zeigen demnach eine natürliche Variation des Ton- und Sandgehaltes im Untersuchungsgebiet an, die durch den Kartierschlüssel der Bodenschätzung nicht erfasst wird.

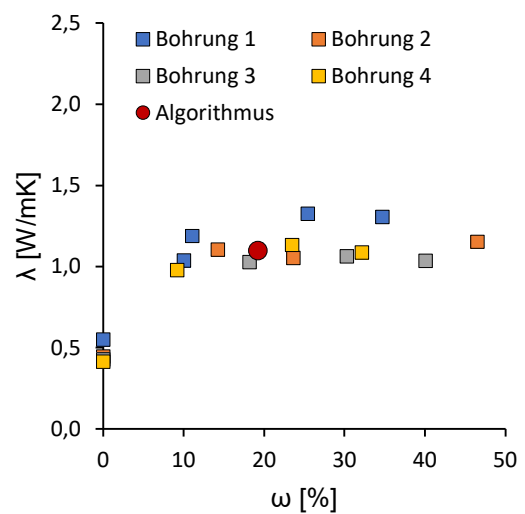
Für den Untersuchungsstandort wird gemäß Algorithmus eine Wärmeleitfähigkeit von rd. 1,1 W/(m·K) angegeben. Die Messergebnisse weisen bei einer Probe einen um 0,2 W/(m·K) höheren Wert auf. Bei den restlichen Messwerten ergeben sich keine Abweichungen bzw. maximal 0,1 W/(m·K) (Tabelle 8). Im Mittel liegen keine Abweichungen vor.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 15: (a) Lage der vier Bohrungen zur Probenahme in Kasendorf (hier vereinfacht als eine Bohrung) und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die Bodenarten nach KA 5; (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für das entsprechende Polygon bei einem pF-Wert von 3,0.

Tabelle 8: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des entsprechenden Polygons bei einem Matrixpotential von  $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 19 %) verglichen.

Algorithmus (1,46 g/cm <sup>3</sup> )	Bohrung 1 (1,42 g/cm <sup>3</sup> )	Bohrung 2 (1,42 g/cm <sup>3</sup> )	Bohrung 3 (1,40 g/cm <sup>3</sup> )	Bohrung 4 (1,41 g/cm <sup>3</sup> )	Mittlere Abweichung
1,1 W/(m·K)	1,3 W/(m·K)	1,1 W/(m·K)	1,0 W/(m·K)	1,1 W/(m·K)	
<b>Differenz:</b>	-0,2 W/(m·K)	0,0 W/(m·K)	0,1 W/(m·K)	0,0 W/(m·K)	0,0 W/(m·K)

**Spiegelau**

Die Gemeinde Spiegelau gehört zum Regierungsbezirk Niederbayern und liegt im Landkreis Freyung-Grafenau. Gemäß dGK25 stehen vorwiegend Meta-Sedimentgesteine des Neoproterozoikum bis Karbon sowie quartäre Fließerde an. Die Bodenschätzung weist vor allem die Bodenart Lt2 (schwach toniger Lehm) aus. Aus zwei Baugruben wurden insgesamt drei Proben aus einer Tiefe zwischen 1,8 und 2,0 m entnommen. Die Lage der Baugruben ist in Abbildung 16a dargestellt. Für jede Probe wurde die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeitsmessung erfolgte für zwei Proben.

Die Vergleiche der Laboruntersuchungen mit den Werten des Algorithmus sind in Abbildung 16b und Abbildung 16c dargestellt.

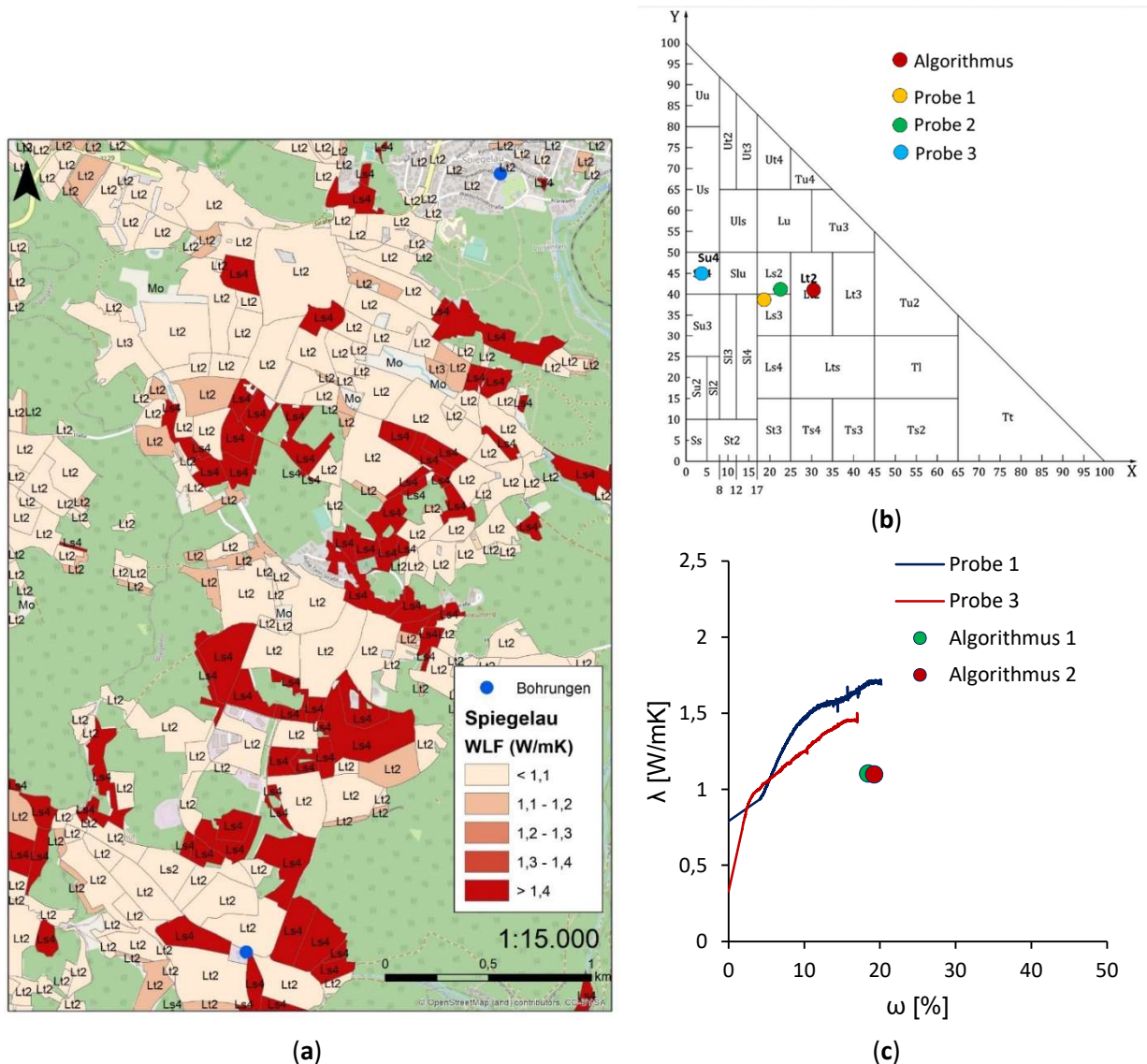


Abbildung 16: (a) Lage der Probenahmestellen in Spiegelau und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die Bodenarten nach

KA5; die beiden beprobten Polygone unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer abgeleiteten Korngrößenverteilung, sodass die Darstellung als einzelner Punkt erfolgt (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für die entsprechende Polygone bei einem  $pF$ -Wert von 3,0.

Nach Bodenschätzung bzw. Übersetzung durch den Algorithmus steht an den Untersuchungsstandorten jeweils Lt2-Boden (schwach toniger Lehm) an. Die Laboruntersuchungen stufen die Böden in die Kategorien Ls2 (schwach sandiger Lehm), Ls3 (sandiger Lehm) und Su4 (stark schluffiger Sand) ein. Wie in Abbildung 16b zu sehen ist, weichen die Laborergebnisse von der Korngrößenverteilung des Algorithmus vor allem hinsichtlich ihrer Ton- und Sandgehalte ab. Der Schluffgehalt liegt mit 38 bis 45 % jeweils in einem ähnlichen Bereich. Die Laborergebnisse zeigen demnach wiederum eine natürliche Variation des Ton- und Sandgehaltes im Untersuchungsgebiet an, die durch den Kartierschlüssel der Bodenschätzung nicht erfasst wird.

Für den Untersuchungsstandort wird gemäß Algorithmus eine Wärmeleitfähigkeit von rd.  $1,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  angegeben. Die Messergebnisse weisen um 0,5 und 0,6  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  höhere Werte auf (Tabelle 9). Durch den Algorithmus wird die Wärmeleitfähigkeit demnach deutlich unterbewertet. Die Verwitterung der Meta-Sedimentgesteine führt zu einer spezifischen mineralogischen Zusammensetzung des entstehenden Feinbodens mit entsprechenden thermischen Eigenschaften. Mineralogische Besonderheiten werden im Algorithmus durch die Verwendung der Formeln nach Kersten (1949) nicht berücksichtigt, was eine plausible Erklärung für die hier beobachteten Abweichungen darstellt.

*Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit den abgeleiteten Werten der entsprechenden Polygone bei einem Matrixpotential von  $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 19 %) verglichen. Die Werte des Algorithmus werden als Mittelwerte angegeben, da sie sich nur geringfügig unterscheiden. Der Wassergehalt der Probe 3 bei Sättigung liegt unterhalb der berücksichtigten 19 %.*

Algorithmus (1,46 $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Probe 1 (1,47 $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Probe 3 (1,57 $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
1,1 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	1,7 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	1,4 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	<b>Mittlere</b>
			<b>Abweichung</b>
<b>Differenz:</b>	-0,6 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	-0,5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	-0,5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

### **Merkendorf**

Die Stadt Merkendorf gehört zum Regierungsbezirk Mittelfranken und liegt im Landkreis Ansbach. Die dGK25 weist für das Gemeindegebiet das Anstehen des Coburger Sandstein und des



Blasensandstein aus. Untergeordnet sind quartäre Talfüllungen vorhanden. Gemäß der Bodenschätzung steht weitestgehend die Bodenart Ls4 (stark sandiger Lehm) an.

Im Rahmen von Baugrunduntersuchungen zur Erschließung eines Neubaugebiets im Osten der Gemeinde wurden elf Rammkernsondierungen durch ein örtliches Baugrundbüro durchgeführt. In Abstimmung mit der Gemeinde wurden die Schichtaufnahmen bzw. Bodenproben aus fünf Bohrungen der FAU übergeben. Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 17a dargestellt. Aus drei repräsentativen Bohrungen aus dem Tiefenbereich zwischen 1,0 und 2,0 m wurden jeweils die Korngrößenverteilung und die Wärmeleitfähigkeiten bestimmt.

Die Vergleiche der Laboruntersuchungen mit den Werten des Algorithmus sind in Abbildung 17b und Abbildung 17c dargestellt.

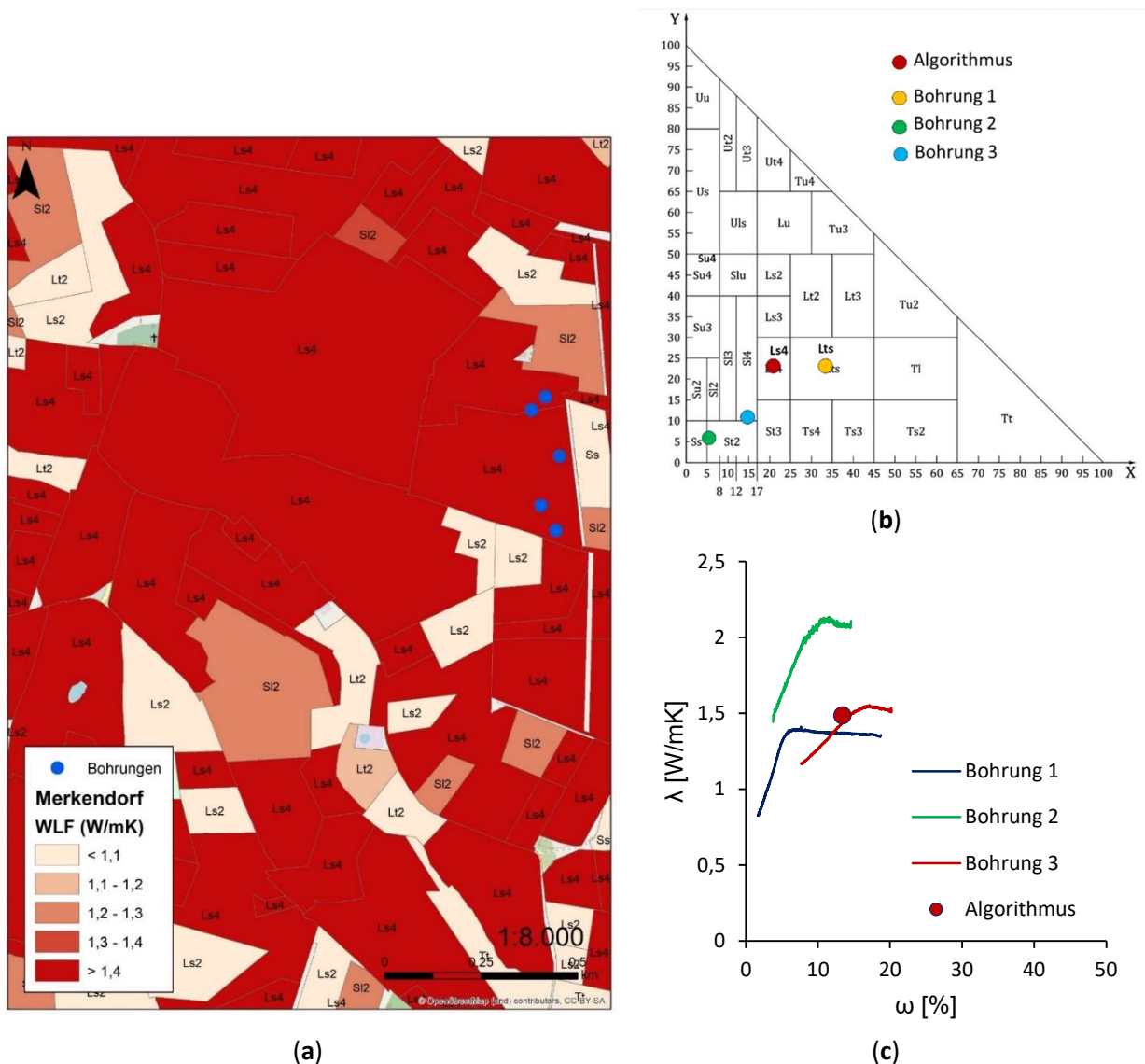


Abbildung 17: (a) Lage der Probenahmestellen in Merkendorf und die Bodenarten nach Bodenschätzung und Einstufung in die abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten; (b) Auswertung der Informationen der Bodenschätzung und der Laboruntersuchungen hinsichtlich der Einstufung in die

*Bodenarten nach KA5; die beiden beprobten Polygone unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer abgeleiteten Korngrößenverteilung, sodass die Darstellung als einzelner Punkt erfolgt (c) Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit dem abgeleiteten Wert des Algorithmus für die entsprechende Polygone bei einem pF-Wert von 3,0. Dadurch dass sich die abgeleiteten Werte der beiden Polygone nicht unterscheiden, erfolgt die Darstellung als ein Wert.*

Nach Bodenschätzung bzw. Übersetzung durch den Algorithmus steht an den Untersuchungsstandorten jeweils Ls4 Boden (stark sandiger Lehm) an. Die Laboruntersuchungen stufen die Böden in die Kategorien Lts (sandig-toniger Lehm), SI4 (stark lehmiger Sand) und St2 (schwach toniger Sand) ein. Die Laborergebnisse zeigen demnach wiederum eine natürliche Variation des Ton-, Schluff und Sandgehaltes im Untersuchungsgebiet an, die durch den Kartierschlüssel nicht erfasst wird. Diese Heterogenität geben auch die Schichtaufnahmen der Bohrungen im Untersuchungsgebiet wieder, wobei vor allem der Ton- und Schluffgehalt der anstehenden Sandböden variiert bzw. auch Ton- und Schlufflagen zwischengeschaltet sind. Außerdem wurde teilweise bereits Sandstein im untersuchten Tiefenintervall angetroffen.

Für den Untersuchungsstandort wird gemäß Algorithmus eine Wärmeleitfähigkeit von rd. 1,5 W/(m·K) angegeben. Die Messergebnisse an zwei Proben (Lts und SI4) weisen hierzu keine oder nur geringe Abweichungen auf (Tabelle 10). Die Probe der Bohrung 2 (St2) liegt mit 2,1 W/(m·K) deutlich über den ermittelten Flächendaten. Dies ist vor allem auf den hohen Sandgehalt (89 %) im Vergleich zum im Algorithmus hinterlegten Wert zurückzuführen, was sich positiv auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt.

*Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit den abgeleiteten Werten der entsprechenden Polygone bei einem Matrixpotential von  $pF = 3,0$ ; aufgrund der Dichteabweichungen (Angaben in Klammern) werden die Werte bei gleichem gravimetrischen Wassergehalt (hier 13 %) verglichen. Die Werte der beiden beprobten Polygone des Algorithmus werden als einziger Wert angegeben, da sie sich nicht unterscheiden.*

<b>Algorithmus</b> <b>(1,52 g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Bohrung 1</b> <b>(1,60 g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Bohrung 2</b> <b>(1,58 g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Bohrung 3</b> <b>(1,39 g/cm<sup>3</sup>)</b>	
1,5 W/(m·K)	1,4 W/(m·K)	2,1 W/(m·K)	1,4 W/(m·K)	<b>Mittlere</b>
				<b>Abweichung</b>
<b>Differenz:</b>	0,1 W/(m·K)	-0,6 W/(m·K)	0,0 W/(m·K)	-0,1 W/(m·K)

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Validierung

Die Validierung des Algorithmus zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde an insgesamt sechs Mustergemeinden durchgeführt.

Bei der Validierung der Wärmeleitfähigkeiten anhand der Bohrdaten aus Baugrundgutachten zeigen sich bei Wiggensbach und Markt Schwaben in einer großflächigen Betrachtung weitestgehend übereinstimmende Werte bzw. etwas höhere Werte bei den Bohrdaten. Im Gebiet von Regenstauf treten hohe Schwankungen aufgrund der heterogenen Bodenbeschaffenheit sowie der stark sandigen Böden auf. Grundsätzlich zeigen sich Abweichungen bei den aus den Gutachten abgeleiteten Bodenarten zu den aus den Flächendaten abgeleiteten Bodenarten. Dies ist jedoch – neben der Übersetzung der Angaben der Bodenschätzung – vor allem auf die Übersetzung der geotechnischen Bodenansprachen zurückzuführen. Die in den Gutachten getroffenen Ansprachen beruhen weitestgehend nicht auf Korngrößenanalysen, sondern auf die Bodenansprache der Fingerprobe und weisen somit eine unterschiedliche Qualität auf. Durch das anschließende Übersetzungsschema können zusätzlich Abweichungen auftreten.

Die im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zeigen keine oder nur geringe Abweichungen zu den Flächendaten bei den Mustergemeinden Kasendorf und weitestgehend Merkendorf. Bei der Mustergemeinde Spiegelau und bei einer Probe aus Merkendorf liegen die Messwerte deutlich über den Werten der Flächendaten – aufgrund eines hohen Sandgehalts, der in den Flächendaten nicht wiedergegeben wird, oder spezifischen mineralogischen Zusammensetzungen, die im Algorithmus nicht berücksichtigt werden.

Der Vergleich mit den Mustergemeinden zeigt demnach weitestgehend gute Übereinstimmungen zu den Messwerten oder zu den aus den Baugrundgutachten abgeleiteten Werten. Lokal führt der Algorithmus zu einer Unterbewertung des geothermischen Potentials. Dies ist vor allem hinsichtlich der Planung und Auslegung von geothermischen Systemen unter Berücksichtigung einer gewissen Sicherheit („auf der sicheren Seite liegend“) im Vergleich zu einer theoretischen Überbewertung als positiv zu bewerten. Bei sehr heterogenen Untergrundverhältnissen oder sehr sandigen Böden kann es lokal zu höheren Abweichungen kommen (z.B. Regenstauf). Lokale Änderungen in der Bodenzusammensetzung bzw. eine natürliche Variation können bedingt durch den Kartierschlüssel der Bodenschätzung innerhalb der digitalen Flächendaten nicht punktgenau wiedergegeben werden.

## **AP5: Einbauanleitungen verschiedener Geothermiesysteme**

Für die Erstellung der Einbauanleitungen verschiedener Geothermiesysteme wurde auf dem Gelände der Fa. Tiefbau Leicht in Schmerldorf ein Testfeld realisiert. Hersteller von horizontalen Geothermiesystemen haben hier die Möglichkeit, ihre Produkte unter standardisierten Bedingungen einbauen zu lassen. Zugleich wird der Einbau objektiv dokumentiert. Um einen vergleichbaren Wert

hinsichtlich der Einbaudauer und der benötigten Fläche zu erhalten, wurde mit den verschiedenen Herstellern vereinbart, die jeweiligen Systeme auf eine Leistung von 3 kW auszulegen.

Aufgrund der durch die Corona-Pandemie verursachten Verzögerungen konnte erst 2022 mit dem Einbau der einzelnen Systeme begonnen werden. Letztendlich wurden folgende Systeme für das Testfeld eingeplant:

- Boden-Klimatauscher der Fa. Steinhäuser
- Ringgrabenkollektor der Fa. RGK (Inh. Arne Komposch)
- 8er-Kollektor der Fa. Freisolar
- GeoCollect Erdwärmeabsorber der Fa. GeoCollect
- Erdwärmekorb der Fa. BetaTherm
- Erdwärmekollektor der Fa. Frank
- Eingepflügter Erdwärmetauscher der Fa. Föckersberger

Im Vorfeld wurden Wärmeleitfähigkeiten sowie Entzugsleistungen unter Zuhilfenahme des in AP2 entwickelten Algorithmus abgeschätzt (Abbildung 18). In Rot ist dabei der Bereich gekennzeichnet, der von der Fa. Tiefbau Leicht als Testfeld zur Verfügung gestellt wurde.

Am 19. Mai 2022 wurden zwei Rammkernsondierungen durchgeführt, um die vorherrschende Bodenart und den jeweiligen Wassergehalt zu bestimmen. An beiden gewählten Standorten überwiegen der Schluff- und der Tonanteil (Tabelle 11). Der Abgleich mit der bodenkundlichen Kartieranleitung 2005 (KA 5) ergibt, dass für beide Standorte die Bodenart Lt3 vorherrscht. Die zwei Standorte können somit der Bodenarten-Gruppe der Schlufftone zugeordnet werden.

*Tabelle 11: Ergebnisse der Korngrößenanalyse und der Wassergehaltsbestimmung.*

Entnahmepunkt	Entnahmetiefe [cm]	Gesamtsand [%]	Gesamtschluff [%]	Gesamtton [%]	Wassergehalt Massen [%]
RKS 3	0-40	18,06	45,71	36,22	20
Ostwert: 4427927	40-145	11,34	47,61	41,05	13
Nordwert: 5534555	150-300	17,70	44,16	38,15	24
RKS 4	5-40	18,12	44,39	37,50	18
Ostwert: 4427925	50-160	22,81	41,56	35,63	21
Nordwert: 5534570	160-300	14,41	47,77	37,82	22

Aus dem direkten Abgleich mit den bereitgestellten Bodendaten der digitalen Bodenschätzung ist für diesen Standort die Bodenart mit Lts angegeben (Abbildung 19), wodurch sich eine Zugehörigkeit zu der Bodenarten-Gruppe de Tonlehme ergibt. Die ermittelte Bodenart aus den Felduntersuchungen

und die Bodenart aus dem Datensatz der digitalen Bodenschätzung zeigen eine sehr ähnliche Korngrößenzusammensetzung. Aus der Zusammenschau lässt sich festhalten, dass der Datensatz der digitalen Bodenschätzung, welche uns für diese Projekt zu Verfügung gestellt wurde, für den Testfeldstandort eine gute Übereinstimmung mit dem Feldmessungen hinsichtlich dem Parameter Bodenart ergibt.

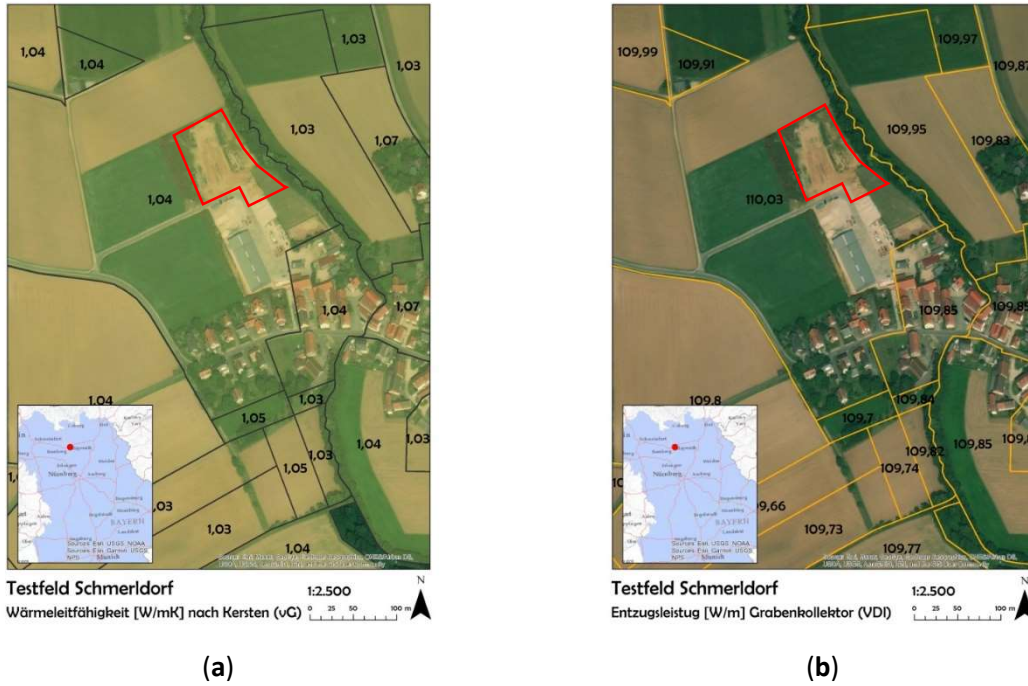


Abbildung 18: (a) Wärmeleitfähigkeit nach Kersten und (b) Entzugsleistung nach VDI 4640



Abbildung 19: Bodenart nach KA 5

Die Einbeziehung zusätzlicher Daten aus Bohrprofilen (Abbildung 20) von diesem Testfeldstandort führt zu einem identischen Ergebnis. Bei Sondierungspunkt 3 (RKS 3) herrschen bis in 40 cm Tiefe schwach toniger, schwach feinsandiger Schluff gefolgt von stark bis schwach schluffigem Ton vor. Der Sondierungspunkt 4 (RKS 4) zeigt die gleiche Schichtabfolge, abgesehen von der geringeren Mächtigkeit des obersten Schluff-Horizonts. Somit sind auch hier die Bodenarten Schluff und Ton für die beprobten Standorte vorherrschend. Eine Einordnung nach KA5 in den Übergangsbereich von Lts zu Lt3 ist durchaus passend.

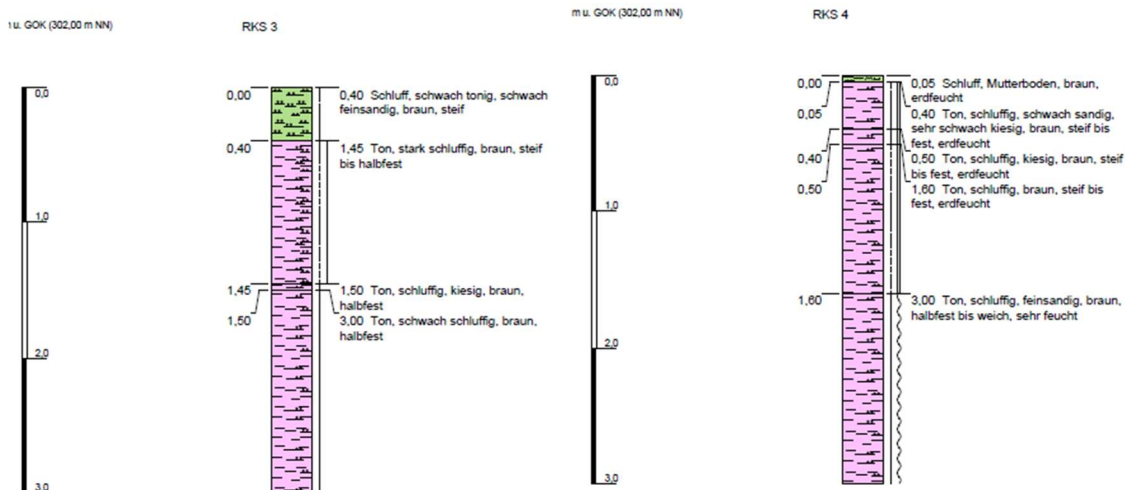


Abbildung 20: Bohrprofile RKS 3 und RKS 4

Im Mai 2022 wurde das erste System, der Boden-Klima-Tauscher der Fa. Steinhäuser eingebracht (Abbildung 21). Die Einbaudokumentation mit den Angaben zu technischen Parametern ist exemplarisch in Tabelle 12 dargestellt. Die restlichen Systeme (Stand März 2023) wurden im Oktober 2022 eingebaut. Dabei handelt es sich um den 8er-Kollektor der Fa. Freisolar (Abbildung 22) und den Ringgrabenkollektor der Fa. RGK (Abbildung 23). Die entsprechenden Einbaudokumentationen sind zur besseren Übersicht im Anhang beigefügt. Auch für die noch fehlenden Systeme werden im Laufe der Zeit die Einbauanleitungen ergänzt.

Tabelle 12: Einbaudokumentation Fa. Steinhäuser

<b>Einbaudokumentation – Testfeld Schmerldorf/Memmelsdorf (Gelände Fa. Leicht)</b>				
<b>Hersteller/System (inkl. Kontaktdaten):</b> Steinhäuser GmbH & Co. KG : Boden-Klima-Tauscher (vertikal eingefräst) Industriestraße 10, 96120 Bischberg-Trosdorf				
<b>Platzbedarf</b>				
<b>Fläche reines System (3 kW)</b>	<b>Arbeitsfläche (Baustelle, Miete)</b>	<b>Einbautiefe</b>	<b>Aushubvolumen</b>	<b>Bettungsvolumen</b>
normal 20 m <sup>2</sup> vertikal 2 m <sup>2</sup>	20 m <sup>2</sup>	2,30 m	5 m <sup>3</sup>	Keine Bettung eingebracht
<b>Zeitaspekt</b>				
<b>Ausschachten</b>	<b>Bettung einbringen</b>	<b>System verlegen</b>	<b>Verfüllen</b>	<b>Anschluss des Systems</b>
30 min mit Vorbereitung	Keine Bettung eingebracht	10 min	20 min Einschlämmen und Verfüllen	System noch nicht angeschlossen
<b>Sonstige Bedingungen und Besonderheiten</b>				
<b>Abstand zu Gebäuden/ Systemen</b>	<b>Anforderung Bettungsmaterial</b>	<b>Lage zu Schacht, Senke etc.</b>		
noch keine anderen Systeme verbaut	Keine Bettung eingebracht	40 m (Senke)		
<b>Besonderheiten beim Einbau</b>				
<b>Anlieferung, Verpackung, Lagerung, Gewicht</b>	<b>Verlegung durch geschultes Personal</b>	<b>Bes. Maschineneinsatz notwendig</b>		
2 Module auf Anhänger	ja	Fräse		



Abbildung 21: Vertikaler Einbau des Boden-Klima-Tauschers der Fa. Steinhäuser



Abbildung 22: Einbau des 8er-Kollektors der Fa. Freisolar





Abbildung 23: Einbau des Ringgrabenkollektors der Fa. RGK

Für das zweite Quartal 2023 sind der Einbau weiterer Geothermiesysteme (Erdwärmekorb, Erdwärmekollektor und eingepflügter Erdwärmetauscher, Erdwärmeabsorber) geplant. Im Anschluss daran wird die die Anbindung der einzelnen Systeme an den als Senke geplanten Bürocontainer erfolgen.

Der Bürocontainer (Abbildung 24) ist ein handelsüblicher 20-Fuß-Container. Bei einer Höhe von 2,80 m (Rauminnenhöhe 2,50 m) misst er 6,00 m in der Länge und 2,40 m in der Breite. Der Container besitzt eine Fläche von 13,88 m<sup>2</sup> und ein Volumen von 33,1 m<sup>3</sup>. Um eine effiziente Nutzung der bereitgestellten Wärme zu gewährleisten, sind im Baucontainer eine Fußbodenheizung sowie eine Deckenheizung verbaut. Damit kann der Container effizient mittels einer modulierenden 3KW Wärmepumpe geheizt bzw. gekühlt werden.



*Abbildung 24: Als Senke geplanter Bürocontainer*

## **AP6: Erstellung von oberflächennahen geothermischen Potenzialkarten**

Durch den in Rahmen des AP2 erarbeiteten Handlungsleitfaden können Potentialkarten für oberflächennahste Geothermiesysteme auf Basis der digitalen Bodenschätzung 1:5000 flächendeckend für Bayern generiert werden. Durch den Algorithmus kann das geothermische Potential systemunabhängig, beschrieben durch den Bodenparameter Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 25), sowie systemspezifisch, beschrieben durch die Entzugsleistung (Abbildung 26), dargestellt werden. Demnach weisen 97 % der nutzbaren Fläche von Bayern eine Wärmeleitfähigkeit  $> 1$  W/(m·K) auf, sodass dort oberflächennahste Geothermie effizient genutzt werden kann. Auszüge der in diesem AP entwickelten Potentialkarten wurden ebenfalls für die in AP 4 durchgeführte Validierung im Bereich der Mustergemeinden herangezogen. Die entwickelten Potentialkarten werden auch im Zuge der Entwicklung des EnergieAtlas Bayern für sehr oberflächennahe Geothermiesysteme implementiert.

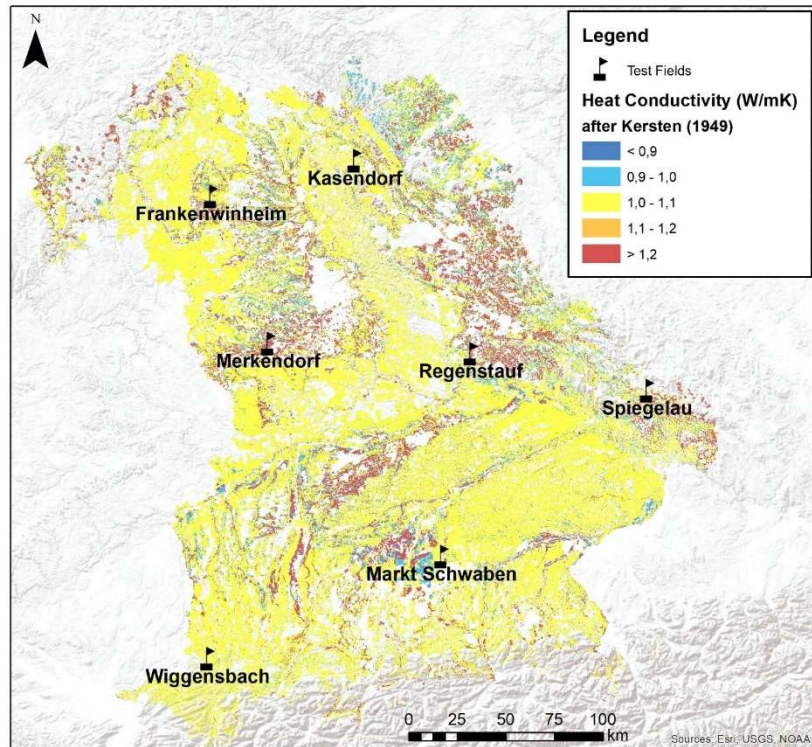


Abbildung 25: Potentialkarte: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten in Bayern und Lage der Mustergemeinden (Quelle: Bertermann et al. (2021))

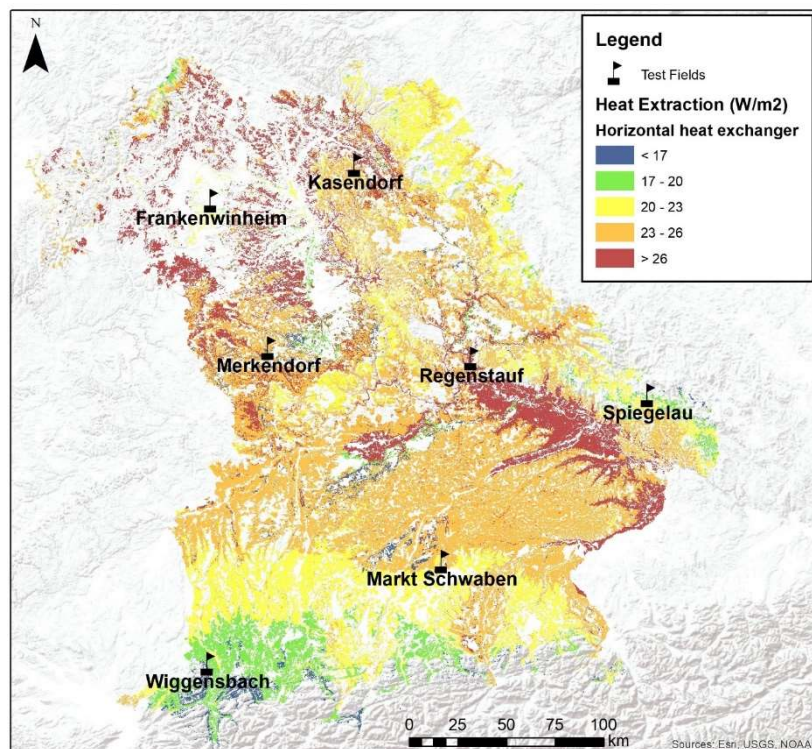


Abbildung 26: Potentialkarte: Verteilung der berechneten Entzugsenergie in Bayern für horizontale Erdwärmekollektoren (Quelle: Bertermann et al. (2021))

## AP7: Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der in AP2 entwickelte Algorithmus wurde an der Konferenz „Alternative Energy Sources, Materials and Technologies (AESMT'21)“ in Form eines Posters (Bertermann et al. 2021) in einem wissenschaftlichen und internationalen Rahmen vorgestellt. Des Weiteren soll im wissenschaftlichen Kontext das ausgearbeitete Konzept in Form eines Papers veröffentlicht werden.

Das im Rahmen des Projektes entstandene Testfeld „Geothermie Labor Schmerldorf“ kann weiterhin als Lehrojekt sowie für Besichtigungen verschiedener Einrichtungen herangezogen werden. Ebenso sind dort weitere Installationen verschiedener oberflächennaher Geothermiesysteme geplant.

Zu diesem Zweck sollen für die jeweiligen Geothermiesysteme Infotafeln angebracht werden. Die Infotafeln enthalten Kurzinformationen der jeweiligen Systeme sowie Bilder vom Einbau. Ebenso enthalten sind QR-Codes mit einem direkten Link zur Homepage des entsprechenden Herstellers sowie zur AG Oberflächennahe Geothermie der Friedrich-Alexander-Universität (FAU). In Abbildung 27 ist exemplarisch eine Infotafel - hier im Design beispielhaft für den Boden-Klima-Tauscher der Fa. Steinhäuser – zu sehen.

### Feld 1: Boden-Klima-Tauscher







Bild 1: Vertikales Einbringen Boden-Klima-Tauscher

**Steckbrief:**

Der Boden-Klima-Tauscher der Fa. Steinhäuser misst 200 cm in der Breite und 5 cm in der Höhe. Durch die unterschiedlichen Längen von 500 bis 1200 cm und den Varianten horizontaler und vertikaler Einbringung kann er vielseitig eingesetzt werden. Das verwendete PE-Xa-Rohr der Dimension DN 25 garantiert höchste Sicherheit und erlaubt einen Einbau unter Gebäuden.

Wissenschaftlich begleitet durch die AG Oberflächennahe Geothermie,  
GeoZentrum Nordbayern.





Bild 2: Boden-Klima-Tauscher



Abbildung 27: Vorschlag für die Infotafeln der jeweiligen Systeme am Beispiel der Fa. Steinhäuser

Des Weiteren können der entwickelte Algorithmus sowie die Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf Nachfrage verschiedenen Berufsgruppen sowie Einrichtungen im Rahmen von Schulungen oder Vorträgen vorgestellt werden. Das Lehrobjekt wird beispielsweise auch in Vorlesungen zur oberflächennahen Geothermie an der FAU einbezogen.

Wie vereinbart wird die FAU der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung für Vorträge oder Seminare zu dem Thema auch im Nachgang dieses Projektes zur Verfügung stehen. Das Forschungsprojekt wird zudem auf den generellen Medienangeboten der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung sowie der Website KlimaChancen ([klimachancen.bayern](http://klimachancen.bayern)) digital aufbereitet.

## Zusammenfassung

Auf Basis der Daten der digitalen Bodenschätzung 1:5000 wurde ein Handlungsleitfaden zur geothermische Potentialermittlung ausgearbeitet. Als weitere Grundlagen dienten die Informationen der DIN 4710, der VDI 4640 und dem Digitalen Geländemodell. Die Datenverarbeitung und räumliche Verankerung erfolgte mittels GIS Software.

Zum einen wurde mit der Wärmeleitfähigkeit ein Potential bestimmt, welches auf verschiedenen bodenphysikalischen Parametern beruht und unabhängig von einem bestimmten System anwendbar ist. Zum anderen wurde die Entzugsleistung als systemspezifisches Potential ermittelt, welches hauptsächlich auf der VDI 4640 und klimatischen Daten beruht. Nach der Ausarbeitung der Berechnungskonzepte konnten diese flächendeckend für Bayern angewandt und als Ergebnis Potentialkarten erstellt werden. Diese sind zudem als Layer im Energie-Atlas Bayern vorgesehen.

Die berechneten geothermischen Potentiale zeigen eine effiziente Nutzbarkeit oberflächennahster Geothermie für > 97 % der nutzbaren Fläche von Bayern an.

Der Algorithmus wurde anhand von sechs Mustergemeinden validiert. Hierfür standen in drei Mustergemeinden als Datengrundlage mehrere Baugrundgutachten zur Verfügung. Die daraus abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten zeigen weitestgehend nur geringe Abweichungen zu den in diesem Projekt ermittelten Werten. Höhere Abweichungen treten vor allem bei stark heterogenen Bodenverhältnissen und sehr sandigen Böden auf. Im Vergleich zu den im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an in-Situ-Proben aus den anderen drei Mustergemeinden kann eine gute Übereinstimmung oder eine Unterbewertung der Wärmeleitfähigkeit durch den Algorithmus festgestellt werden. Die lokale Unterbewertung des geothermischen Potentials ist vor allem hinsichtlich der Planung und Auslegung von geothermischen Systemen unter Berücksichtigung einer

gewissen Sicherheit („auf der sicheren Seite liegend“) im Vergleich zu einer theoretischen Überbewertung als positiv zu bewerten.

Zur Erstellung der Einbauanleitungen verschiedener horizontaler Geothermiesysteme wurde ein Testfeld in der Nähe von Bamberg (Geothermie-Labor Schmerldorf) realisiert. Unter standardisierten Bedingungen konnten so Systeme eingebaut und der Einbau dokumentiert werden. Für eine bodenkundliche Standorterkundung wurden zwei Rammkernsondierungen durchgeführt. In den Proben überwiegen der Schluff- und der Tonanteil, welche für den Testfeldstandort eine gute Übereinstimmung zu den digitalen Flächendaten ergibt. In der Projektlaufzeit konnten drei verschiedene Systeme eingebaut werden. Die Installation weiterer Geothermiesysteme ist geplant.

## Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umwelt: digitale Geologische Karte 1:25.000 (dGK25), UmweltAtlas, <https://www.umweltatlas.bayern.de>

Bertermann, D., Jovic, N., Rammler, M., Schwarz, H. und Wagner, J. (2021): Mapping of Very Shallow Geothermal Potentials in Rural Areas: a Case Study of Bavaria (Germany); Poster in Fourth International Scientific Conference "Alternative Energy Sources, Materials and Technologies (AESMT'21)", 14.-15.06.2021, Ruse, Bulgarien

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019: Energiedaten: Gesamtausgabe, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.html>

Bodenkundliche Kartieranleitung KA5, 2005: – 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 438 pp., ISBN 978-3-510-95920-4.

DIN 4023, 2006: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen

DIN 4220, 2017 (Entwurf): Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen)

DIN 4710, 2003: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland

DIN EN ISO 14688, 2017: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden

Ingenieurgesellschaft Dipl. Geol. Brüll, Prof. Czurda & Coll. mbH, 2019: Sanierung der Straße Riedlingen – Trunzen; Untersuchung vorhandener Fahrbahnaufbau / Baugrunduntersuchung, Untersuchungsbericht Nr. 190113B, Altusried, 11.03.2019

IWU (Hrsg.), 2015: Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2. Aufl. Darmstadt

Kersten, M.S., 1949: Thermal Properties of Soils. Bull. Eng. Exp. Stn. Univ. Minn. Inst. Technol., Engineering Experiment Station 52, 227.

Markert, A., Peters, A. und Wessolek, G., 2016: Analysis of the Evaporation Method to Obtain Soil Thermal Conductivity Data in the Full Moisture Range, Soil Sci. Soc. Am. J., 80, 275-283

VDI 4640-2, 2019: Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

## Anhang

### Anhang 1: Einbaudokumentation Ringgrabenkollektor

<b>Einbaudokumentation – Testfeld Schmerldorf/Memmelsdorf (Gelände Fa. Leicht)</b>				
<b>Hersteller/System (inkl. Kontaktdaten):</b> RGK e.U. Inh. Ing. Arne Dietmar Komposch: Ringgrabenkollektor Radgrabenstraße 4, A-4611 Buchkirchen				
<b>Platzbedarf</b>				
<b>Fläche reines System (3 kW)</b>	<b>Arbeitsfläche (Baustelle, Miete)</b>	<b>Einbautiefe</b>	<b>Aushubvolumen</b>	<b>Bettungsvolumen</b>
60 m <sup>2</sup>	200 m <sup>2</sup>	1,5 - 3 m	140 m <sup>3</sup>	Keine Bettung eingebracht (PE100-RC-Rohr)
<b>Zeitaspekt</b>				
<b>Ausschachten</b>	<b>Bettung einbringen</b>	<b>System verlegen</b>	<b>Verfüllen</b>	<b>Anschluss des Systems</b>
3 h	Keine Bettung eingebracht	1,5 h	1,5 h	System noch nicht angeschlossen
<b>Sonstige Bedingungen und Besonderheiten</b>				
<b>Abstand zu Gebäuden/Systemen</b>	<b>Anforderung Bettungsmaterial</b>	<b>Lage zu Schacht, Senke etc.</b>		
20 m nördlich Steinhäuser	Keine Bettung eingebracht	60 m (Senke)		
<b>Besonderheiten beim Einbau</b>				
<b>Anlieferung, Verpackung, Lagerung, Gewicht</b>	<b>Verlegung durch geschultes Personal</b>	<b>Bes. Maschineneinsatz notwendig</b>		
Kompakter Rohrbund (PKW-Anhänger)	nein, projektbezogene Planung	nein		



## Anhang 2: Einbaudokumentation 8er-Kollektor

<b>Einbaudokumentation – Testfeld Schmerldorf/Memmelsdorf (Gelände Fa. Leicht)</b>				
<b>Hersteller/System (inkl. Kontaktdaten):</b> Freisolar GmbH : 8er-Kollektor Elsavatalstraße 13, 63820 Elsenfeld				
<b>Platzbedarf</b>				
<b>Fläche reines System (2 kW)</b>	<b>Arbeitsfläche (Baustelle, Miete)</b>	<b>Einbautiefe</b>	<b>Aushubvolumen</b>	<b>Bettungsvolumen</b>
13 m <sup>2</sup>	ca. 20 m <sup>2</sup>	2 m	25,6 m <sup>3</sup>	10,2 m <sup>3</sup>
<b>Zeitaspekt</b>				
<b>Ausschachten</b>	<b>Bettung einbringen</b>	<b>System verlegen</b>	<b>Verfüllen</b>	<b>Anschluss des Systems</b>
1 h	30 m	2 h	1 h	System noch nicht angeschlossen
<b>Sonstige Bedingungen und Besonderheiten</b>				
<b>Abstand zu Gebäuden/Systemen</b>	<b>Anforderung Bettungsmaterial</b>	<b>Lage zu Schacht, Senke etc.</b>		
5 m westlich RGK	Normaler Sand	60 m (Senke)		
<b>Besonderheiten beim Einbau</b>				
<b>Anlieferung, Verpackung, Lagerung, Gewicht</b>	<b>Verlegung durch geschultes Personal</b>	<b>Bes. Maschineneinsatz notwendig</b>		
Kleintransporter	ja	Schweißgerät		



Anhang 5: Potentialkarte für Wigginsbach für Entzugsleistung am Beispiel Grabenkollektor

