

Erdwärme: Harmonisierte Methoden zur Potenzialdarstellung

Schriftenreihe, Heft 7/2021



Das EU-Projekt GeoPLASMA-CE: Erdwärme – harmonisierte Methoden zur Darstellung und Bewertung des Potenzials sowie Erfolgskriterien für eine nachhaltige Nutzung

Karina Hofmann, Dr. Ines Görz, Dr. Peter Riedel, Martina Heiermann (LfULG, Sächsischer Geologischer Dienst)
Jan Franěk, Jan Jelének, Jan Holeček (Tschechischer Geologischer Dienst)

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Ziel des Projekts	7
2	Das Projekt GeoPLASMA-CE	9
2.1	Das Förderprogramm und die Partner.....	9
2.2	Arbeitspakete des Projekts GeoPLASMA-CE	10
2.3	Die Pilotgebiete.....	13
2.4	Ländliche und urbane Gebiete	16
2.5	Aufgaben des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	17
3	Harmonisierte Workflows	18
3.1	Einleitung	18
3.2	Workflow für geologische 3D-Modellierung	19
3.2.1	Konzeptionelles geologisches Modell.....	19
3.2.2	Datenvorbereitung	21
3.2.3	Durchführung der Modellierung	23
3.2.4	Post-Processing	26
3.3	Workflow für Standorteignungskarten Risiken und Konflikte geothermischer Nutzungen	26
3.3.1	Datenvorbereitung	28
3.3.2	Arbeit mit Vektordaten.....	29
3.3.2.1	Aufbau einer thematischen Karte im Vektorformat	29
3.3.2.2	Konflikt-Layer.....	29
3.3.2.3	Verbreitungs-Layer	30
3.3.2.4	Kombination von Konflikt-Layer und Verbreitungs-Layer zu einer thematischen Karte	30
3.3.2.5	Ampelkarte für die generelle Eignung eines Standorts für Erdwärmennutzungen	30
3.3.3	Arbeit mit Rasterdaten	32
3.4	Geothermisches Potenzial für Erdwärmesonden.....	32
3.4.1	Spezifische Wärmeentzugsleistung.....	34
3.4.2	Mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds in einem Tiefenintervall.....	36
3.4.2.1	Einleitung	36
3.4.2.2	Eingangsdaten.....	37
3.4.2.3	Berechnung der mittleren Wärmeleitfähigkeit.....	38
3.4.3	Mittlere jährliche Bodentemperatur.....	39
3.4.4	Mittlere Intervalltemperaturen des Untergrunds	39
3.4.4.1	Eingangsdaten.....	40
3.4.4.2	Bestimmung der Temperaturzonen, des geothermischen Gradienten, der ungestörten Bodentemperatur und des Wärmeflusses aus Temperaturmessprofilen	40
3.4.4.3	Bestimmung eines bereichsweise linearen Temperaturmodells	41
3.4.4.4	Berechnung der Intervalltemperaturen	43
4	Das Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen	44
4.1	Situation der oberflächennahen Erdwärme im Pilotgebiet	44
4.2	Ziel der Arbeit im Pilotgebiet	44
4.3	Geologie des Pilotgebiets	45
4.4	Hydrogeologie des Pilotgebiets.....	49
4.4.1	Datengrundlage für die durchgeführten Arbeiten.....	49
4.5	Ergebnisse der Arbeit im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen	50

5	Das Web-Portal	64
5.1	Zweck und Aufbau des Web-Portals	64
5.2	Die Startseite	65
5.3	Die Wissensplattform	66
5.4	Das Web-GIS	66
6	Zusammenfassung	69
7	Referenzen	71
Anhang		72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip einer Erdwärmesondenanlage und einer Grundwasserwärmepumpenanlage	7
Abbildung 2:	Übersicht der Partner und Aktivitäten des Projekts GeoPLASMA-CE	9
Abbildung 3:	Lage der Pilotgebiete des Projekts.....	13
Abbildung 4:	Vorgehen bei der Bearbeitung von Modellen und Karten.	18
Abbildung 5:	Überblick über die Arbeitsschritte im 3D-Modellierungsworkflow.	20
Abbildung 6:	Verschiedene Möglichkeiten, die Modelluntergrenze zu definieren.	22
Abbildung 7:	Konzept und Repräsentation der Lagerungs- und Kontaktverhältnisse.	24
Abbildung 8:	Konstruktion lithologischer Einheiten am Beispiel des Pilotgebiets Vogtland / West-Böhmen..	25
Abbildung 9:	Arbeitsschritte zum Erstellen von thematischen Karten zu Landnutzungskonflikten und Risikofaktoren sowie von Standorteignungskarten (Ampelkarten) oberflächennaher Erdwärmeanlagen.	27
Abbildung 10:	Kombination einer thematischen Karte zu einem Landnutzungskonflikt aus Konflikt- Layer und Verbreitungs-Layer.....	29
Abbildung 11:	Arbeitsschritte zur Erstellung einer Standorteignungskarte (Ampelkarte).	31
Abbildung 12:	Arbeitsschritte zur Berechnung des geothermischen Potenzials für Erdwärmesonden. ..	33
Abbildung 13:	Vergleich verschiedener Berechnungsformeln für die spezifische Wärmeentzugs- leistung des Untergrundes.	36
Abbildung 14:	Detaillierte Petrographien in Bohrprofilen innerhalb geologischer Einheiten für die Zuweisung spezifischer Wärmeleitfähigkeiten.....	38
Abbildung 15:	Beispiel eines Temperatur-Tiefen-Profiles.	40
Abbildung 16:	Lineare Modelle der Untergrundtemperatur ohne Berücksichtigung der Grundwassertemperatur und mit Berücksichtigung der Grundwassertemperatur	42
Abbildung 17:	Geologische Karte der modellierten Einheiten im Pilotgebiet.	46
Abbildung 18:	Geologisches 3D-Modell in der virtuellen Umgebung (CAVE) der TU Bergakademie Freiberg. .	52
Abbildung 19:	Wasserschutzgebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.	53
Abbildung 20:	Naturschutzgebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.	54
Abbildung 21:	Bergbaugebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.....	55
Abbildung 22:	Altlasten und Aufschüttungen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.....	56
Abbildung 23:	Tektonik und Störungszonen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.....	57
Abbildung 24:	Eignung für Grundwasserwärmepumpen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.	58
Abbildung 25:	Eignung für Erdwärmesonden im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.	59
Abbildung 26:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 40 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen...	60
Abbildung 27:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 70 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen...	61
Abbildung 28:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 130 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen. .	62
Abbildung 29:	Mittlere jährliche Bodentemperatur im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.....	63
Abbildung 30:	Struktur des Web-Portals.....	64
Abbildung 31:	Screenshot der Startseite des Web-Portals.	65
Abbildung 32:	Thematische Karte im Web-Portal mit Legende.....	67
Abbildung 33:	Bericht zur Standortabfrage.	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die veröffentlichten Ergebnisse des GeoPLASMA-CE-Projekts.	11
Tabelle 2: In Pilotgebieten bestimmte Zielparameter.	14
Tabelle 3: Übersicht über die Modelleinheiten des 3D-Modells.	47
Tabelle 4: Auszug aus dem Normalprofil, zusammengefasste Karteneinheiten zum Modellkörper „Phyllit“. ..	48
Tabelle 5: Annahmen für Berechnung des Grundwasserspiegels im Pilotgebiet.	50
Tabelle 6: Zuordnung einzelner Landnutzungskonflikte und Risiken zu Ampelfarben.	51

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt.	72
--	----

1 Motivation und Ziel des Projekts

Geothermische Energie oder Erdwärme ist in der Erde gespeicherte Wärmeenergie. Sie entsteht sowohl durch Sonneneinstrahlung auf den Boden als auch durch Wärmeübertragung aus dem Erdkern. In Mitteleuropa herrscht in Tiefen von 20 Metern eine Temperatur von ca. 10°C , mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur um ca. 3 Kelvin pro 100 Meter. Das Wärmespeichungsvermögen der Erde kann zum Heizen und Kühlen von Gebäuden verwendet werden, je nachdem, ob man dem Untergrund Wärme entzieht oder zuführt. Auch zur Warmwassergewinnung kann Erdwärme verwendet werden.

Ein technisches System zur Nutzung oberflächennaher Erdwärme besteht aus einer Wärmequellenanlage, mit der die Energie dem Untergrund entzogen wird, sowie einer Wärmepumpe mit einer Wärmenutzungsanlage (z. B. Fußbodenheizung). Als Wärmequellenanlagen stehen unter anderem Erdwärmesonden oder Grundwasserwärmepumpen zur Verfügung (Abbildung 1). Erdwärmesonden nutzen Rohre aus Polyethylen, in welchen eine Wärmeaustauschflüssigkeit zirkuliert. Grundwasserwärmepumpen fördern über einen Entnahmebrunnen Wasser aus dem Grundwasserleiter und entziehen diesem die Wärme. Das abgekühlte Wasser wird wieder in den Grundwasserleiter eingespeist.

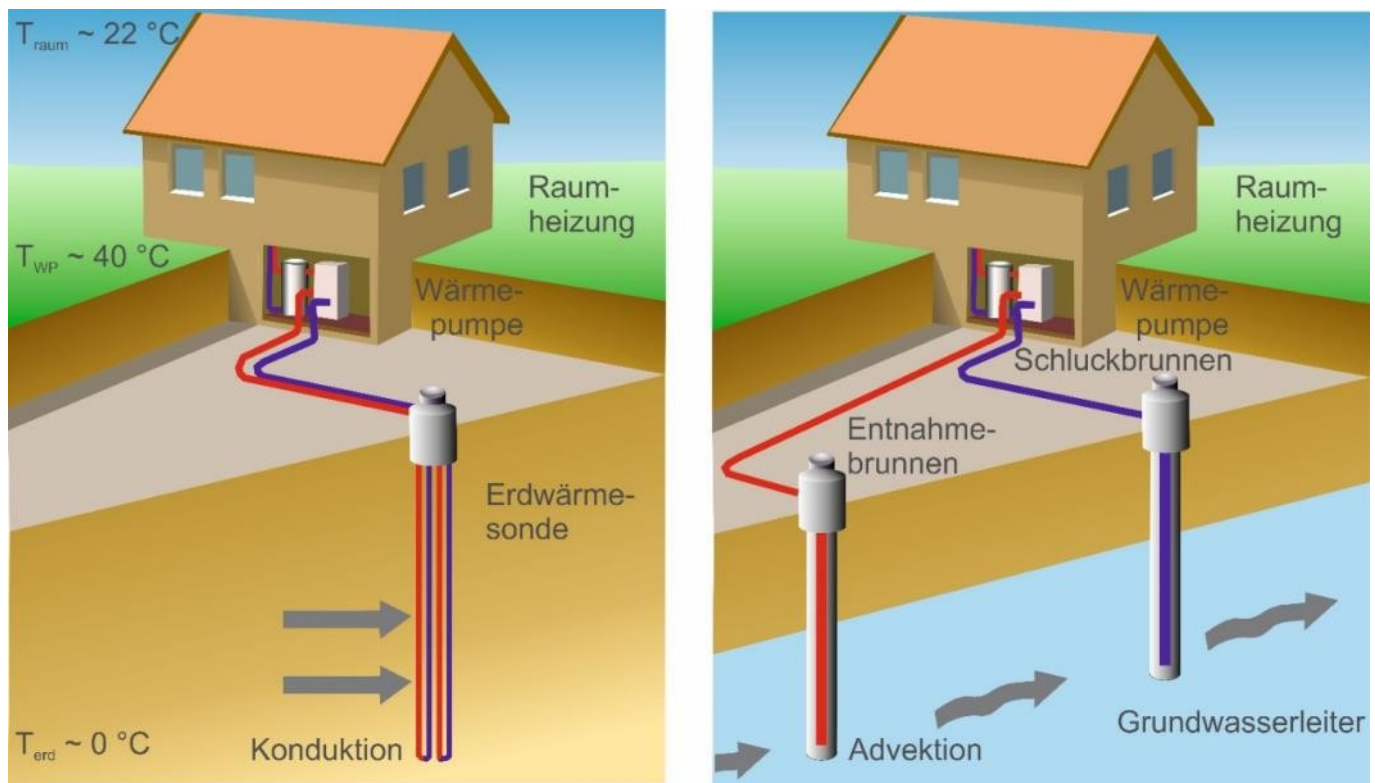


Abbildung 1: Prinzip einer Erdwärmesondenanlage (links) und einer Grundwasserwärmepumpenanlage (rechts).

Eine Erdwärmesonde besteht aus einem oder zwei U-Rohr(en) oder auch einem Koaxial-Rohr, welches in ein vertikales Bohrloch eingebracht wird. Mit einer solchen Sonde kann dem Gestein über eine Wärmeträgerflüssigkeit (Sole) Wärme entzogen werden. Um den Wärmetransport vom Gestein zu den Sonden zu gewährleisten, sollte die Bohrung mit einem gut wärmeleitfähigen, abdichtenden Verfüllmaterial umhüllt werden. Den Energietransport zur Wärmepumpe übernimmt die in den Sonden zirkulierende Sole (üblicherweise ein Frostschutzmittel-Wassergemisch). Die entzogene Wärmeenergie regeneriert sich bei fachge-

rechter Anlagenplanung allmählich durch nachströmende Wärme aus den umgebenden Erdschichten, im kombinierten Heiz-/Kühlbetrieb auch durch übertägig anfallende Abwärme.

Grundwasserwärmepumpenanlagen nutzen dagegen im Grundwasser gespeicherte Wärmeenergie. Für den Betrieb einer Grundwasserwärmepumpenanlage sind im Allgemeinen zwei Brunnenarten notwendig. Die eine dient der Grundwasserentnahme (Entnahme-/ Förderbrunnen), die andere der Grundwasserrückgabe (Rückgabe-/ Schluckbrunnen). Das Grundwasser wird über die Entnahmebrunnen gefördert und im Wärmepumpenkreislauf einem Wärmetauscher zugeführt. Dort erfolgt der Energieentzug zu Heizzwecken oder die Energiezufuhr für Kühlzwecke. Anschließend wird das thermisch veränderte Grundwasser über Schluckbrunnen dem Grundwasserleiter wieder zugeführt. Die Rückleitung des gesamten geförderten Grundwassers erfolgt in der Regel auf demselben Grundstück wie die Entnahme.

Erdwärme ist immer und überall verfügbar und ein Bodenschatz, der in vielen Teilen Europas genutzt werden darf. Sie ist eine regenerative Energieform, die emissionsfrei nutzbar gemacht werden kann. Erdwärmeanlagen funktionieren wetterunabhängig und zeichnen sich durch niedrige Betriebskosten aus. Somit stellt Erdwärme eine Schlüsseltechnologie zur Verringerung von Luftverschmutzung und von CO₂-Ausstoß dar.

Trotz des großen verfügbaren geothermischen Potenzials werden in Deutschland nur ca. 8 % der regenerativ erzeugten Wärme aus geothermischer Energie gewonnen (**STATISTA, 2019**). Eine mögliche Ursache dafür sind hohe Investitionskosten und umfangreiche Genehmigungsverfahren, z.B. im Vergleich zur Installation einer Gasheizung. Die hohen Investitionskosten für die Erdwärmeanlagen werden überwiegend durch die notwendigen Bohrungen verursacht. Sie werden teilweise kompensiert durch staatliche Förderprogramme, niedrige Betriebskosten und eine lange Betriebsdauer der Anlagen. Eine andere mögliche Ursache für die geringe Nutzung von geothermischer Energie als Wärmequelle kann im Mangel an Informationen und Aufklärung über die Methode liegen. Auch uneinheitlich verwendete Fachtermini, die eine für Fachfremde schwer verständliche Vielfalt an Begriffen verursachen, können sich hemmend auf die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Energieform auswirken.

Aus diesen Gründen fanden sich Vertreter mehrerer staatlicher geologischer Dienste, eines Bundesverbandes, einer Universität und privater Unternehmen aus sechs europäischen Ländern im EU-Projekt GeoPLASMA-CE zusammen mit der Vision, den Informationsaustausch zwischen geowissenschaftlichen Experten und der interessierten Öffentlichkeit zu verbessern. Ziel ist es, geeignete und verständliche Informationen zur Beschreibung geothermischer Nutzungsmöglichkeiten des geologischen Untergrundes erarbeiten, Begriffe und Kennzahlen zur Beschreibung des geothermischen Potenzials zu vereinheitlichen und standardisierte Workflows zur Berechnung, Abschätzung und Visualisierung dieser Daten zu entwickeln. Das Hauptziel des Projekts ist die Erhöhung des Marktanteils der oberflächennahen Geothermie für Heiz- und Kühlzwecke in Zentraleuropa.

Die entwickelten Workflows wurden in sechs Pilotgebieten getestet, anschließend überarbeitet und verbessert. Zur Präsentation der Projektergebnisse wurde eine interaktive Web-Plattform entwickelt, welche sowohl Privatpersonen als auch Fachleuten wie z. B. Regionalplanern geowissenschaftliche Informationen zur Verfügung stellt, die sowohl bei der Planung privater Anlagen als auch bei der Entwicklung von Energiemanagementstrategien nützlich und wichtig sind.

2 Das Projekt GeoPLASMA-CE

2.1 Das Förderprogramm und die Partner

Das Projekt GeoPLASMA-CE, „Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe“, wurde von Juli 2016 bis September 2019 durchgeführt. Es wurde vom Interreg CENTRAL EUROPE Programm (Priority: Low carbon cities and regions) gefördert, welches Kooperationen zur Bewältigung gemeinsamer Herausforderungen in Zentraleuropa unterstützt. Das Programm animiert zur grenzübergreifenden Zusammenarbeit von Städten und Regionen in Deutschland, Italien, Kroatien, Slowenien, Österreich, Ungarn, Tschechien, Polen und der Slowakei.

Am Interreg-EU-Projekt GeoPLASMA-CE nahmen elf Partner aus sechs Ländern teil. Sie arbeiteten in sechs Pilotgebieten und erstellten drei Internet-Tools:

- Geologische Bundesanstalt Österreichs (GBA) als Lead Partner,
- Polnisches Geologisches Institut und Nationales Wissenschaftliches Institut Polen (PGI-NRI),
- Technische Universität Berg- und Hüttenakademie Krakow in Polen (AGH-UST),
- Tschechischer Geologischer Dienst der Tschechischen Republik (CGS),
- Staatliches Geologisches Institut Dionyz Stur der Slowakei (SGIDS),
- Staatlicher Geologischer Dienst Sloweniens (GeoZS),
- Stadt Ljubljana in Slowenien,
- Bundesverband Geothermie e.V. Deutschlands (BV GtV),
- geoENERGIE Konzept GmbH aus Deutschland,
- GiGa infosystems GmbH aus Deutschland,
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie aus Deutschland (LfULG).



Abbildung 2: Übersicht der Partner und Aktivitäten des Projekts GeoPLASMA-CE, Grundkarte von ESRI (2018A).

2.2 Arbeitspakete des Projekts GeoPLASMA-CE

Das Projekt gliedert sich in vier thematische Arbeitspakete, deren Ergebnisse in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Arbeitspaket 1 „Web-Portal, Informations- und Planungstools, Expertenplattform“ befasste sich mit der Entwicklung eines Web-basierten geographischen Informationssystems (Web-GIS), auf dem Informationen über den Bau des geologischen Untergrunds, das geothermische Potenzial und Risiken und Landnutzungskonflikte bei der Gewinnung oberflächennaher geothermischer Energie abgefragt werden können („Whitebook of the decision support and info tool“, Tabelle 1). Eine Standortabfrage liefert alle bekannten Informationen zu einer bestimmten Adresse oder einem Punkt in der Karte, auf den der Nutzer klickt. Um auch fachfremden Nutzern die Arbeit mit dem Web-Portal zu ermöglichen, wurde eine umfangreiche Startseite mit allgemeinen Informationen verfasst. Das Web-Portal mit dem fertigen Web-GIS ist über den URL <https://portal.geoplasma-ce.eu/> aufrufbar.

Die Hauptaufgabe des **Arbeitspakets 2 „Ausarbeitung und Evaluation methodischer Workflows“** war es, harmonisierte Arbeitsabläufe für alle Partner des Projekts zu entwickeln. Als erstes wurden dazu bereits vorhandene nationale und internationale Projekte und Methoden recherchiert, verglichen und die verwendeten Workflows in einer Synopsis zusammengestellt. Dann legten die Projektpartner die Zielparameter fest, welche im Rahmen des Projekts bestimmt werden sollten. Grundlage dafür war eine Umfrage, welche bei Interessenvertretern auf dem Gebiet der oberflächennahen Geothermie wie z. B. Genehmigungsbehörden, Ministerien, Anlagenplanern und -bauern, Bohrfirmen und Ausrüstungsproduzenten durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der Umfrage sind im Bericht „Catalogue of requirements“ (Tabelle 1) dargestellt.

Außerdem wurden ein Glossar, welches die Bedeutung der verwendeten Fachbegriffe für alle Partner in deren nationaler Sprache und in englischer Sprache verbindlich festlegte, sowie eine harmonisierte Datenstruktur entworfen.

Das GeoPLASMA-CE Projekt-Team wählte von 65 möglichen Parametern 32 als wichtig bewertete Parameter aus, welche die generelle Eignung eines Standorts für oberflächennahe Erdwärme, das geothermische Potenzial, Risikofaktoren und Landnutzungskonflikte bei der Nutzung oberflächennaher Erdwärme in allen Ländern gut und einheitlich beschreiben (Tabelle 2). Diese Parameter sind u.a. die mittlere Wärmeleitfähigkeit in einem bestimmten Tiefenintervall, die durchschnittliche jährliche Bodentemperatur, das Vorkommen von Störungen oder Wasserschutzgebieten.

Die Kategorien und physikalischen Einheiten sowie Farbkodierungen, in welchen die Zielparameter dargestellt werden sollten, wurden von den Partnern vereinheitlicht und für alle verbindlich festgelegt. Für qualitative Variablen wurde sich generell auf eine Kombination aus binärer und kategorialer Klassifikation geeinigt. Eine Kategorie 0 = „nicht vorhanden“ und 1 = „vorhanden“ wurde durch weitere Kategorien ergänzt. So konnten alle Pilotgebiete trotz unterschiedlicher Datenlage einheitliche Klassifizierungen nutzen. Um die generelle Eignung eines Standorts für die oberflächennahe Erdwärme darzustellen, wurden Ampelkarten verwendet, welche die drei Kategorien „rot“, „gelb“ und „grün“ umfassen. Nach der Anwendung der entwickelten Workflows in den Pilotgebieten wurden die Ergebnisse evaluiert und die erhaltenen Erfahrungen aus den Arbeitsprozessen bewertet. Dies führte teilweise zu Anpassungen der Workflows.

Die wichtigsten Ergebnisse des Arbeitspakets 2 sind im Bericht „Evaluated Guidelines on harmonized workflows and methods for urban and non-urban areas“ (Tabelle 1) zu finden. Eine Übersicht aller Zielparameter ist in Anhang 1 gegeben.

Arbeitspaket 3 „Pilotaktivitäten“ beinhaltet alle Arbeiten in den Pilotgebieten. Es umfasst praktische Tätigkeiten vor Ort wie der Durchführung von Bohrlochtemperaturmessungen, Thermal-Response-Tests und der Kalibrierung von Messgeräten (Bericht „Joint report on chosen approaches and methods for calibration“, Tabelle 1).

Außerdem erfolgten in diesem Arbeitspaket alle Arbeiten, welche nötig waren, um die in Arbeitspaket 2 spezifizierten Zielparameter in den Pilotgebieten zu bestimmen. Dazu wählten die Projektpartner aus den vorgegebenen Parametern jene aus, welche für das jeweilige Pilotgebiet relevant und bestimmbar waren (Tabelle 2). Für jedes Pilotgebiet wurde ein geologisches 3D-Modell angefertigt, die ausgewählten Parameter wurden berechnet und als Karten dargestellt. Die Karten wurden für alle Gebiete in einer festgelegten Auflösung, in einheitlichem Lagebezugssystem, physikalischer Einheit sowie digitalem Datenformat dargestellt und somit für das Web-Portal verfügbar gemacht.

In **Arbeitspaket 4 „Strategien zur Bewertung, Kartierung und Planung oberflächennaher geothermischer Energie“** wurden Strategien zur Energieplanung entworfen (Bericht „Strategy report for future energy planning and management concepts to foster the use of shallow geothermal methods“, Tabelle 1). Diese wurden mit Interessenvertretern aus den Pilotgebieten diskutiert und abgestimmt. Außerdem wurden Schulungen und andere Veranstaltungen, wie Informationsstände, in den Pilotgebieten angeboten, um dem Anspruch des Projekts einen verbesserten Wissenstransfer herzustellen gerecht zu werden und um auf das Web-Portal aufmerksam zu machen.

In einem umfangreichen **Arbeitspaket „Kommunikation“** wurden verschiedene Aspekte der Öffentlichkeitsarbeit bearbeitet. Neben Informationsmaterial wie Broschüren, Videos und Newslettern, wurden auch Konferenzbeiträge und Zeitschriftenartikel verfasst. In allen Pilotgebieten wurden Schulungen für potentielle Nutzer der Web-Plattform angeboten. Desweiteren wurden Handbücher erarbeitet, welche kompakt wesentliche Informationen zur Nutzung oberflächennaher Geothermie zusammenfassen. Auf der Projekt-Web-Seite wurde ein großer Anteil der im Projekt bearbeiteten Deliverables veröffentlicht. Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Dokumente, die im Internet kostenlos zum Download in englischer und teilweise auch in deutscher Sprache zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Übersicht über die veröffentlichten Ergebnisse des GeoPLASMA-CE-Projekts.

Bericht	URL zum Download
Arbeitspaket 1: Web-Portal, Informations- und Planungstools, Expertenplattform	
Catalogue of requirements for the decision support tool	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T1.1.2-Catalogue-of-requirements-decisi.pdf
Catalogue of requirements for the expert platform	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T1.2.2-Catalogue-of-requirements-expert.pdf
Whitebook of the decision support and info tool	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T1.3.1-Whitebook-decision-support-and-i.pdf
Whitebook of the international expert platform	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T1.4.1-Whitebook-international-expert-p.pdf

Fortsetzung Tabelle 1: Übersicht über die veröffentlichten Ergebnisse des GeoPLASMA-CE-Projekts.

Bericht	URL zum Download
Arbeitspaket 2: Ausarbeitung und Evaluation methodischer Workflows	
Catalogue of requirements on outcomes of stakeholder survey	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.1.2-Catalogue-of-requirements-3.pdf
Synopsis of geological 3D modelling methods	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.2.1-Synopsis-3D-modelling-methods-03.pdf
Synopsis of geothermal mapping methods for closed loop systems	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.2.2-Synopsis-closed-loop-V1-09062017.pdf
Synopsis of geothermal mapping methods for open loop systems	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.2.2-Synopsis-open-loop-V1-30062017.pdf
Synopsis of conflict mapping	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.2.3-Synopsis-conflict-mapping-V1-080.pdf
Evaluated Guidelines on harmonized workflows and methods for urban and non-urban areas	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/D.T2.3.4.zip
Summary of national legal requirements, current policies and regulations of shallow geothermal use	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.4.1-Summary-of-national-legal-requr.pdf
Catalogue of reviewed quality standards, current policies and regulations concerning shallow geothermal energy systems	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.4.2-Catalogue-of-reviewed-quality-st.pdf
Catalogue of success criteria for a sustainable management of shallow geothermal use	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.5.1-Catalogue-of-success-criteria-fo.pdf
Erfolgsfaktoren für ein nachhaltiges Management oberflächennaher Erdwärme	https://www.geologie.sachsen.de/download/Erfolgsfaktoren.pdf
Arbeitspaket 3: Pilotaktivitäten	
Activity report on the field measurements	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/D.T3.2.2.zip
Activity report on 3D-modelling	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/D.T3.3.1.zip
Activity report on post processing and evaluation of data models	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/D.T3.4.1.zip
Joint report on chosen approaches and methods for calibration	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-DT3.5.1-Joint-report-on-chosen-approaches.pdf
Calibration report based on the pilot activities for transfer of knowledge	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/D.T3.5.2.zip
Arbeitspaket 4: Strategien zur Bewertung, Kartierung und Planung oberflächennaher geothermischer Energie	
Joint report on user demands and barriers for the implementation of shallow geothermal methods in energy planning strategies	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T4.1.2-Joint-report-demands-barriers-03.pdf
Maßnahmenkatalog zur Förderung oberflächennaher Erdwärme im Vogtland	https://www.geologie.sachsen.de/download/Massnahmenkatalog_Vogtland.pdf
Summary report on existing energy planning strategies in the EU considering the use of shallow geothermal energy	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T4.1.3-Summary-Report-06092018.pdf
Strategy report for future energy planning and management concepts to foster the use of shallow geothermal methods	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T4.4.1-Joint-strategy-report-final-Eng.pdf
Arbeitspaket Kommunikation	
Handbook for a successful implementation of shallow geothermal energy	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/GeoPLASMA-CE-Handbook--1-EN.pdf
Handbuch für eine erfolgreiche Implementierung oberflächennaher Erdwärme	https://www.geologie.sachsen.de/download/Handbuch_Geo_plasma.pdf
The GeoPLASMA-CE position paper to foster the use of shallow geothermal in Central Europe	https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/GeoPLASMA-CE-Handbook-2-ENG.pdf
Glossary	https://portal.geoplasma-ce.eu/glossary

2.3 Die Pilotgebiete

Im Rahmen des Projekts sollten Methoden entwickelt werden, die eine einheitliche Bewertung und Darstellung geothermischer Potenziale und Risiken in verschiedenen Regionen Europas ermöglichen. Dazu wurden zu Projektbeginn Pilotgebiete ausgewählt um die erarbeiteten Methoden zu testen (Abbildung 3).

Wichtig für die Auswahl der Pilotgebiete waren verschiedene geologische Strukturen und hydrogeologische Eigenschaften sowie unterschiedliche Nutzung der Regionen durch den Menschen. So sollten urbane Effekte auf das geothermische Potenzial bzw. die Ausweisung von Konfliktgebieten untersucht werden. Grenzüberschreitende Pilotgebiete wurden festgelegt, um eine ungestörte und einheitliche Darstellung der Parameter über Landesgrenzen hinweg zu ermöglichen.

Deshalb wurden Regionen mit verschiedenen charakteristischen Eigenschaften ausgewählt:

- drei Pilotgebiete sind grenzüberschreitend, drei Pilotgebiete liegen innerhalb eines Landes,
- drei Pilotgebiete umfassen große städtische Ballungszentren (urban regions), drei Pilotgebiete sind im ländlichen Raum gelegen (rural regions),
- vier Pilotgebiete beinhalten große Grundwasserleiter, zwei Pilotgebiete verfügen kaum über Grundwasserkörper,
- zwei Pilotgebiete befinden sich in Regionen, für welche aktuell Energieplanungsstrategien beschlossen wurden, bei deren Umsetzung die Projektergebnisse helfen.

Die grenzüberschreitenden Pilotgebiete wurden geologisch großräumig betrachtet (Maßstab 1:50.000). Die urbanen Pilotgebiete wurden in einem detailreichen Maßstab von 1: 10.000 bearbeitet.

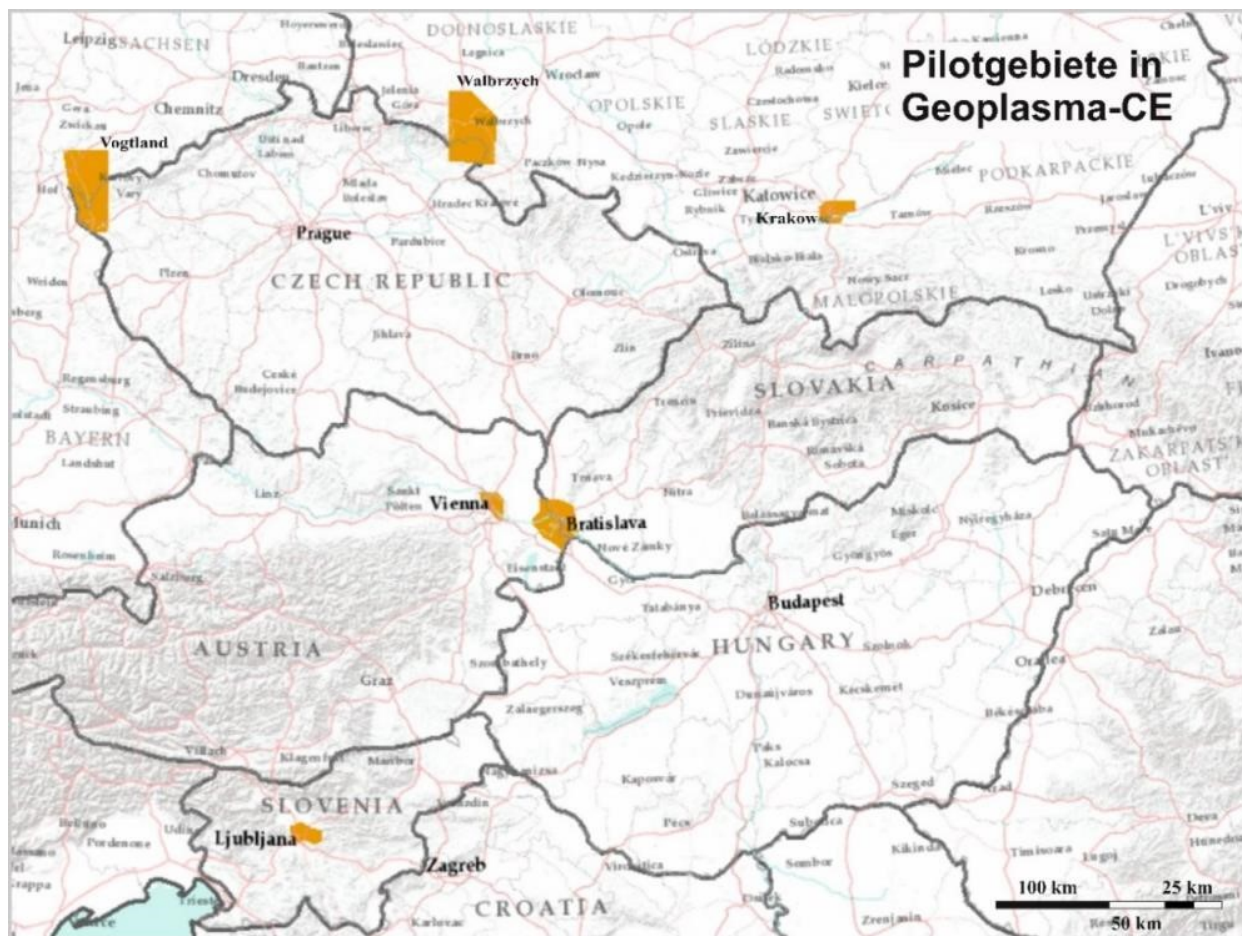


Abbildung 3: Lage der Pilotgebiete des Projekts (orange), Grundkarte von Esri (2018b).

Das **Pilotgebiet Ljubljana** (Slowenien) mit einer Fläche von 275 km² umfasst überwiegend die Stadt Ljubljana und stellt eine der am stärksten urbanisierten Regionen in Slowenien dar. Die Stadt Ljubljana hat in einem Aktionsplan zur Nutzung nachhaltiger Energieressourcen beschlossen, bis zum Jahr 2020 25 % des finalen Energieverbrauches aus erneuerbaren Energiequellen bereitzustellen und den Ausstoß von Treibhausgasen um 35 % zu senken. Die Aktivitäten im Projekt GeoPLASMA-CE sollten die räumliche Verteilung des oberflächennahen geothermischen Potenzials und dessen Eignung für Erdwärmeanlagen quantifizieren und diese Informationen in die Management Strategien der Stadt Ljubljana einbringen, um so einen Beitrag zur Erfüllung des Aktionsplans zur Nutzung nachhaltiger Energieressourcen zu leisten.

Tabelle 2: In Pilotgebieten bestimmte Zielparameter.

Pilotgebiet	Vogtland	Wien	Kraków	Walbrzych	Ljubljana	Bratislava
3D-Modell						
Top einer geologischen Einheit						
Allgemeine Informationen						
Eignung für Erdwärmesonden						
Eignung für Grundwasserwärmepumpen						
Virtuelles Bohrlochprofil						
Geothermisches Potenzial für Erdwärmesonden						
Mittlere Wärmeleitfähigkeit						
Oberflächentemperatur						
Untergrundtemperatur						
Geothermisches Potenzial für Grundwasserwärmepumpen						
Für Grundwasserwärmepumpen geeignete Grundwasserkörper						
Spezifische hydraulische Produktivität bei Spitzenlast						
Spezifische thermische Leistung bei Spitzenlast						
Thermische Produktivität						
Energieinhalt						
Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren						
Hochwasserrisiko						
Karstgebiete und Höhlen						
Bohrungen						
Bergbaugebiete						
Naturschutzgebiete						
Wasserschutzgebiete						
Natürliche Gasaustritte						
Altlasten und Aufschüttungen						
Tektonik/Störungen						
Erdrutsche						
Versorgungsleitungen						
Entwicklungsplan, Regionalplan						
Bestehende oberflächennahe Erdwärmeanlagen						
Gespanntes oder artesisches Grundwasser						
Hydraulisch getrennte Grundwasserstockwerke						
Unterirdische Infrastruktur						
Problematischer Grundwasserchemismus						

Das **Pilotgebiet Wien** (Österreich, 220 km²) umfasst die Stadtbezirke 21 und 22, welche Teile des Grundwasserkörpers des Marchfelds überdecken. Die Donau bildet die südwestliche Grenze des Pilotgebiets. Diese Stadtbezirke beherbergen bereits viele oberflächennahe Erdwärmeanlagen. Mit steigender Anzahl besteht die Gefahr, dass diese Anlagen sich gegenseitig beeinflussen, sodass eine effiziente und nachhaltige Nutzung der geothermischen Energie des Grundwassers nicht mehr möglich ist. Im GeoPLASMA-CE-Projekt sollten Management-Tools entwickelt werden, welche die Nutzungskonflikte in der Region zu beseitigen helfen. Dabei sollte die Betrachtung einzelner Anlagen durch ein integriertes Management aller Erdwärmeanlagen im Grundwasserkörper Marchfeld ersetzt werden.

Das **Pilotgebiet Krakow** (Polen, 327 km²) umfasst das administrative Gebiet der Stadt Krakow. Die Stadt Krakow legt besonderen Wert auf Umweltschutz, und besonders darauf, die Qualität der Luft zu verbessern. Konkrete Schritte sind im Emissions-Reduktions-Programm der Stadt Krakow proklamiert. So sollen Kohle- und Holzheizungen vollständig aus der Stadt entfernt werden. Ziel der Arbeit im Pilotgebiet Krakow ist es, den Behörden Informationen über das geothermische Potenzial des Untergrundes und über Landnutzungskonflikte zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen sollen in die Energiemanagementstrategie der Stadt aufgenommen werden.

Das **Pilotgebiet Bratislava-Hainburg** (Slowakei/ Österreich, 603 km²) umfasst die Stadt Bratislava und ihre benachbarten ländlichen Gebiete in Österreich. Das Pilotgebiet ist vielfältig in seiner Bevölkerungsdichte und Siedlungsstruktur, seinem geologischen Bau (Kristallingesteine neben unkonsolidierten Sedimenten), und in seinem Energiemarkt und dessen gesetzlichen Grundlagen beidseitig der österreichisch-slowakischen Grenze. Die Arbeit im Pilotgebiet sollte das geothermische Potenzial, die Wasserzirkulation im Grundwasserleiter und thermische Barrieren beschreiben. Dabei wurde für die Gebiete zu beiden Seiten der Grenze ein harmonisierter Ansatz verfolgt, sodass Kennwerte vergleichbar sind und ein gemeinsames Ressourcenmanagement ermöglicht wird.

Das **Pilotgebiet Walbrzych/Broumov** (Polen/Tschechien, 1.245 km²) ist eine ländliche Region mit traditionellem Kohlebergbau. In dieser Region sind Kohleheizungen weit verbreitet, was sich in Problemen durch Luftverschmutzung äußert. In Polen gab es bisher noch keine systematische Erfassung von Erdwärmeanlagen, deren Kapazität und Bohrlochtiefe. Um eine Verbesserung der Luftqualität zu erreichen, sollen zunehmend erneuerbare Energien genutzt werden. Im Rahmen des GeoPLASMA-CE Projekts wurden erstmalig geowissenschaftliche Daten gesammelt und berechnet, welche aufzeigen, wo der Untergrund gut geeignet ist um oberflächennahe geothermische Anlagen zu betreiben. Diese Informationen sollen verwendet werden, um Behörden und Energieplaner mit den Vorzügen der geothermischen Energie vertraut zu machen.

Das **Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen** (Tschechien/Deutschland, 1.900 km²) zeichnet sich durch eine Mischung von landwirtschaftlichem und industriellem Charakter aus. Das Pilotgebiet ist besonders gut für Erdwärmeanlagen geeignet, da im Egertal ein hoher geothermischer Gradient herrscht. Zusätzlich entstanden durch zirkulierende Tiefenwässer Thermal- und Mineralquellen in der Region. Der Gebrauch dieser als Heil- und Mineralwasser steht im Konflikt zur Gewinnung oberflächennaher Erdwärme, da sich beide Nutzungsformen gegenseitig beeinflussen. Die Arbeit in diesem Pilotgebiet legte deshalb neben der Bestimmung des geothermischen Potenzials einen Schwerpunkt darauf, Landnutzungskonflikte zu erfassen, zu quantifizieren und darzustellen.

2.4 Ländliche und urbane Gebiete

Die vorgestellten Pilotgebiete umfassen sowohl ländliche Räume als auch urbane Ballungszentren. Die Pilotgebiete Vogtland/W-Böhmen und Walbrzych/Broumov sind ländliche Regionen. Wien, Ljubljana und Krakow bilden große urbane Zentren. Im Pilotgebiet Bratislava-Hainburg gibt es sowohl urbane als auch ländliche Bereiche. Unterschiede zwischen beiden Besiedlungstypen wurden im Projekt GeoPLASMA-CE berücksichtigt.

In ländlichen Regionen ist die Geländeoberfläche aufgrund der dünnen Besiedlung überwiegend unversiegelt. Auch die Wärmeemission von beheizten Gebäuden spielt kaum eine Rolle für die thermische Struktur des geologischen Untergrunds. Stattdessen kontrollieren natürliche Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Hangneigung und Vegetation die Temperaturverteilung in den oberen Bereichen der Erdkruste. Die Gesteinstemperatur und die Grundwassertemperatur in den obersten Metern der Erdkruste folgen einem natürlichen jährlichen Zyklus und erreichen ihr Maximum im Sommer, ihr Minimum im späten Winter. Unterhalb dieser saisonalen Zone wird die Temperaturverteilung von geologischen Faktoren kontrolliert. Deshalb müssen auch überwiegend natürliche Einflussfaktoren wie Wärmeleitfähigkeit, durchschnittliche jährliche Temperatur an der Erdoberfläche und geothermischer Gradient für die Bestimmung des geothermischen Potenzials berücksichtigt werden. Die untersuchten ländlichen Pilotgebiete sind verhältnismäßig groß ($>1.000 \text{ km}^2$). Dadurch werden auch die zu erstellenden geologischen 3D-Modelle sehr umfangreich. Sie umfassen 40-60 geologische Einheiten pro Pilotgebiet. Risikofaktoren, welche zu negativen Auswirkungen für die Umwelt beim Bau und Betrieb einer Erdwärmeanlage führen können, sind ebenfalls hauptsächlich natürlicher Art wie z.B. Störungszonen oder Vorkommen quelfähiger Gesteine. Landnutzungskonflikte bestehen mit Schutzzonen wie Grundwasserschutz- oder Naturschutzgebieten. Eine Übersicht all dieser Parameter ist im Anhang aufgeführt. In diesen Pilotgebieten wurden statische 3D-Modelle erstellt, da hier die hydrogeologischen Verhältnisse nur lokal begrenzt für offene Systeme (Grundwasserwärmepumpen) geeignet sind.

Urbane Ballungsräume sind in Zentraleuropa häufig auf großen Grundwasserkörpern gelegen, da Wasser schon immer ein wichtiger Rohstoff für die industrielle Entwicklung war. Oberflächenversiegelung und thermische Emission von geheizten Gebäuden, Industrieanlagen, Tunnel- und Rohrleitungssysteme beeinflussen die Temperaturverteilung im Untergrund stark. Die Nutzung des Grundwassers und dessen Reinjektion in den Grundwasserleiter stören zusätzlich den natürlichen jährlichen Zyklus der Grundwasser- und Untergrundtemperatur. All diese Einflussfaktoren resultieren in sogenannten „urban heat islands“ mit erhöhten Untergrundtemperaturen und einem unnatürlichen Temperaturprofil mit fehlendem oder negativem geothermischen Gradienten bis in 200 Meter Tiefe. Solche Bedingungen sind positiv für den Heizbetrieb, erweisen sich jedoch negativ für einen potentiellen Kühlbetrieb. Andererseits haben viele Städte Probleme mit starker Luftverschmutzung, besonders während der Heizperiode, sodass emissionsfreie Erdwärmeanlagen eine attraktive Alternative zu konventionellen Heizungen darstellen. Wenn jedoch zu viele Erdwärmeanlagen auf zu engem Raum installiert werden, beeinflussen sich diese gegenseitig, weshalb in urbanen Räumen ein integratives Management von Erdwärmeanlagen nötig ist.

Sowohl für das geothermische Potenzial als auch für die Beschreibung von Landnutzungskonflikten und Risikofaktoren sind anthropogene Einflüsse in urbanen Räumen zu berücksichtigen. So ist die Oberflächentemperatur stark verändert durch Versiegelung und Abwärme. Das Grundwasser kann Wärmeinseln aufweisen, welche großen Einfluss auf das geothermische Potenzial haben. Der natürliche geothermische Gradient ist nicht mehr vorhanden, somit muss der geothermische Gradient zwingend ge-

messen werden. Landnutzungskonflikte bestehen z. B. mit industrieller Wassernutzung und mit Tunnel- und Leitungssystemen. Letztere stellen auch Risikofaktoren beim Bau von Erdwärmeanlagen dar, da sie zerstört werden können, wenn sie angebohrt werden. In den Ballungszentren wie Wien, Krakow und Ljubljana liegen gute bis sehr gute hydrogeologische Verhältnisse vor. Deshalb wurden in diesen Gebieten numerische hydraulische 3D-Modelle erstellt, welche die Grundwasserfließigenschaften für Grundwasserwärmepumpensysteme abbilden.

2.5 Aufgaben des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie übernahm im Projekt GeoPLASMA-CE die Leitung für das Arbeitspaket 2 „Ausarbeitung methodischer Workflows“. Außerdem übernahm es die Verantwortung und Koordination für die Modellierungsarbeiten im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 2 (methodische Workflows) und 3 (Arbeit in den Pilotgebieten) für das grenzüberschreitende regionale Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen erläutert und vorgestellt. Weitere Workflows für die numerische hydrogeologische 3D-Modellierung und die Berechnung geothermischer Themenkarten für sind ausführlich im Deliverable 2.3.4 „Evaluated Guidelines on harmonized workflows and methods for urban and non-urban areas“ (Tabelle 1) zu finden.

3 Harmonisierte Workflows

3.1 Einleitung

Im Rahmen des GeoPLASMA-CE Projekts wurden harmonisierte Workflows entwickelt, um die Eignung eines Standorts für oberflächennahe Erdwärme, das geothermische Potenzial, Risiken bei der Nutzung von Erdwärme und Landnutzungskonflikte zu berechnen und darzustellen. Unter harmonisierten Workflows ist in diesem Projekt eine an die Anforderungen der Partnerländer und an vorhandene, recherchierte und bewertete Methoden standardisierte Herangehensweise für unterschiedliche Themen (z.B. 3D-Modellierung, Konfliktkarten, geothermisches Potenzial) zu verstehen. Diese Workflows wurden in den Pilotgebieten getestet und anschließend, wenn nötig, modifiziert.

Die Workflows spezifizieren das Vorgehen (Abbildung 4)

- bei der geologischen 3D-Modellierung,
- bei der Kartierung von Risiken und Landnutzungskonflikten,
- bei der Bewertung der Eignung eines Standorts für oberflächennahe Erdwärme,
- bei der Berechnung des geothermischen Potenzials des geologischen Untergrunds.

Dafür wurden Eingangsdaten, Klassifikationsschemata, physikalische Einheiten, die Auflösung der Datensätze, Legenden und Farbschemata für die Ergebnisdarstellung abgeglichen und vereinheitlicht. Die Workflows wurden so gestaltet, dass die Projektpartner ihre eigene in den Institutionen vorhandene Software benutzen konnten.

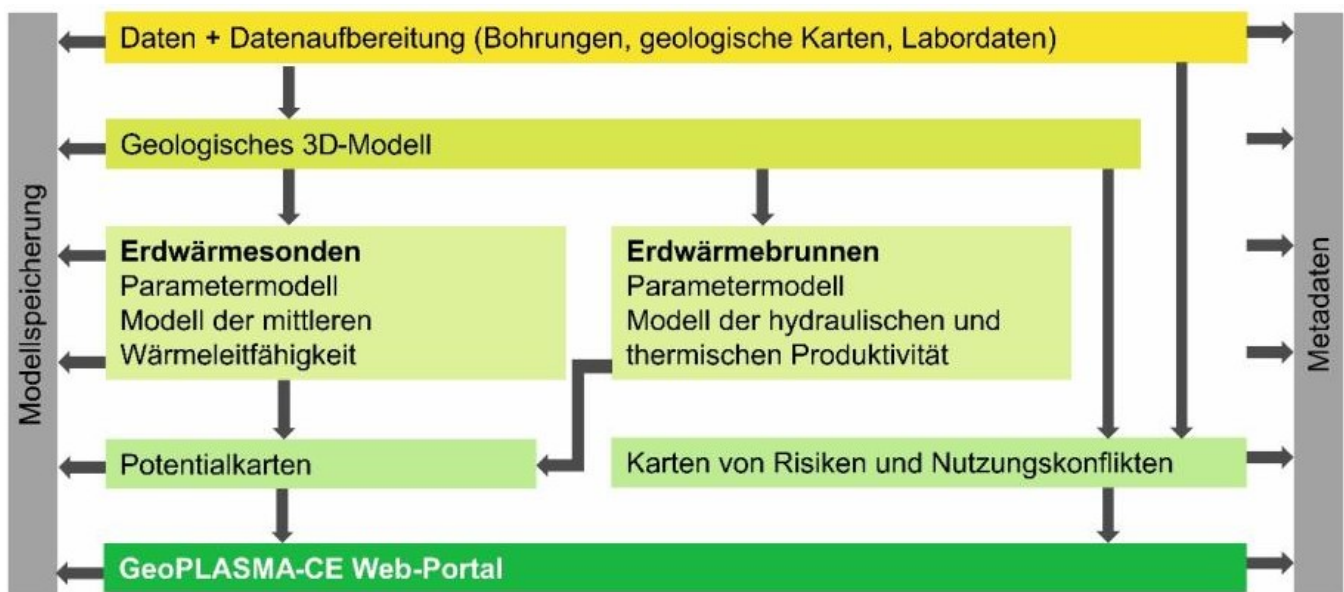


Abbildung 4: Vorgehen bei der Bearbeitung von Modellen und Karten.

Harmonisierte Workflows für alle Projektpartner mussten geschaffen werden, um einheitliche und vergleichbare Ergebnisse im Projekt zu erhalten. Die erarbeiteten Methoden sollen aber auch für künftige Arbeiten nach Projektabschluss zur Verfügung stehen. Die Workflows dienen Geowissenschaftlern, welche das geogene Potenzial für geothermische Anlagen bestimmen möchten. Die Ergebnisse eines Arbeitsschritts bilden häufig die Eingangsdaten für den nächsten Schritt, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

3.2 Workflow für geologische 3D-Modellierung

Der Workflow für die geologische 3D-Modellierung dient dazu, die Strukturen des geologischen Untergrundes zu modellieren (Abbildung 5). Das fertige 3D-Modell liefert eine konsistente, widerspruchsfreie Synthese aller geologischer Daten sowie Informationen über Lokation, Mächtigkeit, Einfallen und Nachbarschaftsbeziehungen der geologischen Einheiten. Das Modell bildet die Datengrundlage für die Berechnung des geothermischen Potenzials und die Darstellung einiger Risikofaktoren wie Störungen, Karst oder quelfähige Gesteine.

Im Rahmen der 3D-Modellierung wurden ein konzeptionelles geologisches Modell erarbeitet, geologische Daten aufbereitet, die Geometrien modelliert und ein Post-Processing zur Darstellung der Modellierungsergebnisse durchgeführt. Der Workflow ist sowohl für Erdwärmesonden als auch Grundwasserwärmepumpen geeignet und kann sowohl in ländlichen als auch in urbanen Regionen angewendet werden. Voraussetzung ist eine geologische 3D-Modellierungssoftware wie Petrel, Skua oder Move.

3.2.1 Konzeptionelles geologisches Modell

Grundlage der geologischen 3D-Modellierung ist ein konzeptionelles Modell über die Entstehung des Arbeitsgebiets, welches dazu verwendet wird, die geologischen Daten zu interpretieren. Das konzeptionelle Modell umfasst ein Normalprofil, das festlegt welche geologischen Einheiten im 3D-Modell dargestellt werden sollen und welche Gesteine diesen zuzuordnen sind sowie das Konzept der Lagerungs- und Kontaktverhältnisse.

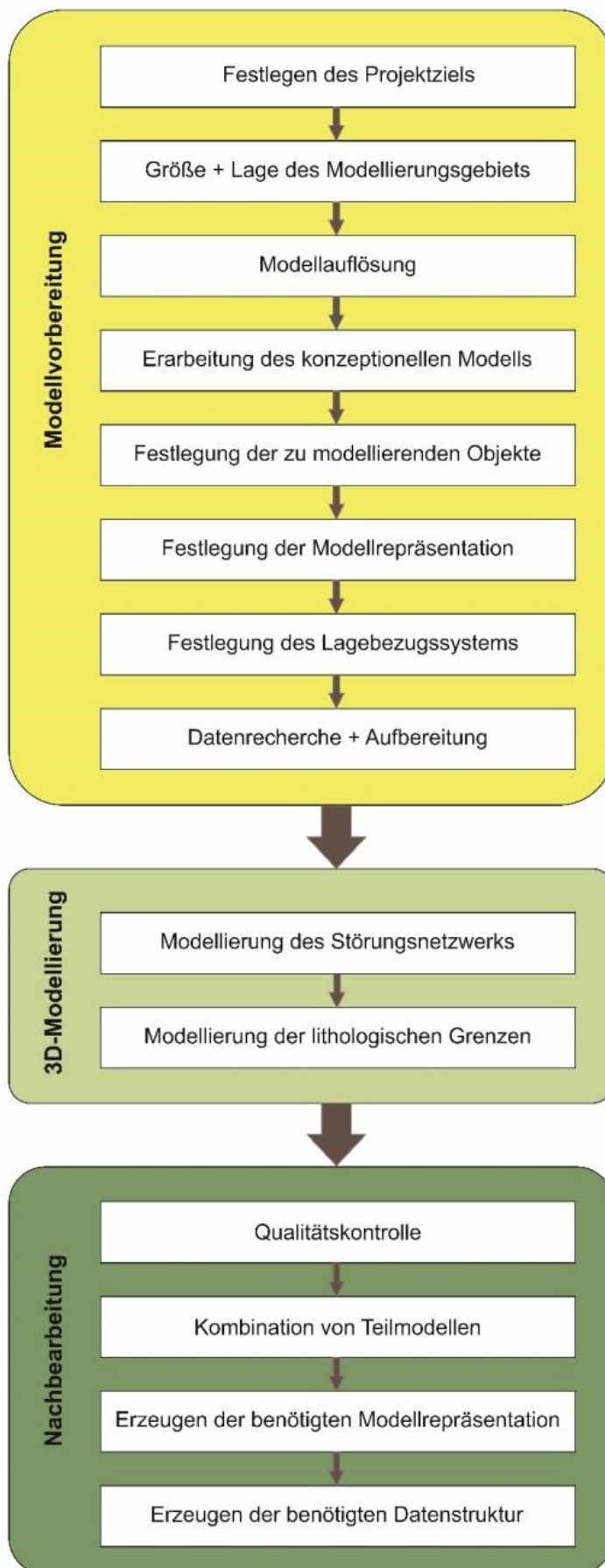


Abbildung 5: Überblick über die Arbeitsschritte im 3D-Modellierungsworkflow.

3.2.2 Datenvorbereitung

Festlegung der räumlichen Auflösung des Modells

Entsprechend des Zwecks der Modellierung und der Größe des Arbeitsgebietes, muss zuerst eine Auflösungsgrenze aller geologischen Körper festgelegt werden, sowie welches die kleinsten noch zu modellierenden geologischen Körper sind. Diese Grenze kann sowohl eine Mindestmächtigkeit als auch ein Mindestvolumen sein. Weiterhin muss festgelegt werden, zu welchen Modelleinheiten Körper unterhalb der Auflösungsgrenze zugeordnet werden.

Festlegung der Modellobergrenze

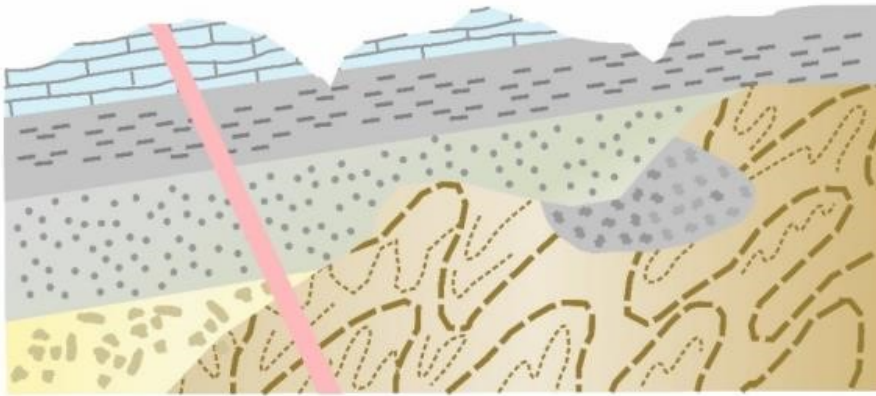
Die Obergrenze des geologischen 3D-Modells ist die Erdoberfläche. Ihre Lage wird in digitalen Geländemodellen (DGM) beschrieben. Nachdem die Auflösung des 3D-Modells festgelegt wurde, kann ein passendes DGM vom Modellierungsgebiet ausgewählt werden. Manche Stellen im DGM können nicht-geologische Objekte repräsentieren wie Wasserspiegel, Eisenbahnbrücken oder Hochspannungsleitungen. Bohrungsdaten, welche im Bereich solcher Objekte ins 3D-Modell eingehängt werden, können an der falschen Stelle liegen, wenn sie z.B. vorm Bau der Brücke erfasst wurden. Deshalb empfiehlt es sich, die künstlichen Objekte aus dem DGM heraus zu korrigieren. So kann im Bereich von Seen und Brücken die Höhe der jeweiligen Objekte vom DGM subtrahiert werden.

Festlegung der Modelluntergrenze

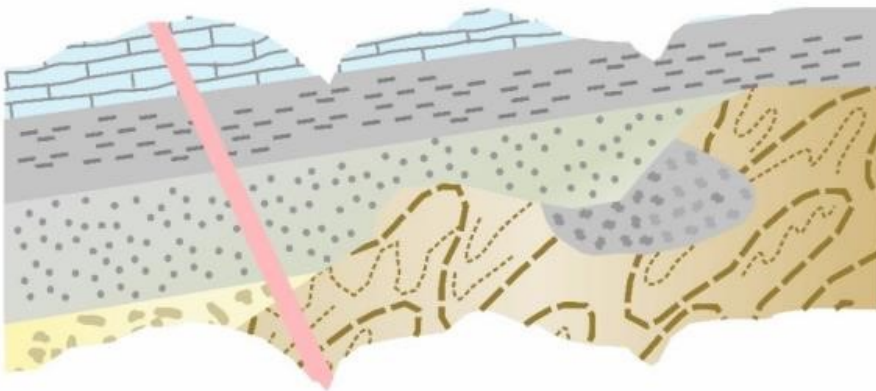
Die Modelluntergrenze wird normalerweise willkürlich und in Abhängigkeit vom Modellierungszweck festgelegt. Da sich das Projekt GeoPLASMA-CE mit oberflächennaher Geothermie befasst, wurde eine Modelltiefe von 200 Metern gewählt. Wenn eine Fläche konstanter absoluter Höhe als Untergrenze festgelegt wird, hat man in Regionen mit starker Topographie das Problem, dass unter den Bergen die Modelltiefe viel höher ist als unter Tälern. Legt man die Modellgrenze auf eine konstante Tiefe unter der Erdoberfläche, folgt die Modellunterkante der Topographie und zerschneidet eventuell geologische Einheiten. Eine glatte Modellunterkante, die dem Trend der Geländeoberfläche folgt aber nicht alle Täler und Berge abbildet, kann man erhalten, wenn man mittels der morphologischen Operation der „Erosion“ die minimale topographische Umhüllende berechnet und diese in die gewünschte Tiefe der Modelluntergrenze verschiebt. Alternativ kann man auch durch die Operation „Resampling“ ein DGM sehr grober Auflösung (z.B. mit 1.000 Meter Schrittweite) erzeugen und dieses in die gewünschte Tiefe verschieben (Abbildung 6).

Aufbereitung von Bohrungs- und Kartendaten

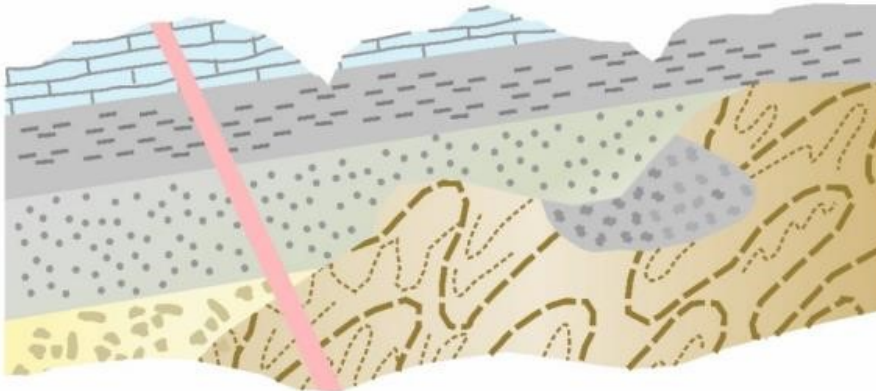
Alle Eingangsdaten müssen in das gleiche Lagebezugssystem transformiert werden. Kartendaten müssen an Blattsnitten angeglichen werden. Kartendaten und Bohrungsdaten müssen aufeinander abgestimmt werden. So muss z.B. eine kartierte Verbreitung einer Gesteinseinheit erweitert werden, wenn es Bohrungsdaten gibt, welche zeigen, dass die Einheit auch außerhalb des kartierten Bereichs noch vorkommt. Bohrungsdaten müssen auf eine korrekte Gesteinsansprache und Stratifizierung hin überprüft und eventuell korrigiert werden. Die abgeglichenen Daten werden den im Normalprofil aufgeführten Modelliereinheiten zugeordnet. Dabei sollte berücksichtigt werden, welchen Einfluss Vereinfachungen des Modells auf die anschließenden Modellierungen des geothermischen Potenzials und der Risikofaktoren haben.



Modellbasis mit konstantem Z-Wert



Modellbasis mit konstantem Abstand zum DGM



geglättete Modellbasis, die dem Trend des DGM folgt

Abbildung 6: Verschiedene Möglichkeiten, die Modelluntergrenze zu definieren.

Harmonisiertes Störungsnetzwerk

Für das 3D-Modell müssen Störungszonen ausgewählt werden, welche Modellkörper versetzen sowie für die nachfolgenden Berechnungen mit dem Modell wichtig sind. Versätze der Störungen an Kartenblattschnitten müssen korrigiert werden. Störungen aus verschiedenen Datenquellen müssen in gleichem Detaillierungsgrad dargestellt werden, welcher der Modellgröße und -auflösung und den physikalischen Eigenschaften der Störungszonen entspricht. Das resultierende Störungsnetzwerk sollte kinematisch plausibel sein.

Einpassen der 1D- und 2D-Daten ins 3D-Modell

Die interpretierten, korrigierten und an die Klassifizierung des Normalprofils angepassten geologischen Karten- und Bohrungsdaten müssen vor Beginn der Modellierung im 3D-Raum richtig positioniert werden. Dazu werden Bohransatzpunkte, Störungsspuren und Kartenobjekte auf die Geländeoberfläche projiziert. Sind alle Daten eingehängt, muss ein Konsistenzcheck des gesamten Datensatzes erfolgen.

3.2.3 Durchführung der Modellierung

Festlegung der Modellrepräsentation

Die modellierten geologischen Einheiten können auf unterschiedliche Art repräsentiert werden, z. B. durch Grenzflächen oder durch Volumenkörper. Volumenkörper können auf verschiedene Art diskretisiert werden, z.B. durch unstrukturierte Tetraedervermaschung oder durch ein reguläres Hexaedergitter. Grenzflächen werden häufig durch unstrukturierte Dreiecksnetze oder durch reguläre 2D-Gitter repräsentiert. Meist wird durch die verwendete Software vorgegeben, ob man Grenzflächen oder Körper modelliert und welche Repräsentation günstig ist. Außerdem wird durch die Simulationssoftware in welcher man das Modell weiterverwenden will, festgelegt, welche Art von Repräsentation man aus der 3D-Modellierungssoftware exportieren muss. Wenn möglich, sollte das 3D-Modell von vornherein in dieser Repräsentation erzeugt werden. Wenn die verwendete 3D-Modellierungssoftware das nicht ermöglicht, sollte eine Repräsentation gewählt werden, die sich möglichst einfach in die von der Simulationssoftware benötigte transformieren lässt.

Für die Berechnung des geothermischen Potenzials von Erdwärmesonden wurde eine ArcGIS-Extension verwendet, welche mit den Tops der Einheiten arbeitet. Deshalb wurden die 3D-Modelle als Repräsentationen der Topgrenzfläche jeder geologischen Einheit modelliert.

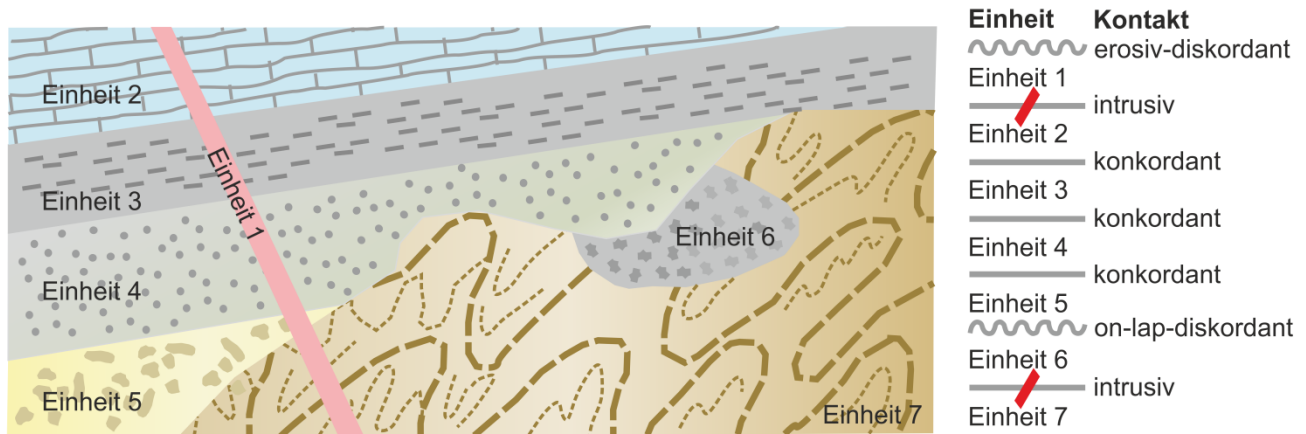
Modellierung der Struktur und der lithologischen Einheiten

Zuerst wird das Störungsnetzwerk modelliert, da an diesem geologische Einheiten versetzt werden. Die Orientierung der Störungsflächen kann geologischen Aufschlussdaten entnommen werden oder aus auf die Geländeoberfläche projizierten Kartendaten berechnet werden. Aus seismischen Hypozentren lässt sich ebenfalls das Einfallen der Störungen konstruieren. Ist das Einfallen der Störungen nicht bekannt, werden diese normalerweise vertikal modelliert.

Die lithologischen Einheiten werden aus den Karten- und Bohrungsdaten gemeinschaftlich modelliert (Abbildung 8).

Dabei sind die Lagerungsverhältnisse, die im Konzept der Lagerungs- und Kontaktverhältnisse vorgegeben sind, zu berücksichtigen (Abbildung 7). Wenn sich z.B. bei der Interpolation aus den Eingangsdaten zwei Grenzflächen schneiden, muss das Modell entsprechend des Konzepts der Lagerungs- und Kontaktverhältnisse plausibel gemacht werden. Gehören die schneidenden Grenzflächen zu konkordanten Einheiten, müssen die Überlappungen entfernt werden, auch wenn dies auf Kosten der Anpassung an die Daten geschieht. Gehören die schneidenden Grenzflächen zu diskordanten Einheiten, wird die erodierte Fläche an der Erosionsdiskordanz abgeschnitten.

Lagerungs- und Kontaktverhältnisse



Repräsentation geologischer Körper durch Grenzflächen



Repräsentation durch Topflächen (Top)



Repräsentation durch Basisflächen (Basis)



Repräsentation durch umhüllende Flächen (Um)

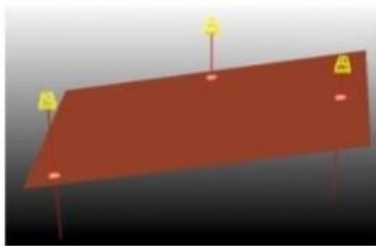
Abbildung 7: Konzept und Repräsentation der Lagerungs- und Kontaktverhältnisse.

Es empfiehlt sich, die Modellierung von der Erdoberfläche nach unten durchzuführen, denn an der Erdoberfläche sind die meisten Daten und Details bekannt. Tiefere Einheiten, für die weniger Details bekannt sind, können so an die bereits modellierten detailreichen flachen Einheiten angepasst werden.

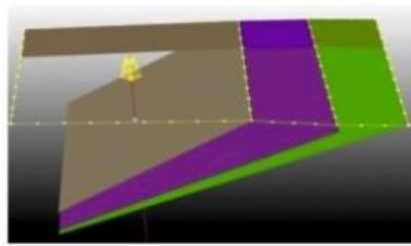
Ausgangsdaten in 1D und 2D



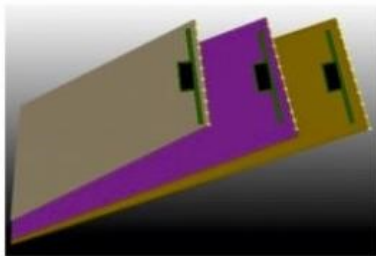
Konstruktion der Grenzflächen



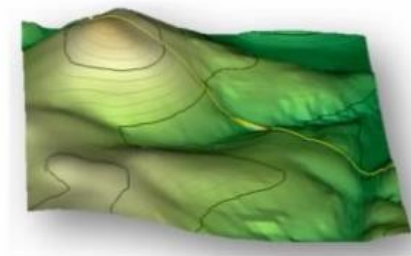
mindestens 3 Bohrungen



Bohrung und Karte



Fallrichtungsmessungen



Karte mit Dreipunktmethode

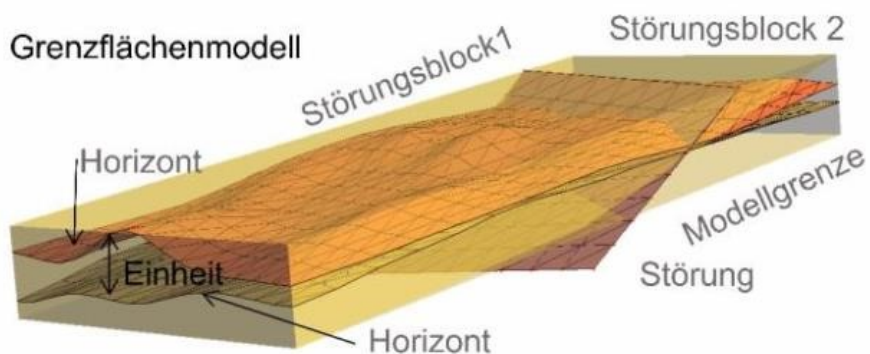


Abbildung 8: Konstruktion lithologischer Einheiten am Beispiel des Pilotgebiets Vogtland / West-Böhmen.

Erläuterung: Als Eingangsdaten konnten Bohrungen, Kartendaten und Messwerte aus dem Gelände verwendet werden (oben). Da das Arbeitsgebiet sehr stark gestört ist, liegen in jedem Störungsblock nur wenige Daten. Je nach vorhandenen Ausgangsdaten, müssen Grenzflächen deshalb auf verschiedene Arten konstruiert werden (Mitte). Ergebnis der Modellierung ist ein Grenzflächenmodell, welches die Grenzen von geologischen Einheiten und Störungsblöcken zeigt (unten).

3.2.4 Post-Processing

Das Post-Processing umfasst die Qualitätskontrolle, das Herstellen der für die anschließenden Berechnungen benötigten Körperrepräsentationen und Datenstrukturen sowie die Kombination von Modellteilen. Die Qualitätskontrolle der Modellierungsergebnisse beinhaltet Tests, ob sich Horizonte kreuzen, Mächtigkeiten von modellierten Einheiten plötzlich ändern und ob Löcher im Modell auftreten. Überkippte Grenzen mussten so getrennt werden, dass die Grenzflächenteile jeweils den Tops der darunterliegenden Einheit zugewiesen werden können. Bei internationalen Modellen, welche von mehreren Teams mit unterschiedlicher Software modelliert wurden, musste die Datenstruktur vereinheitlicht werden. Die Modellteile wurden ohne Lücken und Überschneidungen zusammengefügt und gemeinsame Ausgabefiles erzeugt werden.

3.3 Workflow für Standorteignungskarten Risiken und Konflikte geothermischer Nutzungen

Dieser Workflow beschreibt, wie die Projektpartner Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren bestimmen und klassifizierten, die bei einer Errichtung und während der Nutzung oberflächennaher Erdwärmeanlagen auftreten können (Abbildung 9). Die resultierenden thematischen Karten zeigen jeweils einen Risiko- oder Konfliktfaktor gegliedert in unterschiedliche Kategorien, z.B. Bergbaugebiete gegliedert in Tagebaue, Tiefbaue, Bergbauhalden und gesicherte Rohstoffvorkommen. In diesen Gebieten kann es sowohl Regelungen geben, dass die Nutzung von Erdwärmeanlagen eingeschränkt oder verboten ist, es können aber auch Risiken beim Bau der Erdwärmeanlage entstehen, z.B. wenn ein Hohlraum angebohrt wird und das Verfüllmaterial einer Erdwärmesonde durch diesen entweicht. Die Art der Einschränkungen und Risiken die entstehen, sind in den thematischen Karten nicht dargestellt. Das heißt diese Karten sind für Fachleute gedacht, welche in der Lage sind, die dargestellten Informationen selbst zu interpretieren.

Die Konflikte und Risiken wurden bewertet und in drei Kategorien (Ampelfarben) für Standorteignungskarten unterteilt:

- 1 = grün = kein Konflikt oder Risiko ist vorhanden, das Errichten von Erdwärmeanlagen ist generell möglich,
- 2 = gelb = Einzelfallentscheidung: ein Risiko oder Konflikt ist vorhanden, weitere Informationen sind nötig um zu klären, ob und unter welchen Bedingungen Erdwärmeanlagen errichtet werden dürfen,
- 3 = rot = Das Errichten von Erdwärmeanlagen ist nicht möglich bzw. verboten.

Weiterhin sind alle Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren in sogenannte Standorteignungskarten für oberflächennahe Erdwärme (Ampelkarten) kompiliert, welche einen leicht zu erfassenden Überblick über die generelle Eignung eines Standorts geben. Die Ampelkarte ist für fachfremde Nutzer gedacht, um diesen einen schnellen Eindruck zu vermitteln, ob an einem Standort überhaupt Erdwärmeanlagen errichtet werden können.

Die Ergebnisse des Workflows werden als Fachinformationen im WEB-Portal präsentiert und sollen dazu dienen, gebündelt Informationen über eventuelle Auflagen und Nebenbestimmungen zu geben.

Der Workflow umfasst Arbeitsschritte um Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren zu identifizieren, Daten dazu zu sammeln, aufzubereiten und zu klassifizieren und Schritte um übersichtliche und schnell erfassbare thematische Karten zu erstellen. Er ist sowohl für Erdwärmesonden als auch Grundwasserwärmepumpen geeignet und kann sowohl in ländlichen als auch in urbanen Regionen angewendet werden. Voraussetzung ist ein geographisches Informationssystem wie ArcGIS oder QGIS.

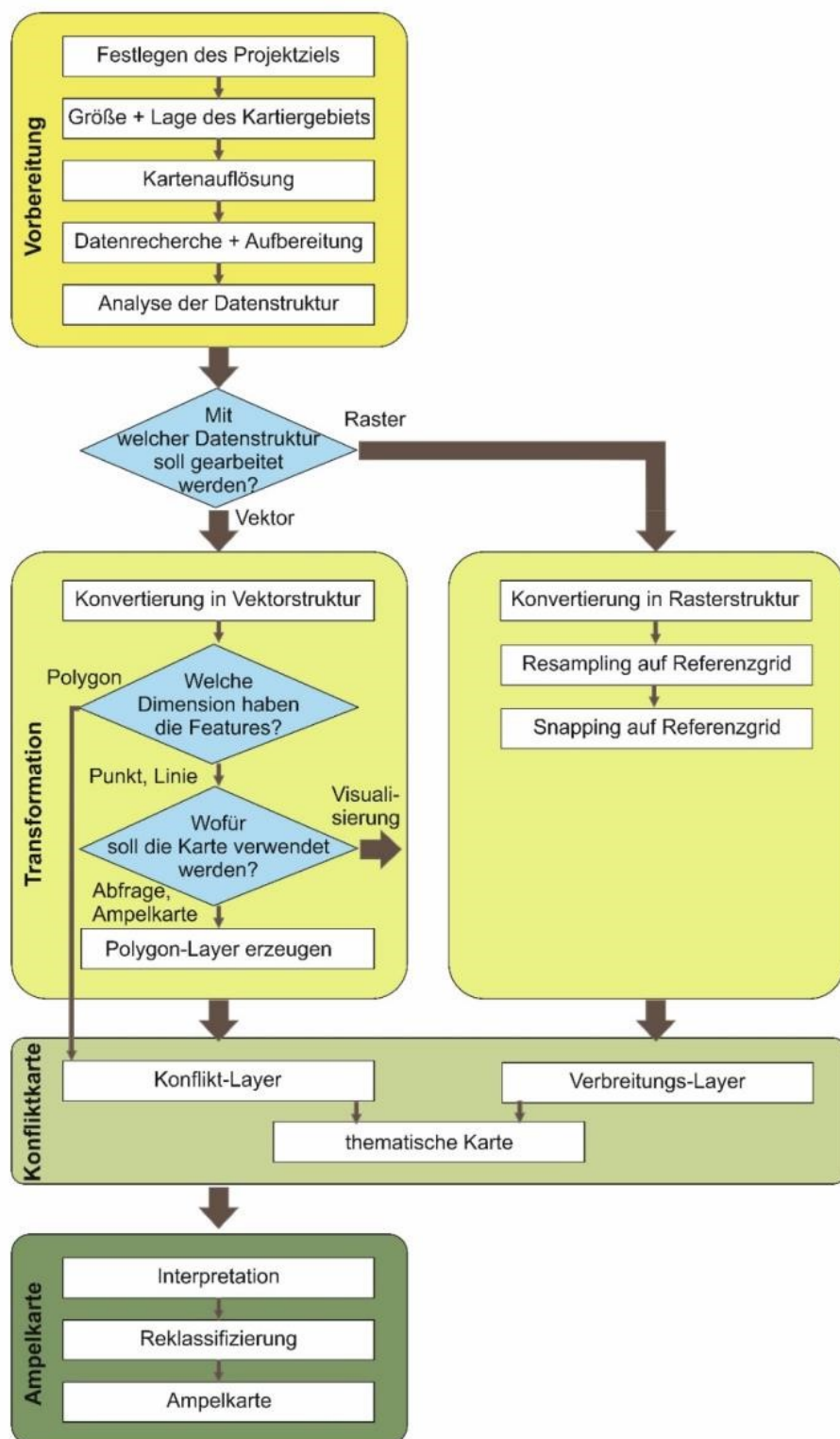


Abbildung 9: Arbeitsschritte zum Erstellen von thematischen Karten zu Landnutzungskonflikten und Risikofaktoren sowie von Standorteignungskarten (Ampelkarten) oberflächennaher Erdwärmeanlagen.

3.3.1 Datenvorbereitung

Datenrecherche

Zuerst muss der Bearbeiter recherchieren, welche Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren für oberflächennahe Erdwärmeanlagen im Untersuchungsgebiet auftreten. Im Anhang sind mögliche Konflikte aufgelistet, die als Startpunkt für diese Arbeit dienen kann.

Als nächstes müssen Datensätze gesammelt werden, welche Informationen über die Konflikte bieten, z.B. Informationen über die Lage von Bergbau und Hohlräumen oder über die Verbreitung von Wasserschutzgebieten. Die Daten müssen bewertet werden hinsichtlich ihrer Qualität, ihrer Dichte und Verbreitung. Die gewünschte Auflösung der Karte muss je nach verfügbaren Daten und nach Zweck des Projekts festgelegt werden, z.B. so dass keine Flurstücke eindeutig zuordenbar sind.

Die Kategorien, die in der Karte dargestellt werden sollen, müssen für jeden Landnutzungskonflikt und Risikofaktor festgelegt werden, z.B. kann für Wasserschutzgebiete eine Klassifizierung in Trinkwasser- und Heilwasserschutzgebiete erfolgen.

Analyse der Datenstruktur

Wenn die Daten fertig recherchiert wurden, muss ihre Datenstruktur analysiert werden:

- Handelt es sich um Vektor- oder Rasterdaten?
- Sind die relevanten Attribute binäre, kategoriale, sequenzielle oder kontinuierliche Variablen?
- Welche Dimension haben die Daten (Punkt, Linie, Polygon)?

Eine Tabelle hilft dabei, die Daten zu sortieren. Die nötigen Bearbeitungsschritte für die Konfliktkarte hängen von der Datenstruktur ab und nicht von den Inhalten, die von den Daten beschrieben werden. Ist die Datenanalyse abgeschlossen, muss eine grundsätzliche Entscheidung getroffen werden: Sollen die thematischen Karten im Vektor- oder Rasterformat hergestellt werden? Vorteile von Rasterrepräsentationen liegen in einer schnellen Prozessionszeit des Web-GIS, darin, dass Abfragen einfacher ausgeführt werden können und dass die Auflösung der Karte durch die vorgegebene Pixelgröße beschränkt ist. Nachteile der Rasterrepräsentation sind, dass Linien- und Punktobjekte mindestens in der Größe eines Pixels dargestellt werden müssen, dass sich pro Karte nur ein Attribut speichern lässt und dass Objekte nicht durch Grenzen beschränkt sind, sondern nur durch den Wechsel des Attributwertes in benachbarten Zellen. Vorteile der Vektordarstellung sind, dass alle Objekte begrenzt sind und dass beliebig viele Attribute und Informationen bereitgestellt werden können. Die Performance des Web-GIS verlangsamt sich gegenüber einer Rasterdarstellung, da sehr viele Einzelobjekte prozessiert werden müssen und eine Beschränkung der Auflösung im Web-Portal ist nicht möglich.

Um Karten für beide Datentypen herzustellen, sind zwei Workflows entwickelt worden. Der Workflow für Rasterdaten ist weniger aufwendig und schneller abgearbeitet als der Workflow für Vektordaten. Allerdings weisen die resultierenden Karten dann Ungenauigkeiten auf, welche der Auflösung des Rasters entsprechen. Um diese zu vermeiden, empfiehlt es sich, mit dem Workflow für Vektordaten zu arbeiten, falls die Ausgangsdaten überwiegend in dieser Datenstruktur vorliegen. Liegen die Ausgangsdaten überwiegend als Rasterdaten vor, sind die Ungenauigkeiten von vornherein vorhanden, sodass der effizientere Workflow für Rasterdaten verwendet werden kann.

Vor Beginn der Datenbearbeitung müssen alle Datensätze in die gleiche Datenstruktur gebracht werden.

3.3.2 Arbeit mit Vektordaten

3.3.2.1 Aufbau einer thematischen Karte im Vektorformat

Dieser Workflow ist gedacht für Punkte, Linien oder Polygone mit Attributen, welche die Eigenschaften der Objekte beschreiben. Um eine thematische Karte zu einem Landnutzungskonflikt oder Risikofaktor zu erstellen, müssen die Daten kombiniert, einheitlich attribuiert und eventuell verschnitten werden. Es wird ein Attributfeld des Feldtyps „Integer“ mit dem Namen „Konflikt“ benötigt, welches die Kategorisierung eines konfliktanzeigenden Objekts enthält. Dieses Feld beschreibt den Konflikt und wird vom Web-GIS abgefragt.

Die thematische Karte enthält Geometrie- und Attributdaten zu jeweils einem Landnutzungskonflikt oder Risikofaktor. Sie wird aus zwei GIS-Layern kombiniert, dem Konflikt-Layer, in welchem alle Objekte, die einen Konflikt beschreiben, enthalten sind und dem Verbreitungs-Layer, welches beschreibt, an welcher Stelle Daten vorhanden sind und wo nicht (Abbildung 10). Das Verbreitungs-Layer ist wichtig, weil es ein großer Unterschied ist, ob man weiß, dass kein Konflikt vorhanden ist, oder ob man sich dessen nicht sicher sein kann, weil keine Datensätze verfügbar waren.

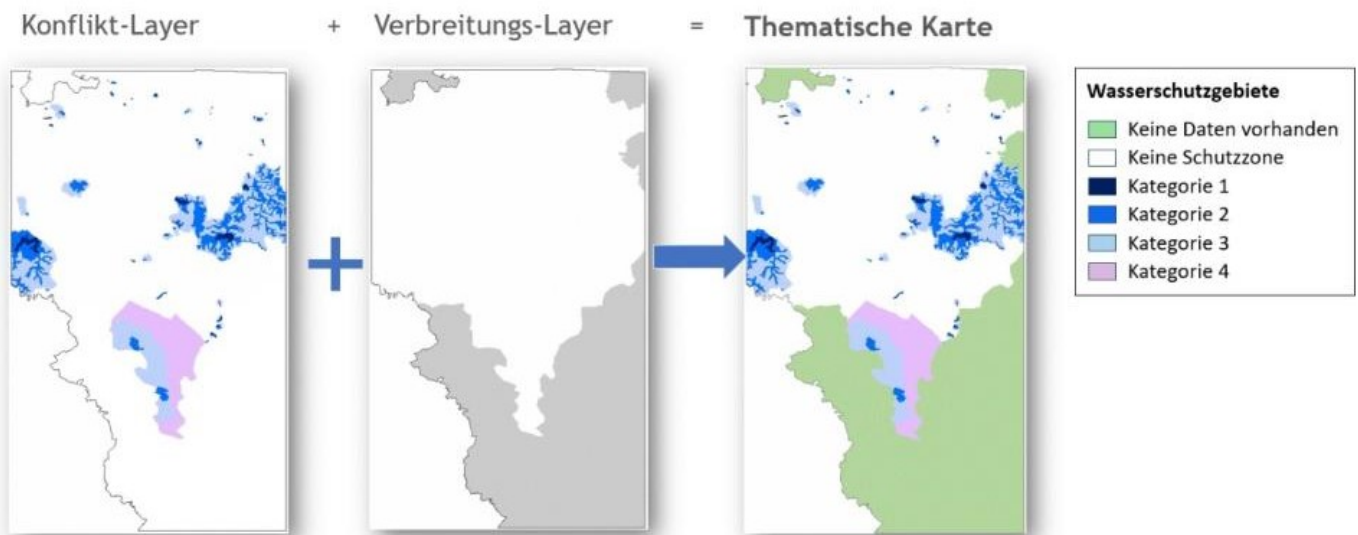


Abbildung 10: Kombination einer thematischen Karte zu einem Landnutzungskonflikt aus Konflikt-Layer und Verbreitungs-Layer.

3.3.2.2 Konflikt-Layer

Im Konflikt-Layer werden alle Informationen zu einem bestimmten Thema kompiliert, z.B. alle Informationen über Bergbau und Hohlräume. Das umfasst sowohl das Wissen, dass ein Konflikt vorhanden ist als auch das Wissen, dass kein Konflikt vorhanden ist. Liegen die Ausgangsdaten als Polygone vor, wird je nach der festgelegten Kategorisierung für jedes Polygon eine Kategorie zugewiesen:

- 0 = kein Konflikt,
- 1 = Konflikt vorhanden,
- 2 - n = spezifische Kategorien, z.B.:
 - 2-2 = Naturschutzgebiet,
 - 2-3 = Landschaftsschutzgebiet,
 - 2-4 = Biosphärenreservat.

Ein Konflikt-Layer kann sich überlappende Polygone enthalten (z.B. einen Bergbaustollen unter einer Halde). Um bei der Standortabfrage sicher zu stellen, dass der Konflikt mit dem höchsten Risiko oder der höchsten Wichtigkeit angezeigt wird, muss ein Ranking der verwendeten Kategorien erfolgen. Im Geo-PLASMA-CE Projekt wurde dafür eine separate Link-Tabelle erstellt, die vom Web-Provider benutzt wird. Diese enthält eine Integer-Variable „Rang“ und eine Integer-Variable „Konflikt“, die mit dem Konflikt-Feld des Layers übereinstimmt. Jedem Konflikt wird mit aufsteigender Wichtigkeit ein steigender Rang zugewiesen:

- Rang 1 = der am wenigsten wichtige Konflikt,
- Rang 2 = der am zweit wenigsten wichtigste Konflikt,
- ...
- Rang n = der wichtigste Konflikt.

Punkt- und Liniendaten müssen zweifach bearbeitet werden. Zuerst werden sie zur Visualisierung der konfliktverursachenden Objekte direkt dargestellt. Die Attribute werden so zugewiesen wie für Polygone beschrieben. Sodann müssen sie in Polygone umgewandelt werden, um eine Abfrage im Web-GIS zu ermöglichen und sie in die Ampelkarten einzubeziehen. Dazu kann entweder die konvexe Hülle, z.B. um Bergbaustollen, konstruiert werden, oder es kann ein Puffer um das Objekt berechnet werden, welcher einen Bereich bestimmt, in dem der Konflikt bei der Standortabfrage als vorhanden erkannt wird. Dieses Vorgehen ist z.B. bei Bohrungen sinnvoll, indem jeder Bohrung ein Sicherheitsradius zugewiesen wird. Den erzeugten Polygon-Objekten muss wieder die Kategorie des jeweiligen Konflikts zugewiesen werden.

3.3.2.3 Verbreitungs-Layer

Zu jedem Konflikt-Layer muss ein Verbreitungs-Layer erstellt werden. Dieser Layer stellt Bereiche dar, in denen keine Daten vorhanden sind. Diesen Bereichen wird der No-Data-Value -9999 zugewiesen. Sie sind komplementär zu den im Konflikt-Layer dargestellten Objekten, sodass Konflikt-Layer und Verbreitungs-Layer das gesamte Untersuchungsgebiet lückenlos beschreiben.

3.3.2.4 Kombination von Konflikt-Layer und Verbreitungs-Layer zu einer thematischen Karte

Wenn der Datensatz des Konflikt-Layers das gesamte Untersuchungsgebiet ausfüllt, entfällt der Verbreitungs-Layer. Wenn der Datensatz des Konflikt-Layers nur Teile des Pilotgebiets abdeckt, müssen Verbreitungs- und Konflikt-Layer wie folgt kombiniert werden:

- ein neuer Daten-Layer wird angelegt,
- die Außengrenze des Untersuchungsgebiets wird in den neuen Layer kopiert,
- das Attributfeld „Konflikt“ mit dem Variablentyp „Integer“ wird angelegt,
- der No-Data-Value -9999 wird dem gesamten Pilotgebiet zugewiesen,
- die „Radieren“ oder „Erase“-Funktion wird mit den Polygonen des Konflikt-Layers ausgeführt.

Als Ergebnis entstehen thematische Karten, die anzeigen wo keine Daten vorhanden sind (Konflikt = -9999), wo Daten vorhanden sind, aber keine Konflikte (Konflikt = 0) und wo Konflikte auftreten (Konflikt > 0).

3.3.2.5 Ampelkarte für die generelle Eignung eines Standorts für Erdwärmennutzungen

Die generelle Eignung eines Standorts für eine Erdwärmesonde oder Grundwasserwärmepumpe wird in einer Ampelkarte dargestellt, für die alle Konflikte und Risikofaktoren reklassifiziert und miteinander ver-

rechnet werden (Abbildung 11). In die Eignungskarte für Grundwasserwärmepumpen muss zusätzlich die Verbreitung eines geeigneten Grundwasserkörpers einfließen.

Jeder Konflikt und Risikofaktor muss dafür so interpretiert werden, dass seine Bedeutung für eine Geothermieranlage beschrieben wird. Alle Konfliktkategorien eines Konflikts wurden nach drei Kriterien bewertet und in einem Feld „traffic_value“ klassifiziert:

- 1 = grün = kein Konflikt oder Risiko ist vorhanden, das Errichten von Erdwärmeanlagen ist generell möglich,
- 2 = gelb = ein Risiko oder Konflikt ist vorhanden, weitere Informationen sind nötig um zu klären, ob und unter welchen Bedingungen Erdwärmeanlagen errichtet werden dürfen,
- 3 = rot = Das Errichten von Erdwärmeanlagen ist nicht möglich bzw. verboten.

Diese Interpretation konnte zwischen den Projektpartnern von GeoPLASMA-CE nicht harmonisiert werden, da es in jedem Land andere Regelungen gibt, ob z.B. Erdwärmeanlagen in einem Naturschutzgebiet erlaubt sind oder nicht. Gebiete ohne Daten (mit der Konflikt-Kategorie -9999) wurden generell der Kategorie „gelb“ zugeordnet.

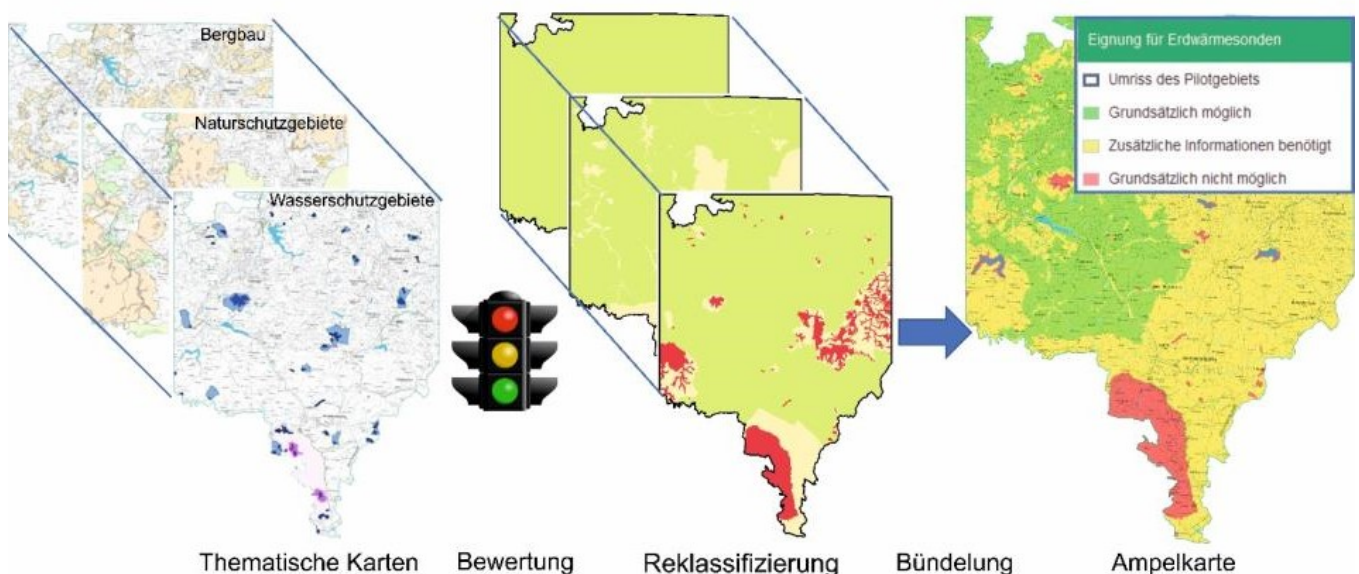


Abbildung 11: Arbeitsschritte zur Erstellung einer Standorteignungskarte (Ampelkarte).

Danach wurde für jede Lokation der maximale „traffic_value“ aus allen Konflikten ermittelt und in die Ampelkarte übernommen. Die folgenden Arbeitsschritte müssen durchgeführt werden, um die Ampelkarte aus den Polygonen der thematischen Karten zu erzeugen:

- Anfertigen einer Tabelle mit allen Kategorien aller Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren,
- Festlegen des Wertes für „traffic_value“ für alle Kategorien in dieser Tabelle,
- Hinzufügen des Attributfelds „traffic_value“ vom Variablentyp Integer in allen thematischen Karten im GIS,
- Selektieren aller Polygone mit dem gleichen „traffic_value“,
- Zuweisen des Wertes in der Attributtabelle,

- Kombinieren, „zusammenführen“ (merge) und „verschmelzen“ (dissolve) aller Polygone mit dem gleichen „traffic_value“ aus allen thematischen Karten,
- Kombinieren der resultierenden Polygone der drei „traffic_value“-Kategorien in einem GIS-Layer,
- „Radieren“ (erase) so ausführen, dass aus Polygonen der Kategorien 1 und 2 alle Bereiche ausgeschnitten werden, in denen Kategorie 3 vorkommt.
- „Radieren“ (erase) so ausführen, dass aus Kategorie 1 alle Bereiche ausgeschnitten werden, in denen Kategorie 2 vorkommt.

Durch die letzten beiden Operationen, wird die Ampelkarte so kategorisiert, dass jede Lokation, an welcher irgendein Konflikt den Wert „rot“ zugewiesen bekam, die Karte „rot“ erscheint. Alle anderen niedriger kategorisierten Konflikte an der gleichen Stelle werden nicht mehr dargestellt. Das gleiche gilt für die Kategorie „gelb“, die überall dort dargestellt wird, wo irgendein Konflikt zur Kategorie „gelb“ zugewiesen wurde. Die Kategorie „grün“ erscheint nur, wenn an einer Lokation in allen thematischen Karten kein Konflikt vorhanden ist.

3.3.3 Arbeit mit Rasterdaten

Wenn die Eingangsdaten bereits überwiegend als Rasterdaten vorliegen und thematische Karten mit einer Rasterdatenstruktur erzeugt werden sollen, kann der Workflow für Rasterdaten verwendet werden. Die logische Vorgehensweise ist die gleiche wie beim Vektordaten-Workflow.

Für jedes Raster kann nur ein Attributfeld angelegt werden. Für jeden Konflikt müssen wieder ein Konflikt-Layer und ein Verbreitungs-Layer erzeugt werden. Beide Layer können mittels Rasterkalkulation durch Anwenden eines if-then-Kommandos kombiniert werden, sodass die Attributwerte des Konflikt-Layers übernommen werden, wenn im Extent-Layer angezeigt wird, dass Daten vorhanden sind.

Die Ampelkarte wird erstellt, indem man das Raster reklassifiziert und so, je nach Interpretation der Bedeutung eines Konflikts, die Werte „grün“ = 1, „gelb“ = 2, „rot“ = 3 zuweist. Anschließend wird durch eine Operation der lokalen Zellstatistik der maximale Wert für jede Zelle ermittelt und der Ampelkarte zugewiesen.

3.4 Geothermisches Potenzial für Erdwärmesonden

Mit diesem Workflow werden thematische Karten erarbeitet, die zeigen wie gut das geothermische Potenzial eines Standortes für Erdwärmesonden ist. Alle Berechnungen vernachlässigen den Fluss von Grundwasser im Untergrund. Damit wird davon ausgegangen, dass der Wärmeaustausch zwischen der Erdwärmesonde und dem umgebenden Gestein über Wärmeleitung erfolgt und durch das Fourier'sche Gesetz physikalisch beschrieben werden kann. Die wichtigsten Parameter und Randbedingungen, welche den konduktiven Wärmetransport kontrollieren sind die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, die Temperatur an der Erdoberfläche und der geothermische Gradient (Abbildung 12).

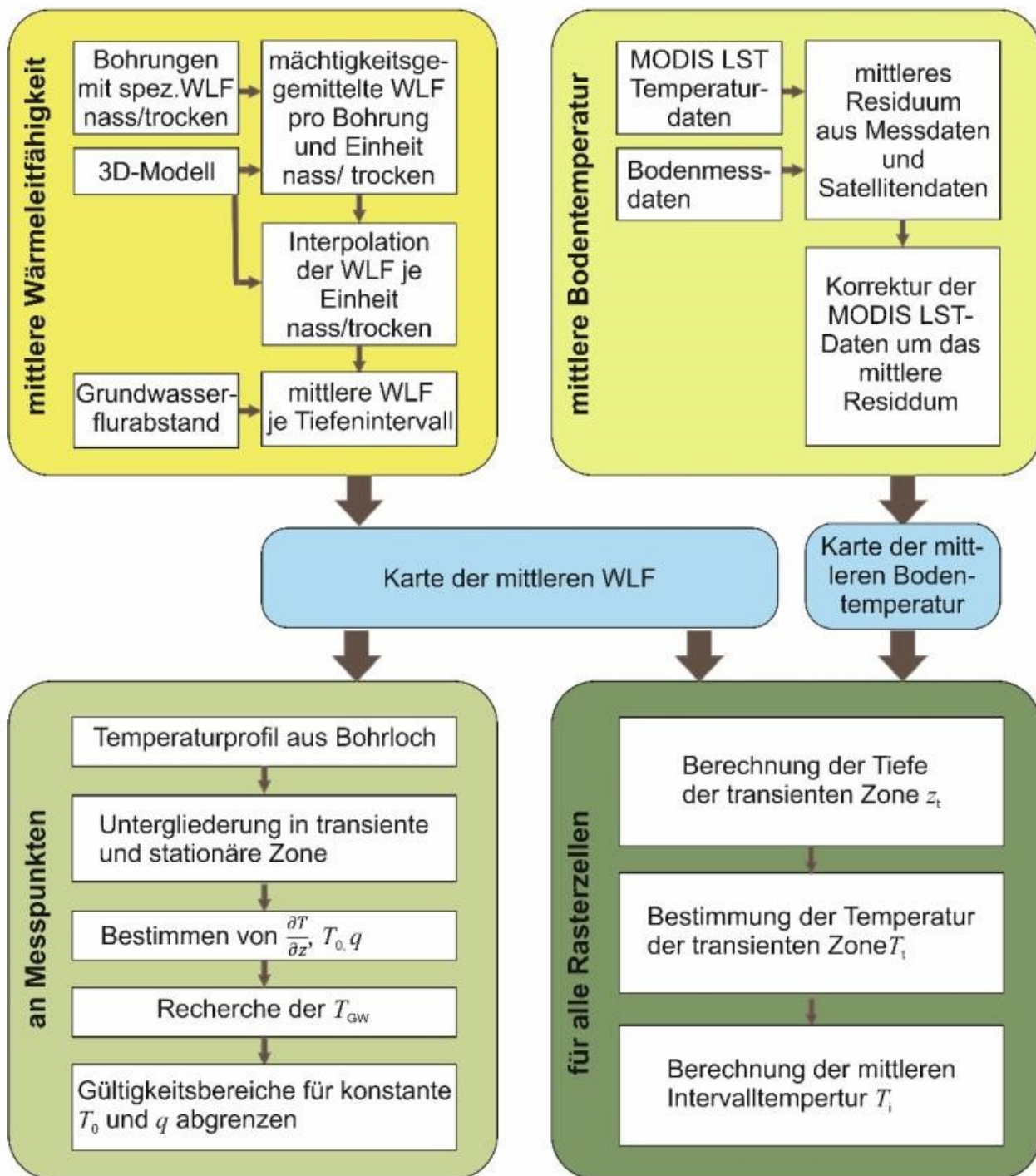


Abbildung 12: Arbeitsschritte zur Berechnung des geothermischen Potenzials für Erdwärmesonden.

$\frac{\partial T}{\partial z}$ ist der geothermische Gradient K/m, T_0 ist die ungestörte Bodentemperatur, T_t die Temperatur der transienten Zone, T_{GW} die Grundwassertemperatur, T_i die mittlere Intervalltemperatur in °C.

3.4.1 Spezifische Wärmeentzugsleistung

Die erste Version des harmonisierten Workflows der Projektpartner enthielt die spezifische Wärmeentzugsleistung als Zielparameter, welcher das geothermische Potenzial für Erdwärmesonden in W/m angibt. Dieser Parameter beschreibt, wieviel Watt thermische Energie pro Meter Bohrlochlänge dem Untergrund entzogen werden können und gibt damit indirekt die benötigte Tiefe der Erdwärmebohrung an.

Die Wärmeentzugsleistung hängt neben den physikalischen Eigenschaften des Untergrunds jedoch auch von technischen Parametern der Erdwärmeanlage wie dem Bohrlochdurchmesser und der jährlichen Betriebsdauer ab. Außerdem beeinflussen rechtliche Vorschriften diesen Parameter, wie z.B. die Festlegung, bis zu welcher Temperatur der Untergrund durch eine Erdwärmebohrung nach z.B. 50 Jahren abgekühlt werden darf. Um den Parameter auf Karten einheitlich darzustellen, müssen deshalb Erdwärmeanlagen mit Wärmepumpen standardisierter Größe und Betriebsdauer herangezogen werden. Soll eine Wärmepumpe mit abweichender Heizleistung errichtet werden, ist der in der Karte dargestellte Wert nicht gültig. Die spezifische Wärmeentzugsleistung wird trotzdem derzeit auf verschiedenen Web-Plattformen zur Charakterisierung des geothermischen Potenzials für Erdwärmesonden verwendet (z.B. PGI Polen, Sächsischer Geothermieatlas, Karten zur Standortbewertung für Erdwärmennutzung Rheinland-Pfalz), weil dieser Parameter eine erste grobe Abschätzung der benötigten Bohrlochtiefe gibt und für z.B. private Nutzer gut vorstellbar ist.

Zur Berechnung der Wärmeentzugsleistung wurden verschiedene Formeln verglichen. Die empirische Formel, welche das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie zur Berechnung des Geothermieatlas GTK50 (**LFULG, 2020**) verwendet, die sogenannte Sachsenformel (**LFULG, 2014**) ermittelt die spezifische Wärmeentzugsleistung für ein Standard-Einfamilienhaus bei z. B. einer Betriebszeit von 2400 h/a:

$$WEL = -0.85 \cdot \lambda^2 + 12.39 \cdot \lambda + 26.26 \quad (1)$$

In dieser Formel ist *WEL* die spezifische Wärmeentzugsleistung in W/m und λ die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Gesteins in W/(m·K).

Um diese Formel anwenden zu können, müssen viele Randbedingungen und Annahmen erfüllt sein, wie die ungestörte mittlere jährliche Untergrundtemperatur, die minimal mögliche Solerücklauftemperatur nach 50 Jahren Betriebszeit, der Bohrlochdurchmesser, die Heizleistung, die Jahresbetriebsstunden und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. All diese Parameter variieren aber in den Pilotgebieten des Geo-PLASMA-CE-Projekts. So sind in Ljubljana die Jahresbetriebsstunden kürzer und die Untergrundtemperatur höher als in Sachsen. In Polen sind ggf. die Heizleistungen geringer und die Bohrlochdurchmesser anders als in Sachsen. Deshalb konnte die Sachsenformel keine realistischen Ergebnisse für die gesamten Pilotgebiete des Projekts erbringen.

Als nächstes wurde versucht den infiniten Linienquellen-Ansatz von **REUSS (2015)** zu nutzen, welcher nur die Untergrundtemperatur, den Bohrlochradius und die Betriebsdauer der Anlage berücksichtigt:

$$q = \frac{(T-T_0) \cdot 4\pi\lambda}{\ln\left(\frac{4\kappa t}{r_b^2}\right) - \gamma} \quad (2)$$

In dieser Formel ist q die spezifische Wärmeentzugsleistung in W/m, r_b der Bohrlochradius in m, κ die thermische Diffusivität in m^2/s , γ die Euler Konstante, T_o die ungestörte Untergrundtemperatur in $^{\circ}\text{C}$, T die Untergrundtemperatur nach dem Wärmeentzug in $^{\circ}\text{C}$, t die Betriebsdauer der Anlage in Sekunden und λ die spezifische Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Hierbei wurden diese Eingangsdaten mit aktuell in Europa vergleichbaren Randbedingungen modifiziert. Die abgestimmten Randbedingungen für die Tests der Formel (2) sowie mittels Software EED sind folgende:

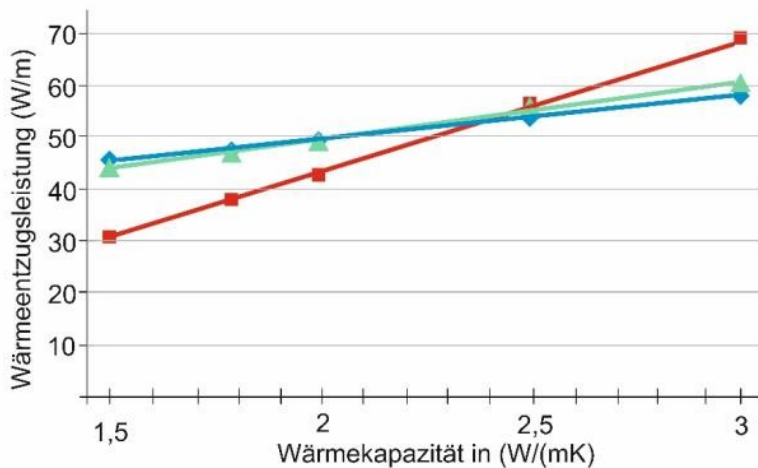
- Bohrlochdurchmesser: 152 mm
- Betriebsdauer der Wärmepumpe: 50 Jahre
- Gesteinsdichte: 2.100 kg/m^3
- Spezifische Wärmekapazität der Gesteine: $2.200 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Die zu verwendenden Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine werden von den berechneten Rasterdaten abgegriffen.

Formel (2) wurde in der Region Zwickau-Altenburg (Sachsen) und dem EU-Projektgebiet TransGeoTherm (Sachsen/Polen) getestet, in welchen bereits die geothermischen Entzugsleistungskarten im Maßstab 1:50.000 aus Berechnungen mit der Sachsenformel vorlagen. Die Ergebnisse für beide Formeln wurden an ausgewählten Standorten mit Berechnungsergebnissen der Standardsoftware EED (**HELLSTRÖM UND SANNER, 1994**) verglichen, welche von Planungsbüros zur Dimensionierung von Erdwärmeanlagen benutzt wird. Dieser Benchmarktest (vgl. Abbildung 13) berücksichtigte Variationen in der Wärmeleitfähigkeit sowie die aktualisierten, standardisierten Randbedingungen aus Formel (2).

Während der Linienquellen-Ansatz nach Formel 2 bei Wärmeleitfähigkeiten von $<2,35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ niedrigere Wärmeentzugsleistungen berechnet als die Software EED, überschätzt er die Wärmeentzugsleistung bei höheren Wärmeleitfähigkeiten. Die EED-Ergebnisse passen jedoch sehr gut zur Sachsenformel (1). Formel (2) liefert in üblichen Bereichen der mittleren Gesteinswärmeleitfähigkeit zwischen $1,0\text{-}2,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ca. 20% zu geringe Wärmeentzugsleistungen im Vergleich zur Software EED.

Das heißt, die Wärmeentzugsleistungen werden mit dem infiniten Linienquellen-Ansatz deutlich unterschätzt. Somit erweist sich auch diese Formel als nicht geeignet um das geothermische Potenzial für Erdwärmesonden darzustellen.



Legende: blau – Sachsenformel, rot – infiniten Linienquellen-Ansatz, grün – EED-Software.

Abbildung 13: Vergleich verschiedener Berechnungsformeln für die spezifische Wärmeentzugsleistung des Untergrunds.

Nach vielen weiteren aufwendigen Vergleichen und Berechnungen sowie intensiven Diskussionen haben die Projektpartner deshalb die empirische Sachsenformel sowie den Linienquellen-Ansatz als ungeeignet für das Projekt beurteilt. Unsere Recherchen zeigten weiterhin, dass sehr viele Formeln zur Berechnung der Wärmeentzugsleistungen existieren, deren Ergebnisse jedoch von den jeweiligen geltenden Randbedingungen abhängig sind. Außerdem spielt die Sensitivität der Untergrundtemperaturen und der Gesteinswärmeleitfähigkeiten eine sehr große Rolle.

Die Projekt-Partner entschieden deshalb, diesen Zielparameter nicht zu verwenden, weil er den unterschiedlichen klimatischen, geologischen, genehmigungsrechtlichen und technischen Aspekten in den Pilotgebieten nicht Rechnung tragen kann.

Es wurde für ein zukünftiges Vorgehen auf Internetportalen vorgeschlagen, den Parameter Wärmeentzugsleistung nicht mehr als flächendeckende Karte darzustellen, sondern als Einzelwert über eine in einem Web-Portal integrierte Berechnungsmaske auszugeben, bei der man die jeweils geltenden Randbedingungen individuell eintragen kann.

3.4.2 Mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds in einem Tiefenintervall

3.4.2.1 Einleitung

Die Fähigkeit eines Gesteins, Wärme zu leiten, wird durch den Materialparameter der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K) beschrieben. Ändert sich im Verlauf der Tiefe einer Erdwärmesonde das Gestein, so ergibt sich die Wärmeleitung zwischen Sonde und Umgebung als mächtigkeitsgewichteter Mittelwert der spezifischen Wärmeleitfähigkeiten der angetroffenen Gesteine. Ziel des Workflows ist es, diesen Wert für verschiedene Längen von Erdwärmesonden in einem Satz thematischer Karten darzustellen. Diese dienen Planern als wichtiger Berechnungswert für die Tiefe und Anzahl der benötigten Erdwärmesonden. Mit der farblichen Darstellung der Wärmeleitfähigkeiten können auch private Nutzer eine Abschätzung erhalten, wie geothermisch „gut“ der Untergrund am jeweiligen Standort ist. Es gilt, dass die benötigte Bohrung kürzer und damit kostengünstiger sein kann, je höher die mittlere Wärmeleitfähigkeit ist.

Um den Workflow auszuführen, sind die Software ArcGIS inklusive einer Lizenz für die Toolbox „Spatial Analyst“ nötig.

3.4.2.2 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten werden die Oberkanten der Gesteinseinheiten aus dem geologischen 3D-Modell benötigt. Diese müssen in 2D-Raster konvertiert werden, welche die absolute Tiefe als Zellmittelpunkt für die Grenzschichten anzeigen.

Die Oberkante der obersten geologischen Einheit gilt als Geländeoberfläche, so dass kein digitales Geländemodell geladen werden muss.

Des Weiteren wird ein Raster benötigt, welches den Grundwasserflurabstand beschreibt. Das ist die Tiefe des Grundwasserspiegels unter der Erdoberfläche. Sind genügend Daten zum Grundwasserstand in einem Pilotgebiet vorhanden, welche zum gleichen Grundwasserleiter gehören, kann der Grundwasserflurabstand durch Interpolation, z. B. durch Kriging geschätzt werden. Sind mehrere Grundwasserkörper vorhanden, kann eine Interpolation nur innerhalb der einzelnen Körper erfolgen.

In Kristallingesteinen liegen vorrangig Kluftgrundwasserleiter vor. Eine Interpolation von Grundwasserständen ist hier nicht sinnvoll. Für diesen Fall wurde eine neue Herangehensweise erarbeitet, die vorab festlegt, welche geologischen Einheiten als trocken anzusehen sind (z.B. Anthropogen und Verwitterungsschicht) und welche ab welcher Tiefe als wassergesättigt angesehen werden (z.B. alluviale Kiese, Sumpfgebiete und Kristallingesteine). Die Tiefen des Grundwasserspiegels in diesen Bereichen wurden dem 3D-Modell entnommen, da sie mit den Grenzen der geologischen Einheiten übereinstimmen.

Treten innerhalb der Kristallingesteine größere wassergesättigte Gebiete auf (z.B. Flussauen), kann dort der Grundwasserspiegel mittels Kriging, eventuell unter Verwendung künstlicher Stützstellen, interpoliert werden. Unter künstlichen Stützstellen versteht man Punkte, an welchen der Grundwasserspiegel anhand von geologischem Fachwissen oder mit Erfahrungswerten geschätzt wird, da keine Messungen vorliegen. Durch Zusammenfügen der Teilbereiche wird der Grundwasserspiegel für das gesamte Arbeitsgebiet modelliert. Der Grundwasserflurabstand wird als Differenz der Geländeoberfläche und des Grundwasserspiegels berechnet.

Für die Modellierung der mittleren Wärmeleitfähigkeiten werden die Bohrungsdaten aus dem Untersuchungsgebiet verwendet. Den im Bohrprofil erfassten Lithologien werden aus Labor- oder Literaturdaten zuerst die spezifischen Wärmeleitfähigkeiten für wassergesättigte und trockene Verhältnisse zugewiesen. Dabei wird die ursprüngliche Form der Bohrungsdaten verwendet und nicht die für das 3D-Modell aufbereitete/codierte. Das heißt, dass im Bereich einer Modelleinheit des 3D-Modells variable spezifische Wärmeleitfähigkeiten zugewiesen werden, wenn die Bohrungsdokumentation detailliert genug ist und somit die natürliche Variabilität der physikalischen Eigenschaft innerhalb einer Modelleinheit reproduziert wird (Abbildung 14).

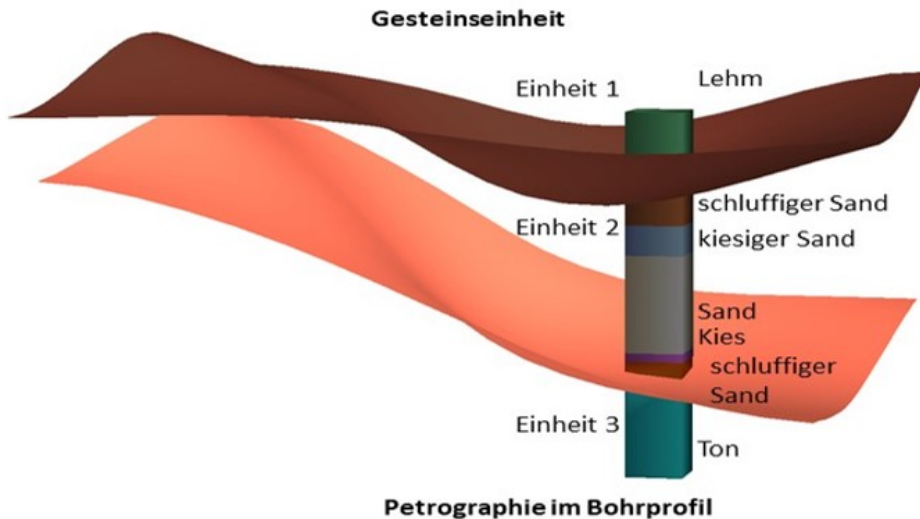


Abbildung 14: Detaillierte Petrographien in Bohrprofilen innerhalb geologischer Einheiten für die Zuweisung spezifischer Wärmeleitfähigkeiten.

Die geologischen Einheiten 2 und 3 werden im 3D-Modell durch ihre Top-Grenzen repräsentiert. Die Säule zeigt an, dass im Bohrprofil eine detailliertere Petrographie erfasst wurde, welche bei der Modellierung berücksichtigt wird.

3.4.2.3 Berechnung der mittleren Wärmeleitfähigkeit

Die Bohrungsdaten werden als Punktdaten zu den Rasterdaten der geologischen Einheiten und des Grundwasserflurabstands geladen. Dann wird der mächtigkeitsgewichtete Mittelwert aus den spezifischen Wärmeleitfähigkeiten pro geologischer Einheit jeweils für das trockene und wassergesättigte Gestein berechnet. Dieser stellt die repräsentative Wärmeleitfähigkeit einer geologischen Einheit an der Stelle einer Bohrung dar.

Aus diesen Punktdaten wird mittels der Inverse-Distanzen-Methode die Wärmeleitfähigkeit jeder geologischen Einheit interpoliert, jeweils für das trockene und das wassergesättigte Gestein. Diese Methode der Inversen Distanzen wird angewendet, um weiter entfernte Datenpunkte mit einer geringeren Wichtung als näher gelegene Bohrungen zu interpolieren. Wenn die Datendichte zu gering ist, um plausible Interpolationsergebnisse zu erhalten, müssen künstliche Stützstellen hinzugefügt werden. Ist sehr wenig über die Wärmeleitfähigkeit einer Einheit bekannt, kann dieser auch ein konstanter Wert zugewiesen werden. Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts entstehen pro geologischer Einheit zwei Rasterdatensätze mit mittleren Wärmeleitfähigkeiten (wassergesättigt, trocken), die in Auflösung und Ausdehnung mit dem Raster der Tiefenlage der geologischen Einheit übereinstimmen.

Im letzten Arbeitsschritt werden die mittleren Wärmeleitfähigkeiten für ein bestimmtes Tiefenintervall unter der Geländeoberfläche unter Berücksichtigung des Grundwasserflurabstandes berechnet. Dazu wurde die für das LfULG entwickelte ArcGIS-Extension „IE Geothermie“ (HGC, 2017) verwendet. Mit dieser Extension können mittlere Wärmeleitfähigkeiten in 10-Meter-Tiefenintervallen berechnet werden. Dazu werden die Tops der geologischen Einheiten, der Grundwasserflurabstand und die mittleren Wärmeleitfähigkeiten pro geologischer Einheit für das wassergesättigte und das trockene Gestein verrechnet. Die Extension berechnet die mittlere Wärmeleitfähigkeit bis zur vorgegebenen Tiefe. Für alle Gesteine über dem Grundwasserspiegel werden die Raster der trockenen Wärmeleitfähigkeiten verwendet, für alle Gesteine unterhalb des Wasserspiegels die wassergesättigten.

Als Ergebnis der Berechnung entsteht ein Satz thematischer Karten, welcher die mittlere Wärmeleitfähigkeit in $W/(m \cdot K)$ für alle ausgewählten Tiefenintervalle darstellt.

3.4.3 Mittlere jährliche Bodentemperatur

Die Temperatur des Bodens an der Erdoberfläche ist eine Randbedingung, um die Temperaturen im Erduntergrund berechnen zu können.

Für den Workflow benötigt man Messungen der Bodentemperatur (mindestens eine) sowie Satellitendaten, welche die Temperatur an der Erdoberfläche angeben.

Wenn Messstationen der Bodentemperatur im Untersuchungsgebiet vorhanden sind, liefern diese Zeitreihen der Temperatur in den obersten 1-2 Metern des Bodens. Um die mittlere jährliche Temperatur an der Erdoberfläche zu berechnen, einigten sich die GeoPLASMA-CE Partner, Messdaten aus 50 cm Tiefe über einen Zeitraum von 10 Jahren zu mitteln. Normalerweise gibt es zu wenige Messstationen, um die Bodentemperatur in einem Untersuchungsgebiet interpolieren zu können. Dann können die Daten aus den Messstationen zur Kalibration flächendeckend vorhandener Satellitendaten verwendet werden.

Flächendeckende Daten über die mittlere jährliche Temperatur an der Erdoberfläche werden von Satelliten gemessen. Wenn man diese Daten verwendet, muss man berücksichtigen, dass die Erdoberfläche, an der gemessen wird, und der geologische Untergrund, der charakterisiert werden soll, eventuell nicht vollständig thermisch miteinander gekoppelt sind. Außerdem sind größere Abweichungen zwischen den Satellitendaten und der wahren Bodentemperatur in bebauten Gebieten zu erwarten, wo die vom Satelliten gemessene Strahlung von Dächern reflektiert wurde oder wo die Geländeoberfläche versiegelt ist.

Im GeoPLASMA-CE Projekt musste durchschnittliche jährliche Bodentemperatur direkt unterhalb der Erdoberfläche aus Satelliten-Infrarotdaten abgeleitet werden. Wir haben MODIS LST Daten aus dem Zeitraum 2000-2013 benutzt (**NASA, 2018; GEODATI, 2018**). Der Rasterdatensatz hat eine räumliche Auflösung von 250 m und eine Temperaturgenauigkeit von 0.1 °C.

Zur Kalibration der Daten wurde an den Stellen, wo Messstationen der Bodentemperatur vorhanden waren, das Residuum aus mittlerer gemessener Bodentemperatur und Satellitendatum berechnet. Die Satellitendaten wurden um das mittlere Residuum aller Bodenmessstationen korrigiert.

3.4.4 Mittlere Intervalltemperaturen des Untergrunds

Die Wärmeentzugsleistung einer oberflächennahen Erdwärmeanlage wird neben der Wärmeleitfähigkeit und der Oberflächentemperatur von der mittleren Temperatur in einem definierten Tiefenintervall kontrolliert. Deshalb bestimmten die Partner die Intervalltemperaturen des Untergrunds in 50-Meter-Schritten für 50 m, 100 m, 150 m und 200 m Tiefe. Die Intervalltemperatur ist jeweils die mittlere Temperatur von der Erdoberfläche bis in die gegebene Tiefe. Um die Intervalltemperaturen bestimmen zu können, müssen drei Zonen mit verschiedenem thermischen Verhalten unterschieden werden, die saisonale, die transiente und die stationäre Zone (Abbildung 15):

- Die saisonale Zone befindet sich in der obersten Erdkruste direkt unter der Geländeoberfläche und umfasst jenen Bereich des Bodens, dessen Temperatur von der Sonneneinstrahlung abhängt und sich mit den Jahreszeiten ändert. In unserem einfachen Temperaturmodell wird die saisonale Zone als Teil der transienten Zone betrachtet.
- Die transiente Zone schließt nach unten an die saisonale Zone an und folgt der Änderung der mittleren Jahrestemperatur bei Klimaschwankungen. Häufig weist sie keinen oder einen negativen geothermischen Gradienten auf.
- Die Temperatur der stationären Zone wird durch den Wärmefluss aus dem Erdinneren kontrolliert und weist über lange Zeiträume einen konstanten geothermischen Gradienten auf.

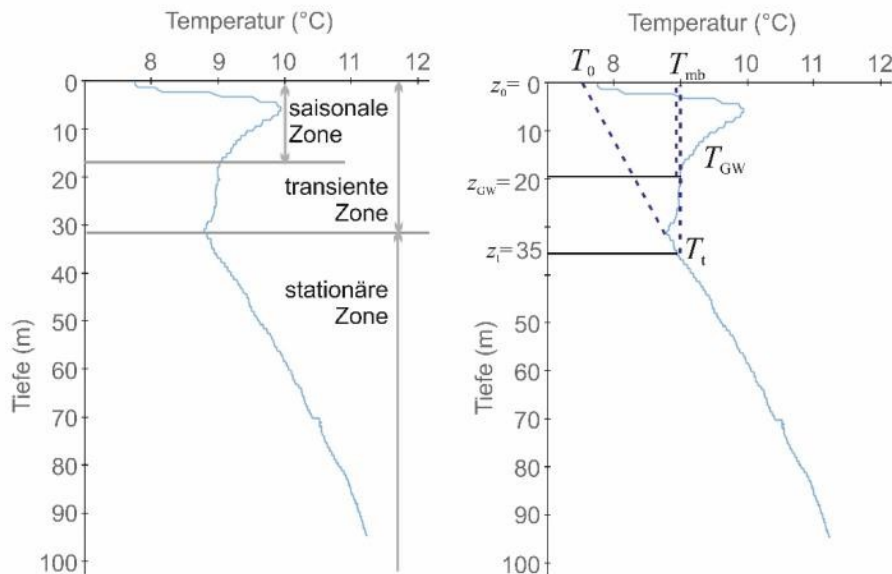


Abbildung 15: Beispiel eines Temperatur-Tiefen-Profiles.

Legende: Links: verschiedene Temperaturzonen; Rechts: für die Modellierung der Intervalltemperatur wesentliche Untergrundtemperaturen T_0 - ungestörte Bodentemperatur, T_{mb} - mittlere jährliche Bodentemperatur und T_t - Temperatur an der Basis der transienten Zone.

3.4.4.1 Eingangsdaten

Um den Workflow abzuarbeiten, benötigt man die Karte der mittleren jährlichen Bodentemperatur und die Karte der mittleren Wärmeleitfähigkeit für das gewünschte Tiefenintervall. Außerdem ist mindestens ein gemessenes Temperaturprofil aus einer Bohrung notwendig, um die Tiefe der Temperaturzonen und den geothermischen Gradienten zu bestimmen. Da der geothermische Gradient über große Gebiete konstant ist, kann der Workflow mit wenigen Daten ausgeführt werden. Der Workflow kann auch bei starkem horizontalem Grundwasserfluss angewendet werden. Dann werden der Grundwasserflurabstand und die mittlere jährliche Grundwassertemperatur benötigt. Für Untersuchungsgebiete mit starkem vertikalem Grundwasserfluss ist der Workflow nicht geeignet.

3.4.4.2 Bestimmung der Temperaturzonen, des geothermischen Gradienten, der ungestörten Bodentemperatur und des Wärmeflusses aus Temperaturmessprofilen

Aus den vorhandenen Temperaturmessprofilen muss zuerst die Tiefe der transienten Zone bestimmt werden. Sie endet in der Tiefe, in welcher die Temperatur linear anzusteigen beginnt. Im Bereich der darunterliegenden stationären Zone liest man an zwei möglichst weit entfernten Punkten die Tiefe und die Temperatur ab und berechnet daraus den geothermischen Gradienten:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(T_2 - T_1)}{(z_2 - z_1)} .$$

Hier ist $\frac{\partial T}{\partial z}$ der geothermische Gradient K/m, T die Temperatur in °C und z die Tiefe unter der Erdoberfläche in m. Die Indices 1 und 2 benennen die jeweiligen Ablesepunkte.

Danach ermittelt man die ungestörte Bodentemperatur T_0 durch Extrapolation der stationären Zone an die Erdoberfläche:

$$T_0 = T_1 - \frac{\partial T}{\partial z} z_1 ,$$

wobei T_0 die ungestörte Bodentemperatur ist.

Damit gilt für den geothermischen Gradienten:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{q}{\lambda} .$$

Außerdem berechnet man den Wärmefluss mit Hilfe der mittleren Wärmeleitfähigkeit im Intervall der verwendeten Tiefe z_2 :

$$q = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

In dieser Formel ist q der Wärmefluss in W/m^2 , λ die mittlere Wärmeleitfähigkeit in $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ und $\frac{\partial T}{\partial z}$ der geothermische Gradient in K/m .

Hat man mehrere Temperaturmessprofile zur Verfügung, bildet man für jeden Parameter den arithmetischen Mittelwert. Hat man viele Temperaturmessprofile, kann man Cluster mit ähnlichen geothermischen Gradienten und Zonentiefen bilden und innerhalb dieser die Mittelwerte berechnen. Als Ergebnis erhält man

- Den geothermischen Gradienten $\frac{\partial T}{\partial z}$,
- die ungestörte Bodentemperatur T_0 und
- den Wärmefluss q .

3.4.4.3 Bestimmung eines bereichsweise linearen Temperaturmodells

Um die mittleren Intervalltemperaturen an Standorten abschätzen zu können, an denen keine Messungen vorliegen, entwickelten wir bereichsweise lineare Temperaturmodelle für bestimmte Tiefenintervalle. Für diese werden die im vorigen Arbeitsschritt bestimmte ungestörte Bodentemperatur, die Karte mit den mittleren jährlichen Bodentemperaturen und die Karten mit den mittleren Wärmeleitfähigkeiten der jeweiligen Tiefenintervalle als Ausgangspunkt verwendet. Zuerst wird die Tiefe der transienten Zone für jeden Rasterpunkt abgeschätzt. Dabei gilt die Annahme, dass die transiente Zone in der Tiefe aufhört, wo die mittlere Bodentemperatur und die Temperatur der stationären Zone gleich sind.

$$z_{tdry} = \frac{T_{mb} - T_0}{\frac{\partial T}{\partial z}} .$$

In dieser Formel ist z_{tdry} die Tiefe der transienten Zone in m. Der Index $_{dry}$ steht für ein Modell, in dem keine Grundwassertemperatur berücksichtigt wird. T_{mb} ist die mittlere jährliche Bodentemperatur in $^{\circ}\text{C}$.

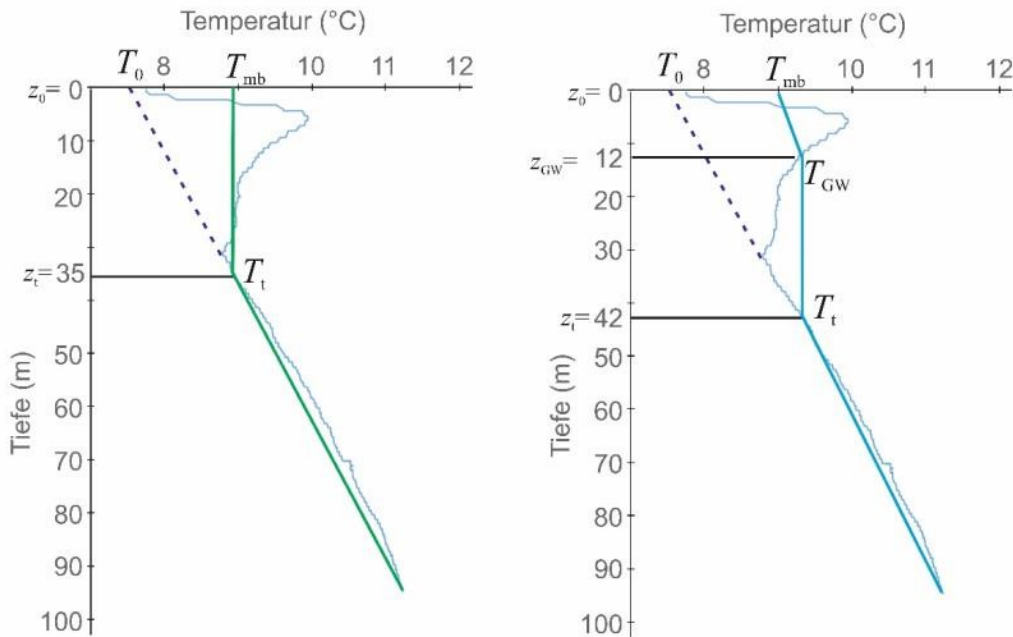


Abbildung 16: Lineare Modelle der Untergrundtemperatur ohne Berücksichtigung der Grundwassertemperatur (links) und mit Berücksichtigung der Grundwassertemperatur (rechts).

In der Abbildung ist die blaue, dünne Linie das gemessene Temperaturprofil, grün das lineare Modell ohne Grundwassereinfluss sowie die blaue dicke Linie das lineare Modell mit Grundwassereinfluss. Die violette Linie ist das extrapolierte lineare Modell der stationären Zone, welches für die Bestimmung von T_0 benötigt wird. T_0 ist die ungestörte Bodentemperatur, T_{mb} die mittlere jährliche Bodentemperatur und T_t die Temperatur an der Basis der transienten Zone.

Das lineare Modell nimmt an, dass die Untergrundtemperatur bis in diese Tiefe konstant und gleich der mittleren jährlichen Bodentemperatur ist. Das heißt, für die Temperatur der transienten Zone T_t gilt:

$$T_t = T_{mb} \text{ .}$$

In dieser Formel ist T_t die Temperatur in der transienten Zone und T_{mb} die mittlere jährliche Bodentemperatur, beide in °C.

Sind Grundwassertemperaturen und Grundwasserflurabstände bekannt, kann das lineare Modell verfeinert werden. Dann wird ein lineares Modell angepasst, welches die Grundwassertemperatur in der Tiefe des Messpunktes erreicht:

$$T_{usz}(z) = T_{mb} + \frac{(T_{GW} - T_{mb})}{z_{GW}} z \text{ .}$$

In dieser Formel ist T_{usz} die Temperatur der ungesättigten Zone (unsaturated zone), T_{GW} die Temperatur des Grundwassers, T_{mb} die mittlere jährliche Bodentemperatur, alle in °C, und z_{GW} ist die Tiefe des Messpunktes der Grundwassertemperatur in m. Ab dieser Tiefe wird eine konstante Temperatur bis zur Basis der transienten Zone angenommen, welche der Grundwassertemperatur entspricht.

Die Tiefe der transienten Zone ist größer als in dem Modell, in welchem kein Grundwasserfluss berücksichtigt wird. Die Temperatur der gesättigten Zone (aquifer) T_{aqu} ergibt sich zu:

$$T_{\text{aqu}} = T_{\text{GW}} = T_t ,$$

wobei T_{GW} die Temperatur des Grundwassers, T_t die Temperatur der transienten Zone in °C ist.

$$z_{\text{twet}} = \frac{T_{\text{GW}} - T_0}{\frac{\partial T}{\partial z}}$$

gibt die Tiefe z_t der transienten Zone in m an. Der Index $_{\text{wet}}$ steht für ein Modell, in welchem die Grundwassertemperatur berücksichtigt wird.

Für den Bereich der stationären Zone wird ein linearer Temperaturanstieg angenommen, welcher durch das lineare Modell beschrieben wird:

$$T_s(z) = T_t + \frac{\partial T}{\partial z}(z - z_t)$$

T_s ist die Temperatur der stationären Zone in der Tiefe z .

3.4.4.4 Berechnung der Intervalltemperaturen

Für einen Standort mit Grundwasserführung ergibt sich die mittlere Intervalltemperatur T_i im Tiefenintervall z_i des Untergrunds wie folgt:

$$T_i(z_i) = \left\{ \frac{z_{\text{GW}}}{z_i} \cdot \frac{T_{\text{mb}} + T_{\text{GW}}}{2} + \frac{z_t - z_{\text{GW}}}{z_i} \cdot T_t + \left(1 - \frac{z_t}{z_i}\right) \cdot \left[\frac{2T_t + \frac{\partial T}{\partial z}(z_i - z_t)}{2} \right] \right\}$$

4 Das Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen

4.1 Situation der oberflächennahen Erdwärme im Pilotgebiet

Das Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen gehört zu den grenzüberschreitenden und ländlichen Pilotgebieten im GeoPLASMA-CE Projekt. Es umfasst 1.900 km², 540 km² in W-Böhmen und 1.360 km² im Vogtland. Es ist charakterisiert durch eine Mischung von landwirtschaftlichen und industriellen Charakter und kleinen bis mittelgroßen Städten mit einer Einwohnerzahl von einigen hundert bis 75.000.

Der nördliche Teil des Gebiets besteht aus einer bergigen Landschaft mit bewaldeten Kuppen und tief eingeschnittenen Flusstälern. Der höchste Berg erreicht 974 m üNN. Die Landschaft besteht aus einem felsigen Untergrund mit geringmächtigen Böden und einem oberflächennahen Entwässerungssystem. Auf tschechischer Seite bricht die Berglandschaft abrupt ab ins Egerbecken. Dieses ist durch mächtige sedimentäre Einheiten, ein mildes Klima und eine dichte Besiedlung gekennzeichnet.

Im Vogtland wurden die meisten Erdwärmeanlagen in der Umgebung der Städte Plauen und Auerbach hauptsächlich für alleinstehende Häuser, z.B. Einfamilienhäuser, errichtet. Diese Anlagen haben eine mittlere Kapazität von ca. 10 kW. Außerdem existieren 20 Anlagen mit einer Kapazität >30 kW für Büro- und Geschäftsgebäude und ein Schwimmbad. Die größte Erdwärmeanlage hat eine Kapazität von 180 kW und ist in einem administrativen Gebäude installiert. Insgesamt wurden 579 geothermische Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 7,2 MW registriert (**LFULG, 2018**). Jedes Jahr kommen ca. 20 neue Anlagen hinzu.

In der Tschechischen Republik werden Daten über geothermische Anlagen nicht nach regionalen Aspekten erfasst, sodass man nicht sagen kann, wie viele Anlagen im Pilotgebiet existieren. Die überwiegende Heiz-Energiequelle ist Braunkohle aus dem Abbau der tertiären Sedimentbecken in der Nähe von Cheb und Sokolov. Der oberflächennahe Erdwärmemarkt in der gesamten Tschechischen Republik ist in der Entwicklung und es besteht hier ein großer Bedarf erneuerbare und klimafreundliche Energieformen zu stärken.

4.2 Ziel der Arbeit im Pilotgebiet

Die natürlichen Bedingungen um oberflächennahe Geothermie zu nutzen, sind im Pilotgebiet gut, da unter dem Egergraben ein lithosphärisches Hoch liegt, was geothermische Gradienten bis zu 5,5 K / 100 m bewirkt. Nach Norden nimmt der geothermische Gradient bis auf 3 K / 100 m ab. Das bedeutet, dass bei gleichen physikalischen Gesteinseigenschaften das geothermische Potenzial des Untergrunds im Süden doppelt so hoch ist wie im Norden. Da es sich beim Pilotgebiet um eine ländliche zersiedelte Gegend handelt, sind geothermische Anlagen, welche gut in Ein- und Mehrfamilienhäusern installiert werden können, eine günstige Alternative zu Heizquellen, die ein Zuleitungssystem erfordern. Ziel der Projektarbeit ist es, Wissen über die Nutzbarkeit der oberflächennahen Geothermie gut aufbereitet zur Verfügung zu stellen, um die Akzeptanz für Erdwärmeanlagen bei Behörden, Regionalplanern und Privatpersonen zu stärken. Dazu wurde ein detailliertes geologisches 3D-Modell erstellt und das geothermische Potenzial des Untergrundes abgeschätzt.

Ein besonderer Aspekt im Pilotgebiet ist gegeben, da durch die vulkanische Tätigkeit im Egergraben Tiefenwässer aufsteigen und Thermal- und Mineralquellen bilden. Diese werden für Kur- und Heilbäder genutzt, z.B. Františkovy Lázně und Bad Elster. Zu dieser Nutzung des Untergrunds können Erdwärmanlagen im Konflikt stehen, da befürchtet werden muss, dass durch Erdwärmebohrungen die Zuleitung von Mineralwässern in einen Kurort gestört oder unterbrochen wird, was enorme wirtschaftliche Folgen hätte. Deshalb wurde im GeoPLASMA-CE Projekt ein besonderer Schwerpunkt daraufgelegt, Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren zu erfassen, zu analysieren und in thematischen Karten zu präsentieren.

4.3 Geologie des Pilotgebiets

Der Untergrund des Pilotgebiets gehört zur Saxothuringischen Zone des Variszischen Gebirges. Der Nordteil wird vom Vogtländischen Synklinorium gebildet, welche zur wrench-and-thrust-Zone nach **KRONER ET. AL. (2010)** gehört. Das Alter der Gesteine reicht von Ordovizium bis zum Unterkarbon. Es handelt sich überwiegend um marine Sedimente, welche von vulkanischen Gesteinen durchsetzt werden. Bei der karbonischen Variszischen Orogenese wurden diese Einheiten stark gestört und verschuppt sowie niedrig-gradig metamorph überprägt. Im Süden schließt sich an das Vogtländische Synklinorium, getrennt durch das Zentralsächsische Lineament, die Allochthone Domäne **KRONER ET. AL. (2010)** mit der Erzgebirgs-Fichtelgebirgs-Zone an. Diese umfasst Variszische Deckeneinheiten, welche sich vor ca. 340-330 Ma (Unterkarbon) gebildet haben und aus Phylliten, Glimmerschiefern und Gneisen bestehen. Diese Gesteine bestehen hauptsächlich aus jungproterozoisch-paläozoischen marinen Edukten, wurden aber mittelgradig-metamorph bei der Variszischen Orogenese überprägt.

Abbildung 17 zeigt die modellierten geologischen Einheiten im Pilotgebiet. Da die Modelleinheiten die geothermischen Eigenschaften des Untersuchungsgebiets abbilden sollen, wurden Gesteine unterschiedlichen Alters mit ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten und hydrogeologischen Eigenschaften zusammengefasst. Die Farbcodierung auf der Karte entspricht deshalb nicht den Standards der geologischen Kartierung.

Während der letzten Phase der Variszischen Orogenese im Karbon (vor ca. 320-310 Ma) intrudierten Granitplutone in die Einheiten des Vogtländischen Synklinoriums und der Erzgebirgs-Fichtelgebirgs-Zone: der Bergener, Eichigter, Kirchberger, Eibenstocker und Fichtelgebirgs-Granit.

Die post-Variszische Evolution im Pilotgebiet kann im Cheb-Becken, einem Teilbecken des Egergrabens, beobachtet werden. Das Cheb-Becken liegt an der Kreuzung der NE-streichenden Störungen des Egergrabens und der NW-streichenden Störungen des Cheb-Domažlice-Grabens. Im Cheb-Becken wurden mächtige Känozoische Sedimente abgelagert, die sowohl marinen als auch paralischen und terrestrischen Ursprungs sind. Diese Sedimente erreichen eine Mächtigkeit von 300 m, liegen diskordant auf dem Variszischen Basement und sind durch eine horizontale Lagerung gekennzeichnet.

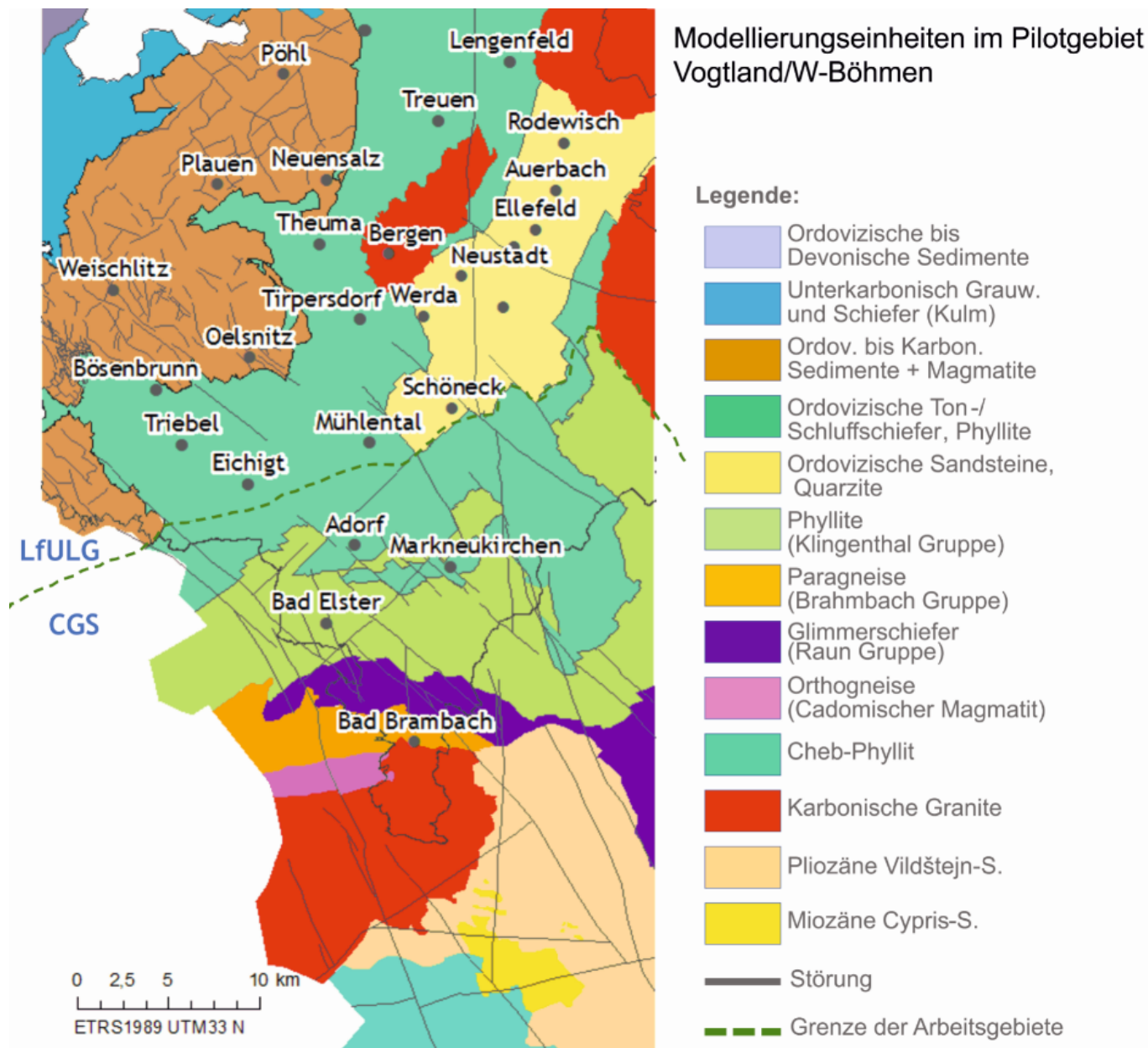


Abbildung 17: Geologische Karte der modellierten Einheiten im Pilotgebiet.

Die Farbcodierung entspricht nicht der geologischen Karte, da Gesteine mit ähnlichen geothermischen-hydrogeologischen Eigenschaften gruppiert wurden.

Im grenzüberschreitenden Pilotgebiet wurden insgesamt 43 geologische Einheiten nach hydrogeologischen und geothermischen Eigenschaften in einem geologischen 3D-Modell zusammengefasst und modelliert (Tabelle 3). In einem Normalprofil sind die Einheiten mehrsprachig aufgelistet.

Tabelle 3: Übersicht über die Modelleinheiten des 3D-Modells.

Gesteinsart	Alter	Modelleinheit	Lagerungs- und Kontaktverhältnisse
Sedimentite und Vulkanite	Quartär	Organogene Bildungen	Diskordanz
		Bindige holozäne Talfüllungen: Auenlehm	Diskordanz
		Kiesanteil des Auenlehms: ebene Flussauen	Konkordanz
		Kiesanteil des Auenlehms: Kleine Vorfluter	Diskordanz
		Schüttflächen	Diskordanz
		Gehängelehm	Diskordanz
		Löss und Löss-Derivate	Diskordanz
		Blockschutt	Diskordanz
		Tiefere Niederterrasse (TNT):	Diskordanz
		Tiefere Mittelterrasse (= Hauptterrasse)	Diskordanz
		Hauptterrasse mit hydrogeologischer Verbindung zum Fluss	Diskordanz
		Mittlere Terrasse der Weißen Elster und ihrer Nebentäler	Diskordanz
		Glazifluviale Bildungen	Diskordanz
	Neogen	Jungtertiäre bis unterpleistozäne Terrassen	Erosionsdiskordanz
		vildštejnské strata	Diskordanz
		cyprisové strata	Konkordanz
		hlavní slojové strata	onlap-Diskordanz
	Paleogen	vor-Miozäne Verwitterungsprodukte	onlap-Diskordanz
		tertiäre Basaltoide	Intrusion
	Karbon	klastische Sedimentite des Karbons (Kulm)	Diskordanz
		Kalkstein	Diskordanz
	Devon	Mikrogabbro	Intrusion
		Oberdevonische Kalksteine	Diskordanz
		Oberdevonische Konglomerate	Diskordanz
		Oberdevonische Vulkanite	Diskordanz
		Oberdevonische Grauwacken	Diskordanz
		Unterdevonische klastische Sedimente	Konkordanz
		Tentakulitenkalk und Tentakulitenschiefer	Konkordanz
	Silur	Kiesel- und Alaunschiefer	Konkordanz
	Ordovizium	Ton- und Schluffschiefer	Konkordanz
		Hauptquarzit	Konkordanz
		Sandsteine und Quarzite	Konkordanz
Metamorphite	karbonische Metamorphose	Phyllit des Vogtländischen Schiefergebirges	Scherzone
		Phyllit der Klingenthalgruppe	Scherzone
		Cheb-Phyllit	Scherzone
		Glimmerschiefer der Raungruppe	Scherzone
		Gneise der Brambachgruppe	Scherzone
		Orthogneise und Metagranite	Scherzone
Plutonite	karbonische Intrusion	innerer Kontakthof	Kontaktmetamorphose
		Eibenstock-Granit	Intrusion
		Fichtelgebirge-Granit	Intrusion
		Bergen-Granit	Intrusion
		Kirchberg – Granit	Intrusion

Am Beispiel einer Modelleinheit wird gezeigt, welche kartierten Einheiten für diese zusammengefasst wurden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Auszug aus dem Normalprofil, zusammengefasste Karteneinheiten zum Modellkörper „Phyllit“.

Name	Beschreibung	Lithologie	GK50dig
Phyllite	Gräfenthal-,	Schluffphyllit, dunkel- bis schwarzgrau, lokal geröllführend	486
	Phycoden-, Weißelster- Gruppe; undifferenziert:	Schluffschiefer, (Oberer Erzhorizont) sandiger Schluffschiefer. mit Lagen von Chlorit, Eisenerz bzw. Sandstein	435
	Tonschiefer	Tonphyllit, schwarzgrau	415
	Quarzit, Schluff- schiefer, sand- bändrig	Schluffschiefer, (Mittlerer Erzhorizont) eisenschüss. oolith. Chloritschief. oft konglomeratisch, örtl. als quarzitischer Sandstein ausgebildet	436
		Schluffschiefer, sandig, grau, selten geröllführend	437
		Tonschiefer, ebenschiefrig, dunkelgrau bis blauschwarz, fettglänzend	837
		Schluffschiefer, (Unterer Erzhorizont) thuringitisch, mit grobsandigen Quarzgeröllen und Thuringit-Ooiden	834
		Pyroxengranatfels	434
		Schluff- und Tonphyllit, anchimetamorphartig bis normal-metamorph, z.T. mild und dünn-schiefrig, z.T. grün, z.T. schwarzgrau, selten blaßbändrig oder quarzstreifig, mit Einschuppungen von Metakieselschiefer und -hornstein	380
		Tonschiefer, Schluffschiefer, sandbändrig bis streifig	413
		Schluffschiefer bis Schluffphyllit, grünlichgrau, meist siltstreifig bis siltbändrig	448
		Schluffschiefer, grüngrau bis oliv mit hellgrauen Siltstreifen und -bändern lokal schwach phyllitisch	440
		Schluffschiefer, dunkelgrau und grüngrau	838
		Schluffschiefer, dunkelgrau mit grauen bis hellgrauen Siltstreifen und -bändern, lokal schwach phyllitisch	438
		Wechselfolge bunter Tonsiltsteine mit grauen und gelblichen Feinsandsteinen und Vulkaniten	840
		Wechselagerung von plattigem Quarzit und phyllitischem Schluffschiefer, grüngrau	830
		Schluffschiefer, phyllitisch, violett bis dunkelblauviolett	831
		Schluffschiefer, phyllitisch, graugrün, sandig gebändert	832
		Tonphyllit, anchimetamorphartig, dunkelbläulichgrau bis dunkelgrauviolett, selten quarzitstereifig	442
		Wechselfolge von grünlichgrauen, z.T. quarzitisch gestreiften Schluffphylliten und rotgrauen Tonphylliten, stark Quarzknuern führend	839
		Schluffphyllit, anchimetamorphartig, grünlichgrau, stark quarzitstreifig, sekundär oft bräunlich	443
		Tonphyllit, anchimetamorphartig, dunkelviolettblau	868

4.4 Hydrogeologie des Pilotgebiets

Im Pilotgebiet gibt es drei hydrogeologisch unterschiedliche Regionen. Die metamorphen und magmatischen Gesteine des Vogtländischen Synklinoriums und der Erzgebirgs-Fichtelgebirgs-Zone sind durch Kluftporosität gekennzeichnet. Die Hauptkluftrichtungen streichen NNE, NE und E. Die Klüfte sind unregelmäßig im Gestein verteilt und bilden diskontinuierliche Aquifers mit variabler Mächtigkeit, welche ungespannt oder gespannt sein können. Der Grundwasserspiegel folgt der Morphologie und die Wasserzirkulation ist an die Klüfte und Störungszonen gebunden. In der Verwitterungsschicht treten oberflächennahe Wässer auf, welche wichtig für die lokale Trinkwasserversorgung sind.

Das Hauptgrundwasserreservoir im Pilotgebiet befindet sich im Cheb-Becken. Das Cheb-Becken weist eine typische Struktur alternierender Aquifers und Aquitards auf. Es gibt drei große Grundwasserleiter, welche aus NW und W vom Fichtelgebirge gespeist werden. Das Gebiet wird vom Flusssystem der Eger entwässert.

Die Zirkulation von Tiefenwasser entlang von Störungen lässt sich durch die Existenz von kohlenstoffreichen Mineralquellen nachweisen. Die höchste Dichte an Mineralwasserquellen tritt im Gebiet von Františkovy Lázně und Soos auf.

4.4.1 Datengrundlage für die durchgeführten Arbeiten

Geologische Karte 1:50.000 Erzgebirge-Vogtland GK50 EV (**LFULG, 1995**) war die Modelliergrundlage und wurde auch dazu verwendet, das Normalprofil mit den zu modellierenden lithologischen Einheiten festzulegen. Auf deutscher Seite wurde diese Karte nur dann um 1:25.000 Blätter aus der Region ergänzt, wenn es Widersprüche oder Klärungsbedarf bei der Modellierung gab. Auf tschechischer Seite wurden fünf Kartenwerke verwendet (**ŠKVOR ET AL., 1974; ŠKVOR UND KOVANDA., 1986; KVIČINSKÝ, 1988; ŠANTRŮČEK ET AL., 1991; MLČOCH ET AL., 1991**).

Auf Grundlage dieser Kartenwerke wurden die lithologischen Einheiten zur Darstellung im 3D-Modell ausgewählt. Es wurde ein grenzüberschreitend harmonisiertes Störungsnetzwerk erarbeitet.

Für die 3D-Modellierung der lithologischen Einheiten und des Grundwasserflurabstands standen 7.429 Bohrungen und 208 Grundwassermessstellen, überwiegend im Bereich des Cheb-Beckens, zur Verfügung.

Für die Berechnung des geothermischen Potenzials im Sinne von mittleren Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Tiefenintervalle war die Ausweisung des Grundwasserflurabstandes notwendig. Folgende Annahmen für die Berechnung des Grundwasserspiegels wurden im Pilotgebiet für die relevanten Einheiten getroffen (Tabelle 5):

Tabelle 5: Annahmen für Berechnung des Grundwasserspiegels im Pilotgebiet.

geologische Einheit	Annahme wasser-gesättigt/ trocken	Berechnungsanweisung
Anthropogen	trocken	kein Grundwasser
organogene Einheiten	wassergesättigt	Rasterwert
Terassen	trocken	kein Grundwasser
Alluvialer Ton	trocken	kein Grundwasser
Alluvialer Kies	wassergesättigt	Rasterwert = Basis Auelehm
Kolluvial	wassergesättigt	Interpolation von existierenden GW-Ständen aus Bohrungen/Brunnen mittels Kriging innerhalb der einzelnen Polygone (virtuelle Stützstellen sind nötig, v.a. an Grenze zu Nachbarpolygonen)
Festgestein mit Quartärbedeckung	wassergesättigt	Rasterwert = Quartärbasis
Festgestein ohne Quartärbedeckung	trocken bis 3 m unter Gelände, dann wassergesättigt	Rasterwert = Top (Oberkante) - 3 m
Cheb-Becken	wassergesättigt	Interpolation von existierenden GW-Ständen aus Bohrungen/Brunnen mittels Kriging

Nach erfolgter Interpolation und Zusammenfügen einzelner Bereiche wurde das Grundwasserspiegelraster vom Raster des digitalen Geländemodells subtrahiert um den Grundwasserflurabstand zu erhalten. Zur Berechnung der mittleren Wärmeleitfähigkeiten konnte das Projektteam auf ca. 900 petrographische Daten mit thermischen Eigenschaften zugreifen. Die anisotrope spezifische Wärmeleitfähigkeit von fünf Proben wurde während des Projekts im tschechischen Gebietsteil experimentell bestimmt.

Die durchschnittliche jährliche Bodentemperatur wurde aus Satelliten-Infrarot MODIS LST (**NASA, 2018**) Daten des Zeitraums 2000-2013 abgeleitet und um einen Term von +1 K korrigiert. Um die Temperaturen in Tiefen bis zu 200 m abzuschätzen und den geothermischen Gradienten zu bestimmen, standen im Pilotgebiet nur 10 Bohrungen mit Temperaturmessungen zur Verfügung. Dieser Datensatz ist zu klein um in einem Gebiet mit komplexem geologischen Aufbau die Untergrundtemperatur abschätzen zu können. Aus diesem Grund konnten keine thematischen Karten über die Untergrundtemperatur erzeugt werden.

Die Daten zur Beschreibung der Landnutzungs- und Risikofaktoren wurden aus Datenquellen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, des Tschechischen geologischen Dienstes und vom Geoportal Sachsenatlas (**GEO SN, 2016**) zusammengesammelt. Sie umfassen z.B. Wasserschutzgebiete, eine Hohlraumkarte und Karstgebiete.

4.5 Ergebnisse der Arbeit im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen

Im **geologischen 3D-Modell** wurden die geologischen Einheiten durch ihre Top-Grenzflächen dargestellt. Das geologische 3D-Modell ist im Web-GIS als virtuelles Bohrprofil sichtbar, welches an einem beliebigen Standort erzeugt werden kann. Weiterhin besteht die Möglichkeit im Web-GIS, sich das gesamte 3D-Modell über die Anwendung der Software GST-Web (**GIGA INFOSYSTEMS, 2020**) anzeigen zu lassen. Abbildung 18 zeigt Impressionen des 3D-Modells aus dem computer-aided virtual reality environment (CAVE) der TU Bergakademie Freiberg, kurze Erläuterungen zu den Bildern können der Bildunterschrift entnommen werden.

Thematische Karten wurden für 13 **Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren** erstellt. Die großflächigsten Konflikte sind in den Abbildungen 20 bis 24 dargestellt. Der vollständige Satz der thematischen Karten kann auf der Web-Plattform unter <https://portal.geoplasma-ce.eu/webgis/vogtland-w-bohemia> eingesehen werden. Die Karten visualisieren die Verbreitung der Risiko- und Konfliktfaktoren im Pilotgebiet ohne Bewertung ihrer Auswirkungen auf eine oberflächennahe Erdwärmeanlage. Alle in den thematischen Karten dargestellten Kategorien wurden reklassifiziert, um die Standorteignungskarten (Ampelkarten) für Grundwasserwärmepumpen und Erdwärmesonden zu prozessieren (Tabelle 6).

Tabelle 60: Zuordnung einzelner Landnutzungskonflikte und Risiken zu Ampelfarben.

Konflikt/ Risikofaktor	Grundwasserwärmepumpen	Erdwärmesonden
kein ergiebiger Grundwasserleiter		
Überschwemmungsgebiete		
Karstgebiete und Höhlen		
Brunnenbohrungen		
andere Bohrungen		
Naturschutzgebiet – Bohrung nicht erlaubt		
Naturschutzgebiet – Bohrung erlaubt		
Heilquellenschutzgebiet		
Trinkwasserschutzgebiet Zone III		
Trinkwasserschutzgebiet Zone II und I		
Gebiet mit Mineralwasservorkommen		
natürliche Gasaustritte		
Altlasten		
Störungen		

Die **Ampelkarte zur Eignung für Grundwasserwärmepumpen** (Abbildung 25) zeigt, wo die natürlichen, hydrogeologischen Gegebenheiten für diese Technologie günstig sind, das heißt wo ausreichend Grundwasser ganzjährig zu erwarten ist. Im Vogtland ist das nur in den Auen der größeren Flüsse der Fall, während in den sedimentären Einheiten des Cheb-Beckens großflächige Grundwasserleiter auftreten. Im Cheb-Becken wurden an natürlich geeigneten Standorten Naturschutzgebiete, Bergbauggebiete sowie Altlasten als problematische Zonen bewertet und Wasserschutzgebiete als ungeeignet ausgeschlossen.

Die **Ampelkarte zur Eignung für Erdwärmesonden** (Abbildung 26) schließt Heilwasserquellen und Trinkwasserschutzgebiete der Zonen I und II als Standorte für Erdwärmeanlagen aus und betrachtet Naturschutzgebiete, Bergbauggebiete, Gebiete mit Mineralwasservorkommen, Altlasten sowie Wasserschutzgebiete der Zone III als Einzelfallentscheidungen, in denen mit Restriktionen gerechnet werden kann.

Die Karten der mittleren Wärmeleitfähigkeit wurden für Tiefenintervalle in 10 m Schritten berechnet, von denen drei Karten hier dargestellt sind (Abbildungen 27 bis 29). Da die spezifischen Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine stark variieren, ist in den **Karten der mittleren Wärmeleitfähigkeiten** die Lage geologischer Einheiten gut wiederzuerkennen: Dunkelrote Bereiche (hohe mittlere Wärmeleitfähigkeiten) befinden sich dort, wo Granitplutone und Quarzite vorkommen. Gelbe und grüne Bereiche (niedrige mittlere Wärmeleitfähigkeiten) treten auf, wo sedimentäre Gesteine vorkommen. Die große Toßfeller Störung im Zentrum des Pilotgebiets zeichnet sich deutlich als Grenze zwischen orangen und roten Bereichen der Wärmeleitfähigkeitskarten ab. Die berechneten mittleren Wärmeleitfähigkeiten reichen von 0,9 - 3 W/(m·K). Lokationen mit niedrigen mittleren Wärmeleitfähigkeiten können als Standorte für Erdwärmesonden verwendet werden, allerdings muss an diesen Lokationen tiefer gebohrt werden um die erforderliche Energie zu gewinnen als an Lokationen mit hohen mittleren Wärmeleitfähigkeiten. Die Investitionskosten für eine Erdwärmeanlage werden deshalb höher als an „warmen“ Standorten.

Die **mittlere jährliche Bodentemperatur** im Pilotgebiet schwankt von 6-9 °C. Sie ist im Tiefland am höchsten und in den Mittelgebirgslagen am niedrigsten (Abbildung 30). Dieser Parameter ist für eine Dimensionierung von Erdwärmeanlagen neben der mittleren Gesteinswärmeleitfähigkeit sehr wichtig.

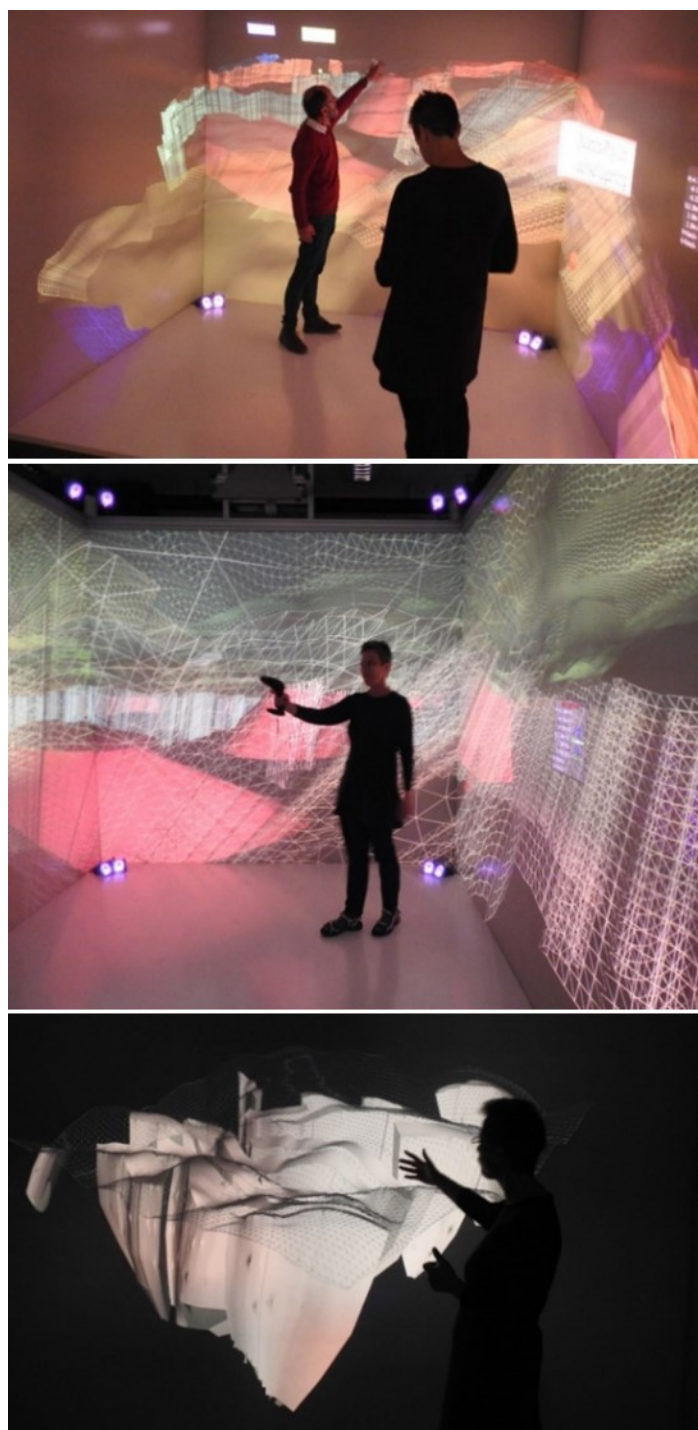


Abbildung 18: Geologisches 3D-Modell in der virtuellen Umgebung (CAVE) der TU Bergakademie Freiberg.

Oben: Das Bild zeigt eine Aufsicht auf das Modell. Die geologischen Grenzflächen sind entweder trianguliert oder als durchgehende Flächen dargestellt. Rot und durchgehend sind die Plutone, trianguliert sind die Grenzen der sedimentären und metamorphen Einheiten, Blick nach Norden.

Mitte: Ausschnitt mit Blick nach Norden. Im linken Bildteil ist rot der Pluton von Eichigt, rechts daneben der Pluton von Bergen zu sehen (rote durchgehende Flächen). Diese intrudierten in verschiedene metamorphe Gesteine (triangulierte Flächen).

Unten: Detail des Modells mit einer Quarzit-Phyllit-Wechselagerung. Die durchgehenden grauen Flächen sind die Grenzflächen des Quarzits, der Phyllit ist das Umgebungsgestein (schwarz), die triangulierte Fläche ist das DGM.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

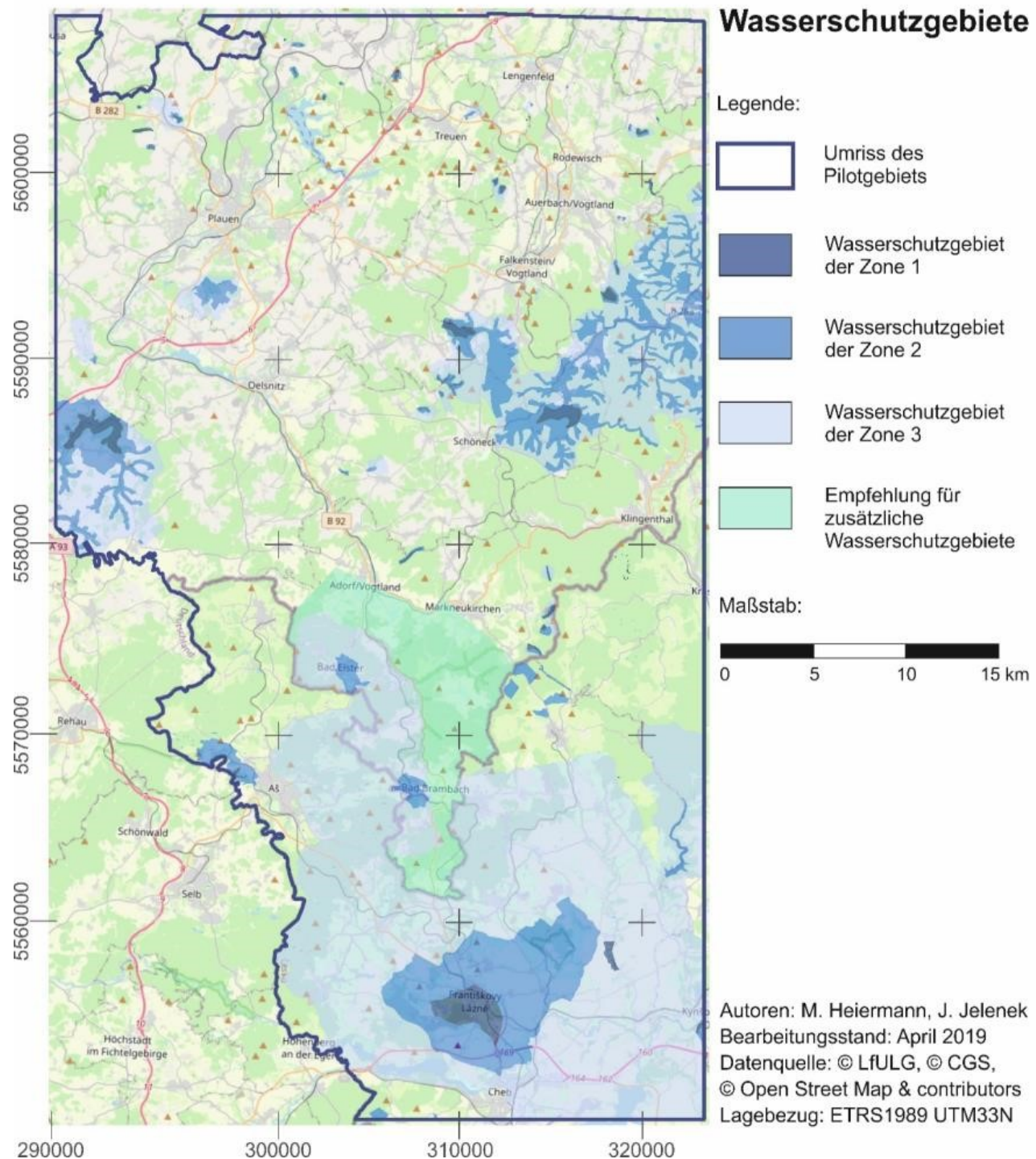


Abbildung 19: Wasserschutzgebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

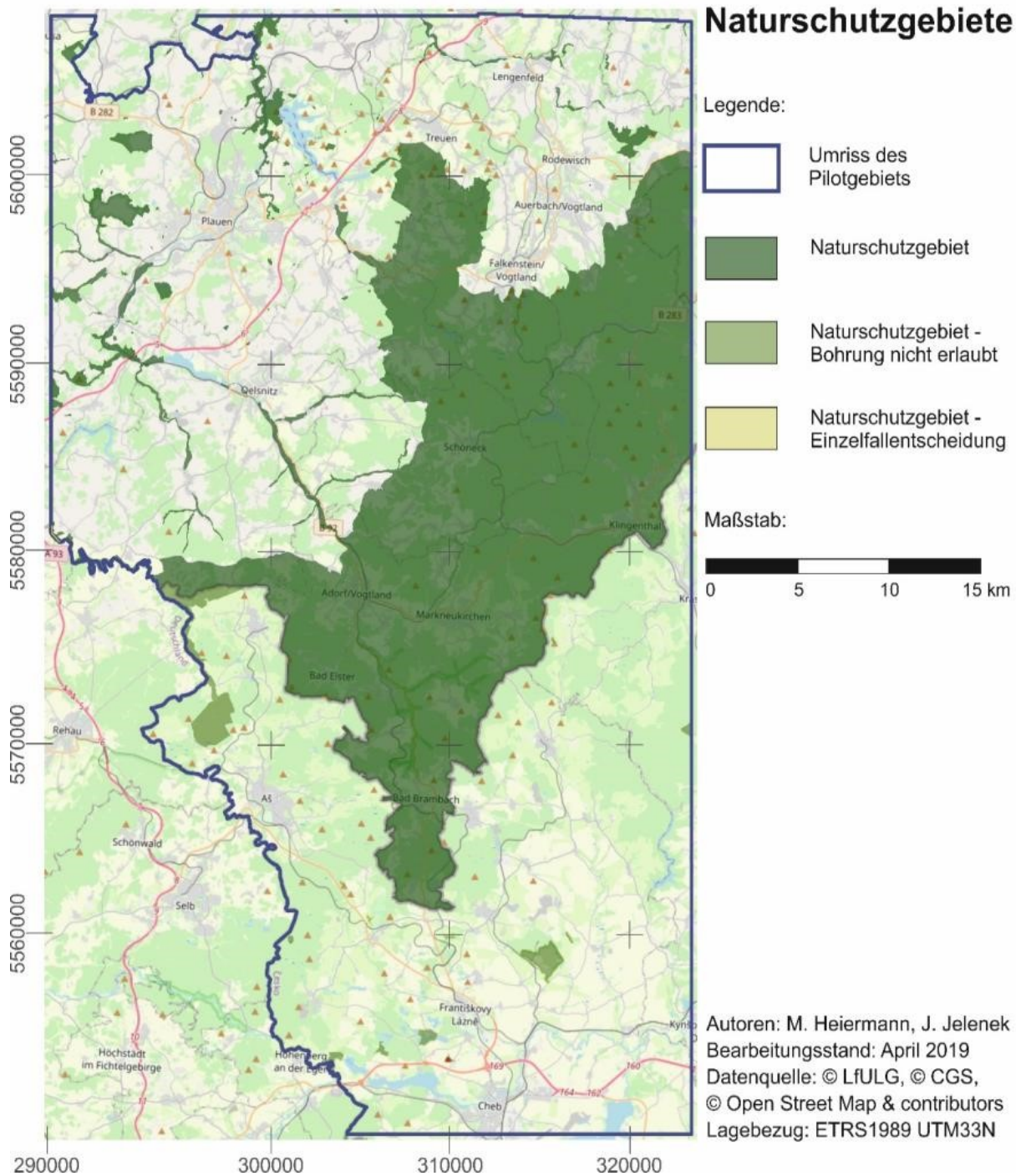


Abbildung 20: Naturschutzgebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

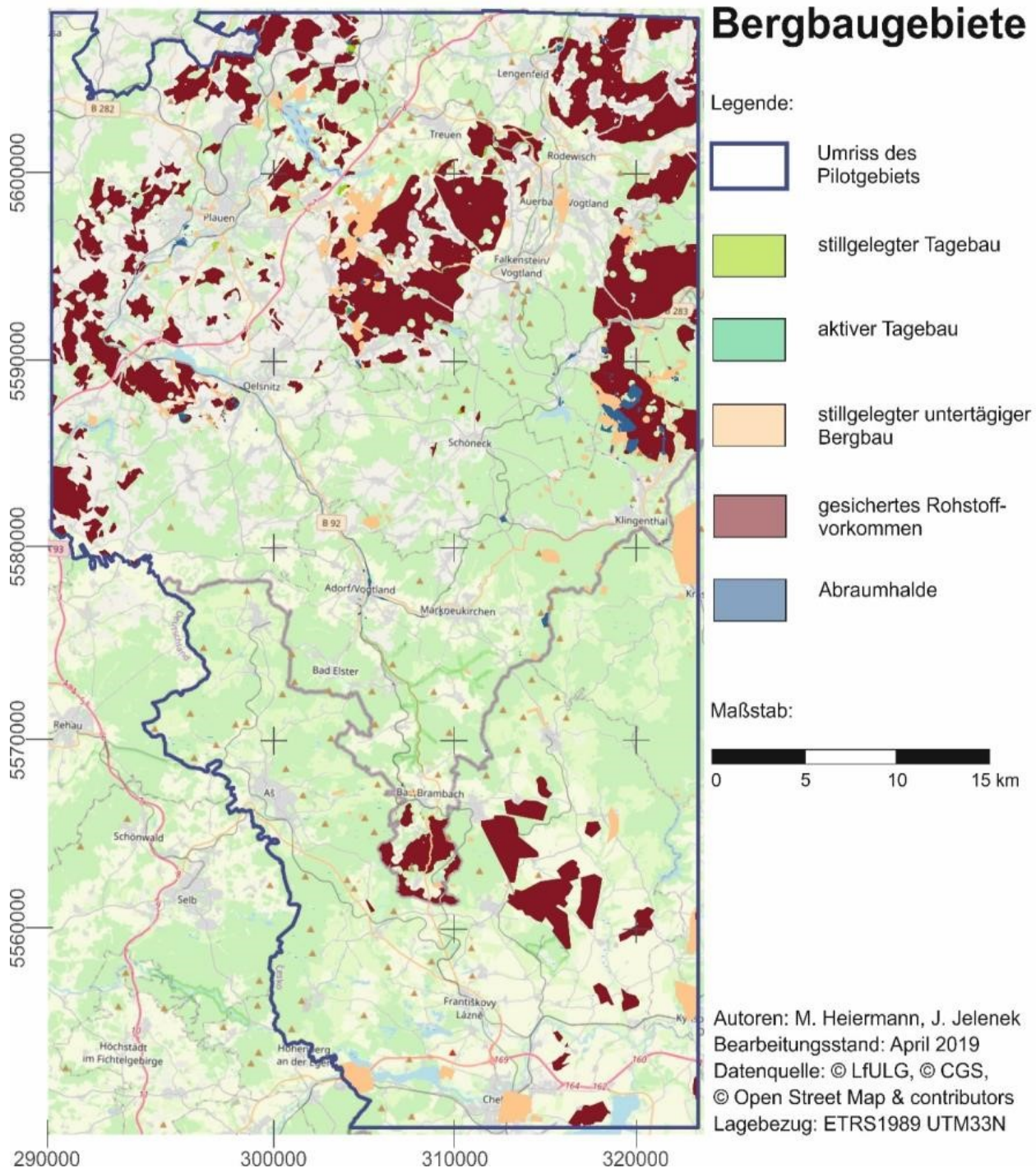


Abbildung 21: Bergbauegebiete im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

Altlasten und Aufschüttungen

Legende:

-  Umriss des Pilotgebiets
-  Auffüllungen, Halden, andere anthropogene Ablagerungen

Maßstab:



Autoren: M. Heiermann, J. Jelenek
Bearbeitungsstand: April 2019
Datenquelle: © LfULG, © CGS,
© Open Street Map & contributors
Lagebezug: ETRS1989 UTM33N

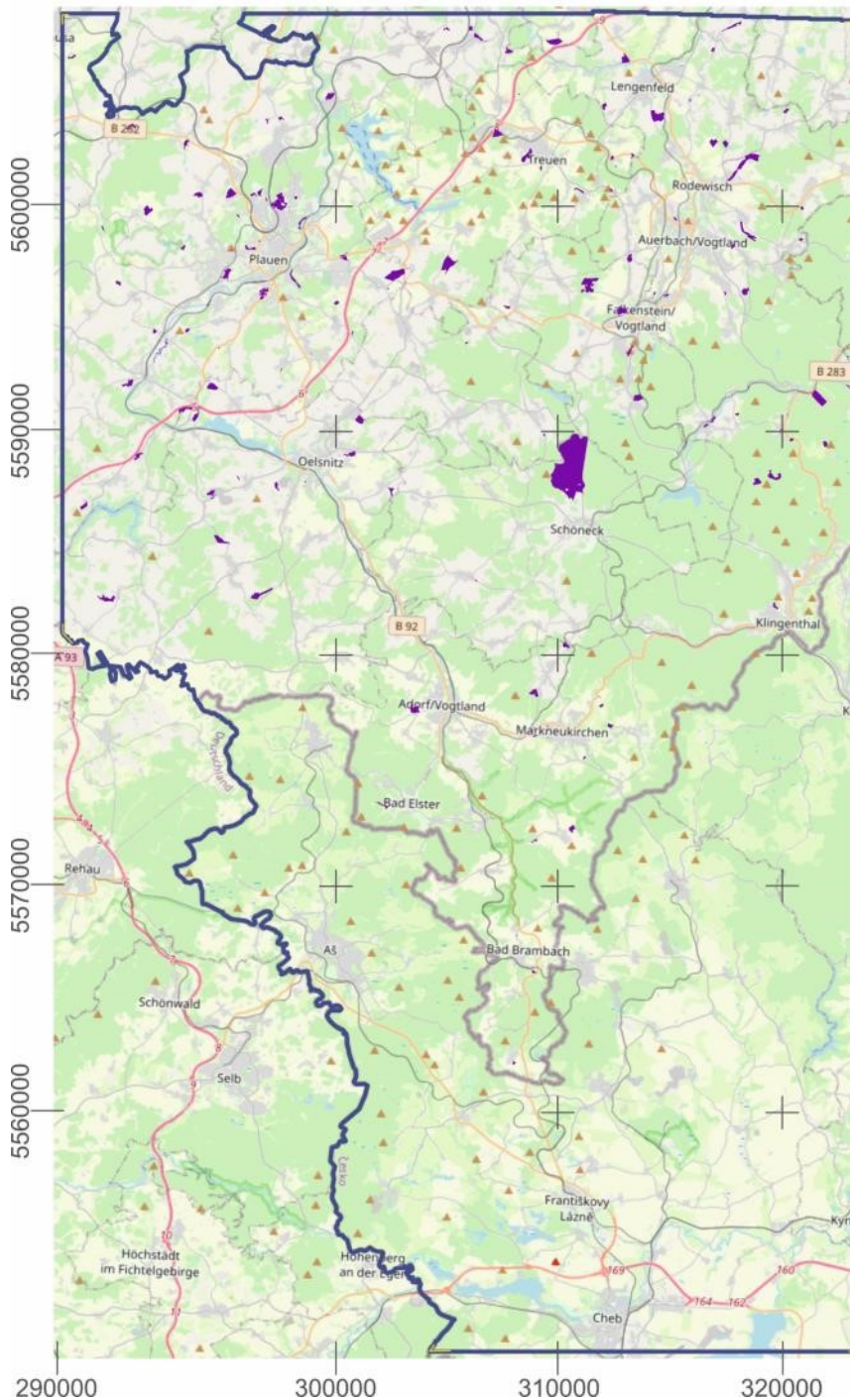


Abbildung 22: Altlasten und Aufschüttungen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

Tektonik / Störungen

Legende:

-  Umriss des Pilotgebiets
-  Störung
-  Nebenstörung
-  Hauptstörung

Maßstab:



Autoren: I. Görz, J. Franěk
Bearbeitungsstand: April 2019
Datenquelle: © LfULG, © CGS,
© Open Street Map & contributors
Lagebezug: ETRS1989 UTM33N

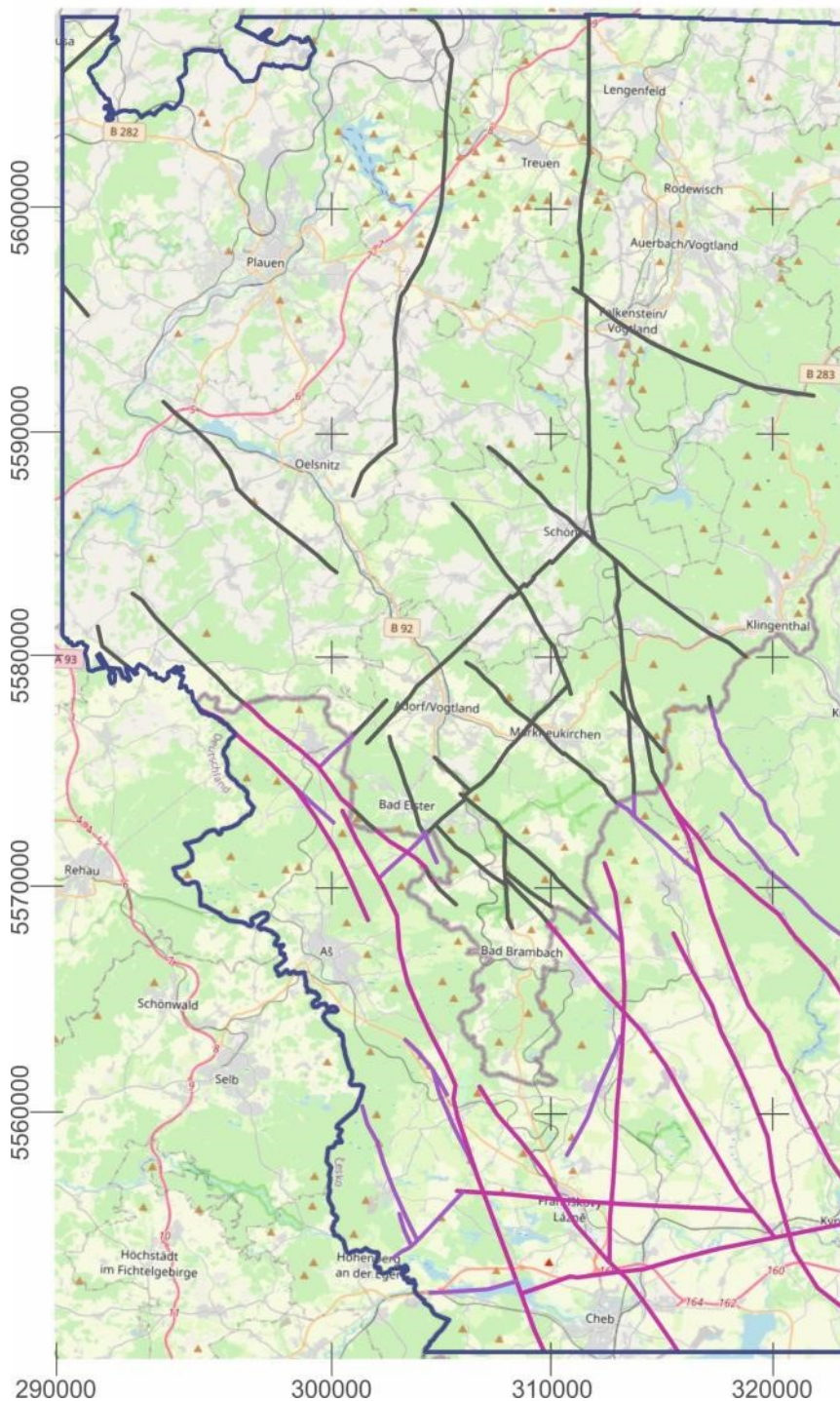


Abbildung 23: Tektonik und Störungszonen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

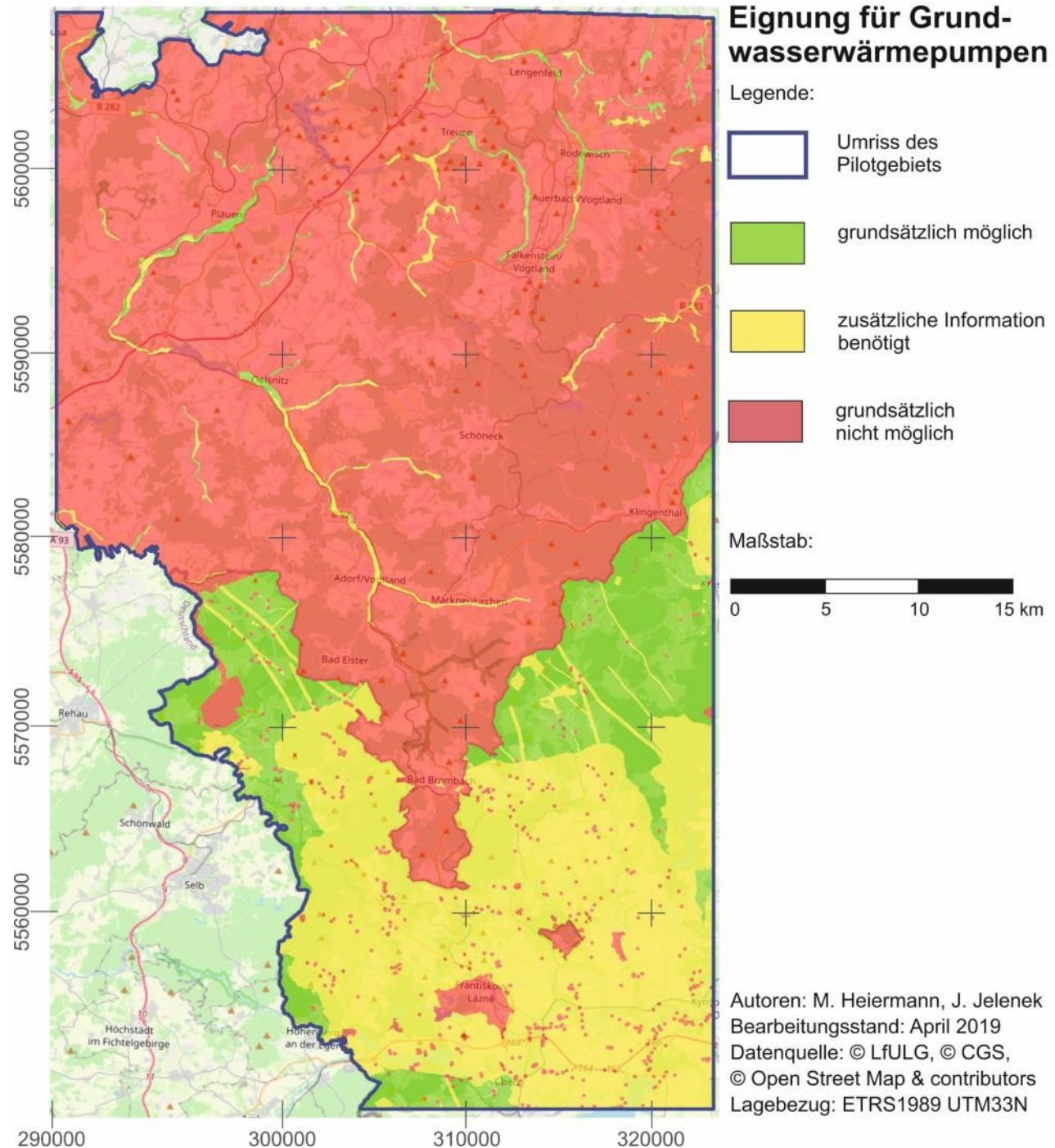


Abbildung 24: Eignung für Grundwasserwärmepumpen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zu Landnutzungskonflikten und Risiken oberflächennaher Geothermie

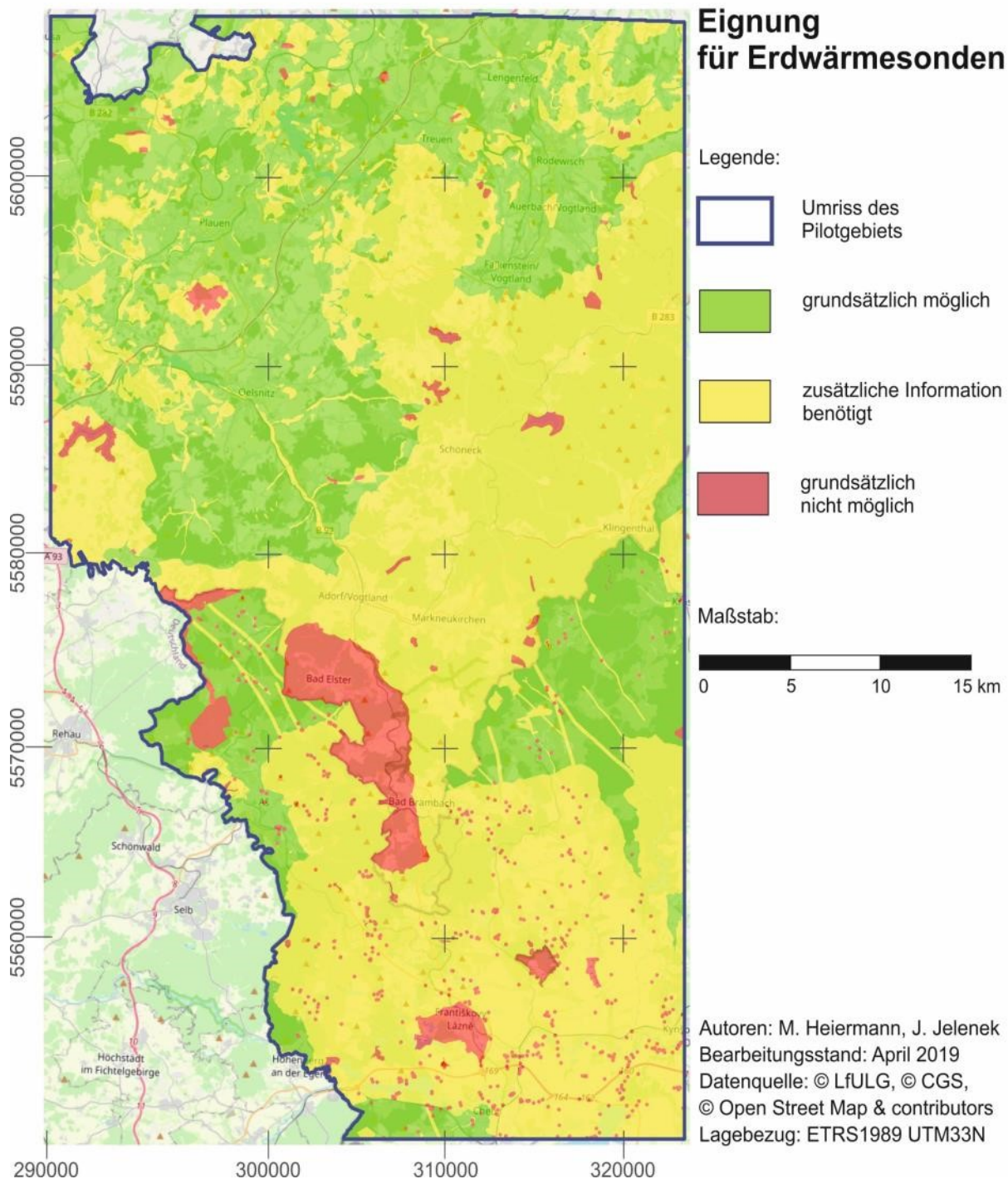


Abbildung 25: Eignung für Erdwärmesonden im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

Thematische Karte zum Potential des Untergrunds für oberflächennahe Geothermie

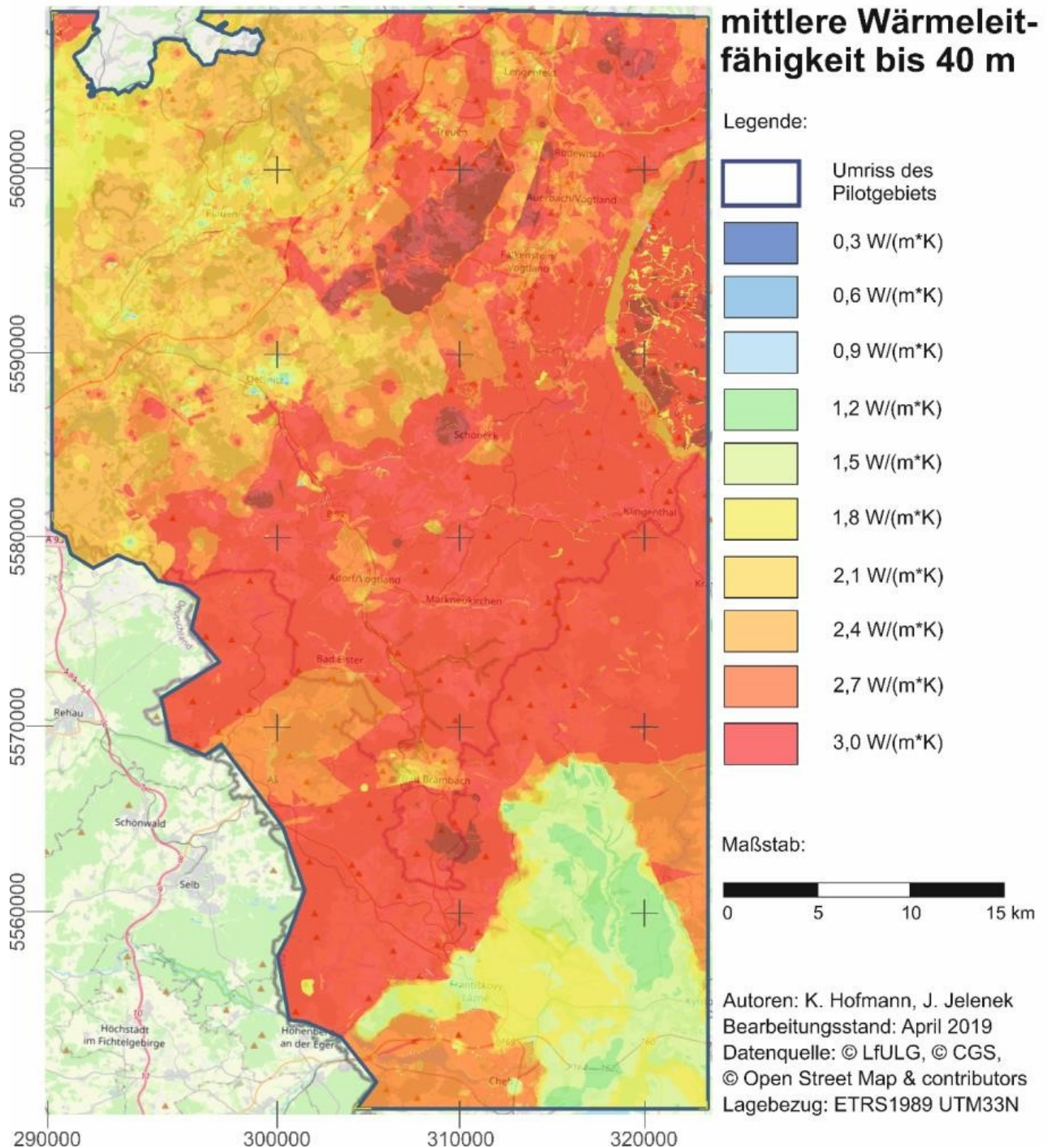
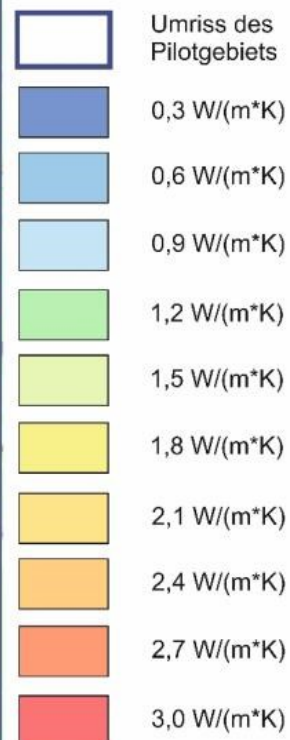


Abbildung 26: Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 40 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/ W-Böhmen.

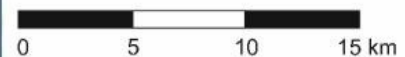
Thematische Karte zum Potential des Untergrunds für oberflächennahe Geothermie

**mittlere Wärmeleit-
fähigkeit bis 70 m**

Legende:



Maßstab:



Autoren: K. Hofmann, J. Jelenek
Bearbeitungsstand: April 2019
Datenquelle: © LfULG, © CGS,
© Open Street Map & contributors
Lagebezug: ETRS1989 UTM33N

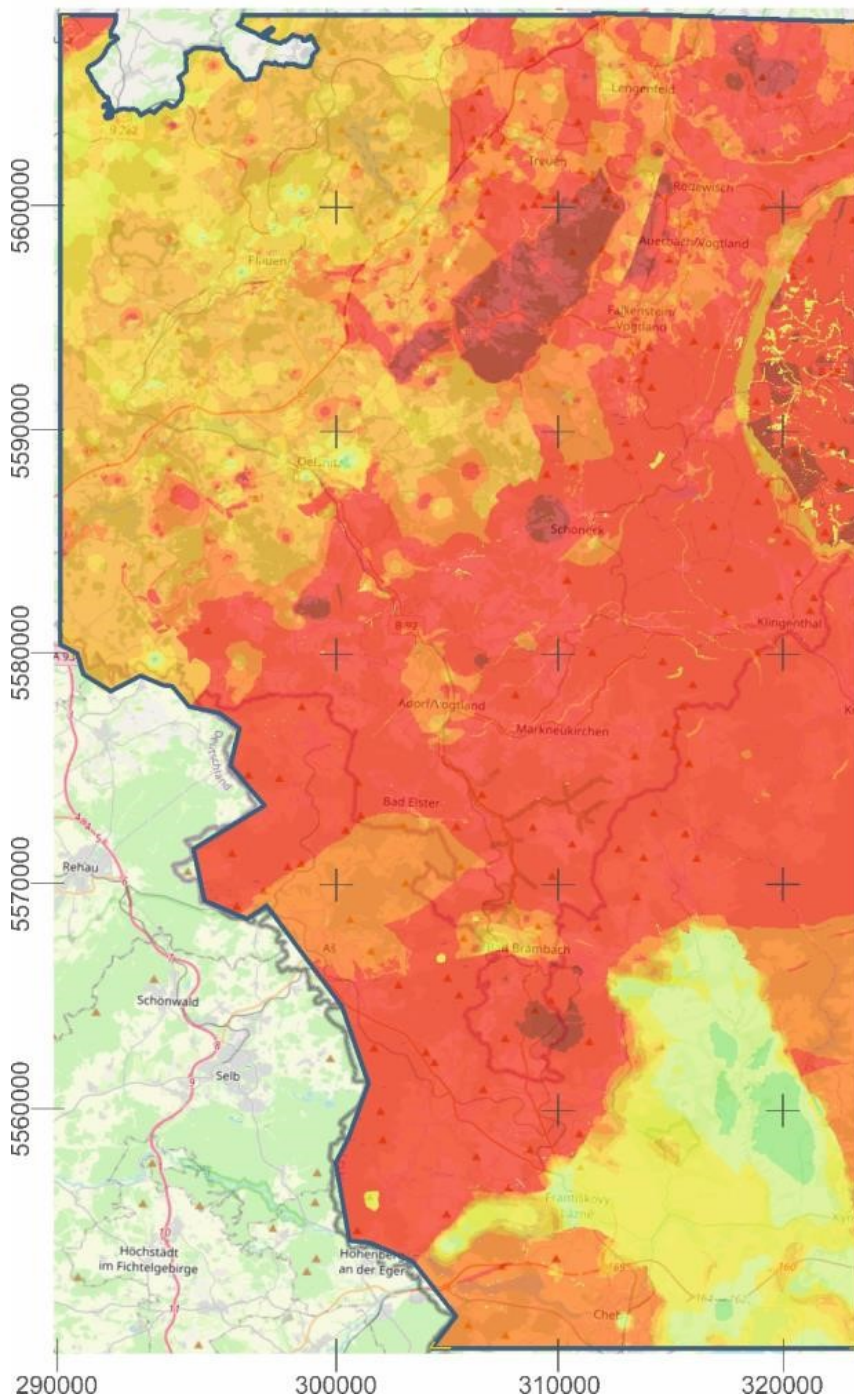


Abbildung 27: Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 70 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/ W-Böhmen.

Thematische Karte zum Potential des Untergrunds für oberflächennahe Geothermie

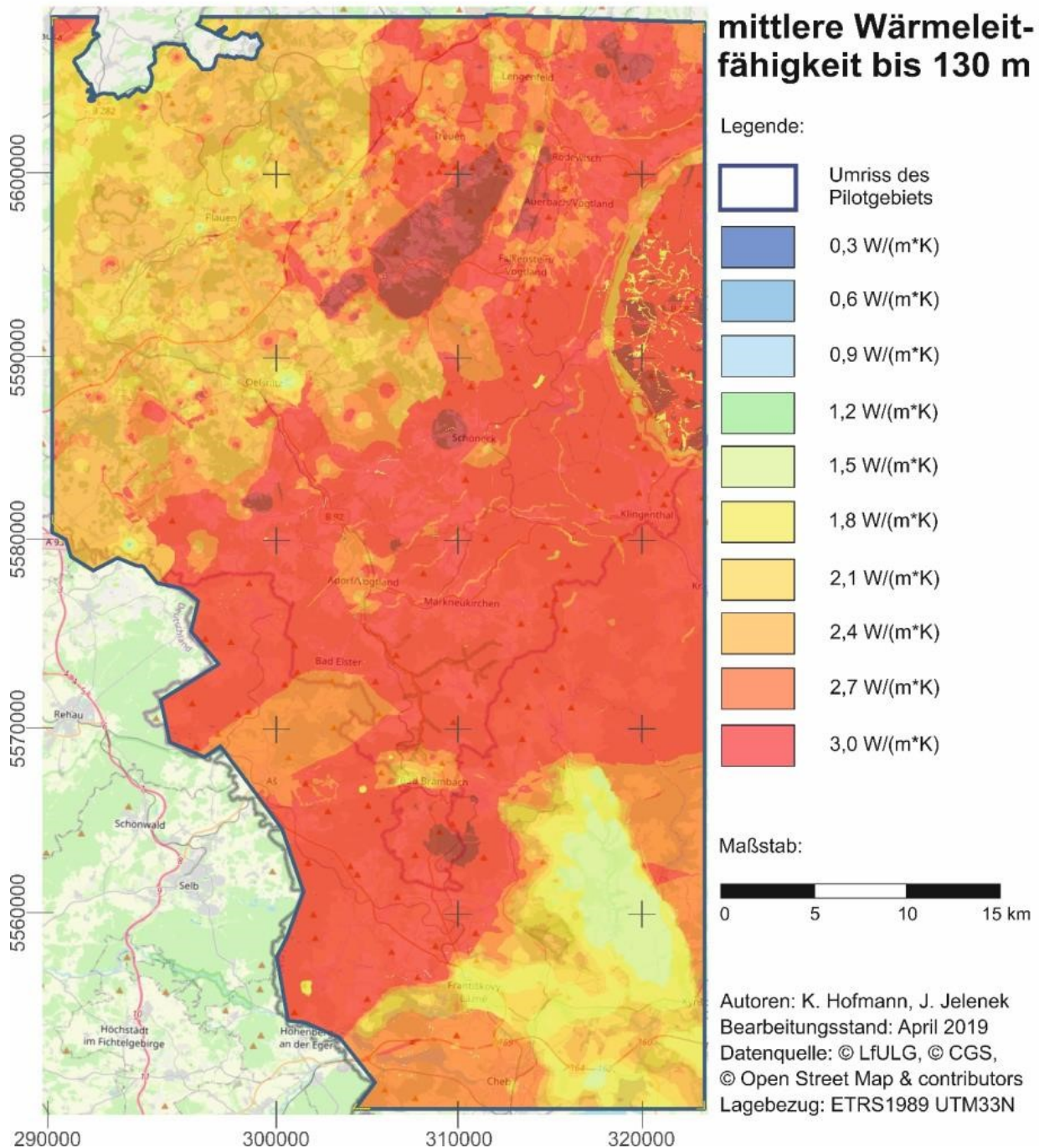


Abbildung 28: Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Intervall bis 130 m Tiefe im Pilotgebiet Vogtland/ W-Böhmen.

Thematische Karte zum Potential des Untergrunds für oberflächennahe Geothermie

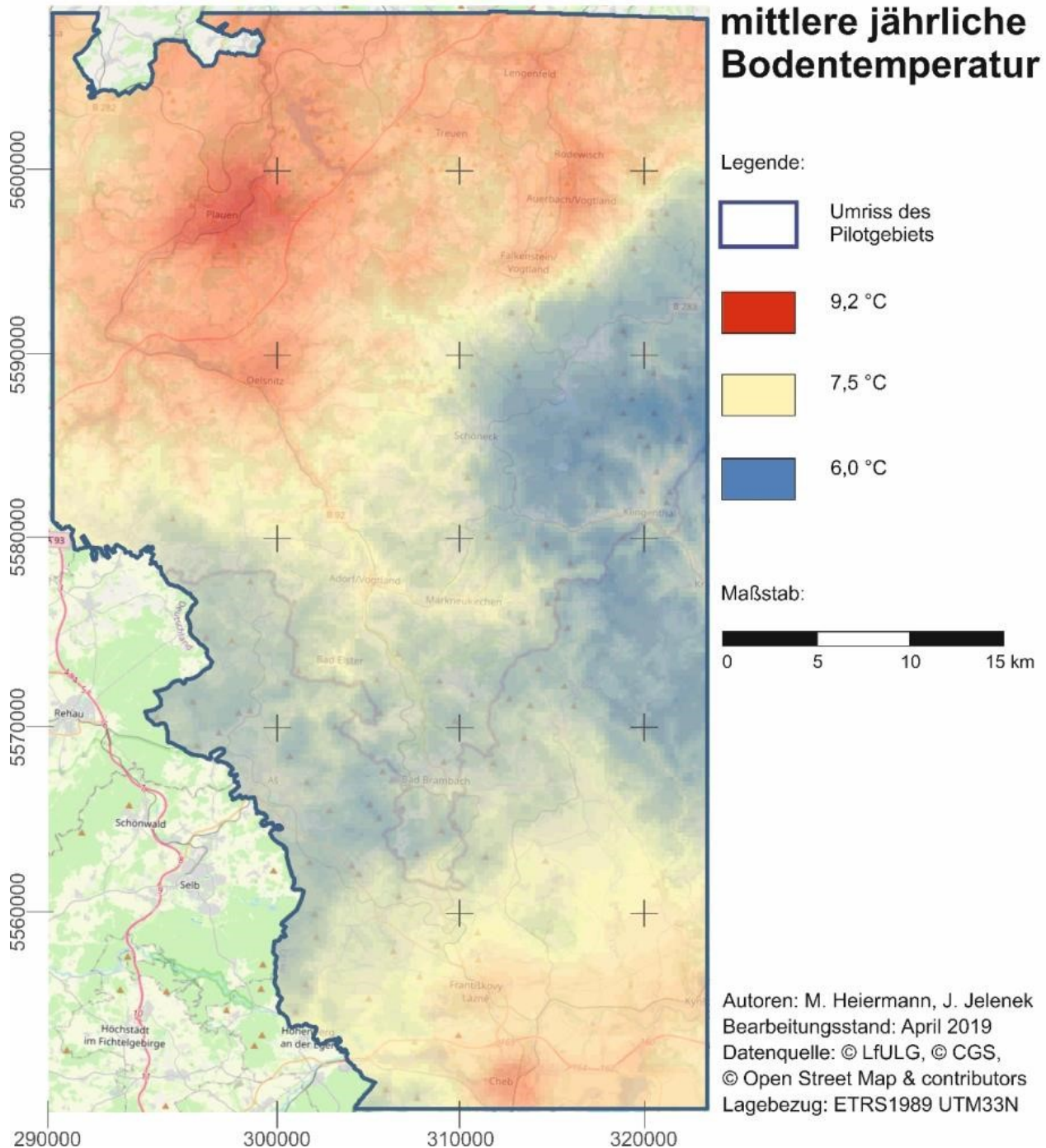


Abbildung 29: Mittlere jährliche Bodentemperatur im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen.

5 Das Web-Portal

5.1 Zweck und Aufbau des Web-Portals

Das Web-Portal dient dazu, charakteristische Kennzahlen über das Potenzial oberflächennaher Erdwärmearanlagen und über Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren in den sechs Pilotgebieten zu präsentieren und interaktiv abfragbar zu machen. Man findet das Web-Portal des GeoPLASMA-CE-Projekts unter dem Link: <https://portal.geoplasma-ce.eu/>. Es ist frei verfügbar und kann um andere Regionen in Zentraleuropa erweitert werden. Zusätzlich soll es dem Wissensaustausch zwischen Experten und der interessierten Öffentlichkeit dienen. Das Web-Portal ist mehrsprachig aufgebaut. Die Texte sind in Englisch und den Nationalsprachen der Pilotgebiete verfasst.

Das Web-Portal richtet sich an:

- Behörden, welche oberflächennahe geothermische Systeme managen müssen,
- Raumplaner,
- Energieplaner,
- Politiker und Entscheidungsträger,
- Bohrfirmen und Heizungsinstallateure,
- Investoren,
- Interessierte Privatpersonen.

Das GeoPLASMA-CE Web-Portal besteht aus drei Teilen: der Startseite, der Wissensplattform und dem Web-GIS (Abbildung 31).

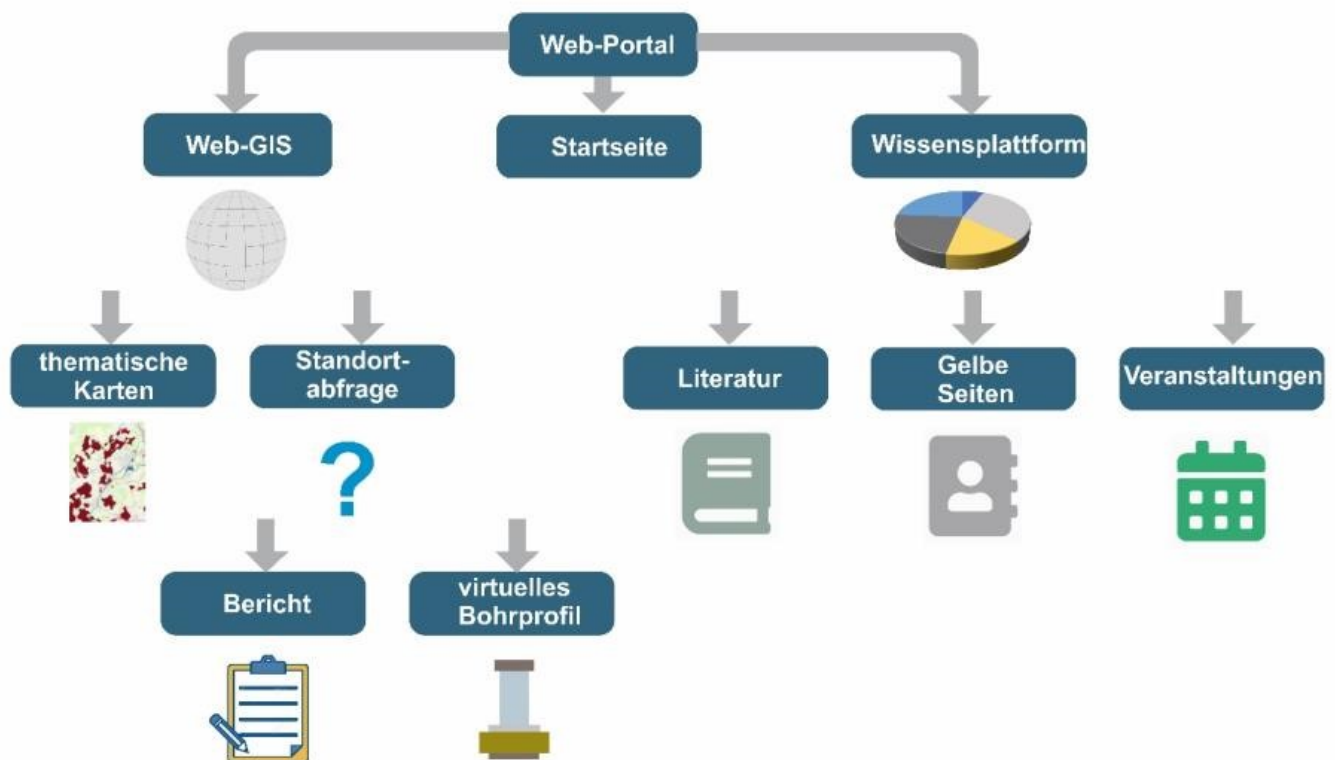


Abbildung 30: Struktur des Web-Portals.

5.2 Die Startseite

Auf der Startseite werden grundsätzliche Informationen zum Thema oberflächennaher Erdwärme angeboten, sodass auch Nutzer ohne Vorkenntnisse die im Web-GIS dargestellten Fachinhalte verstehen können (Abbildung 32). Außerdem können einige im Rahmen des Projekts erstellte Berichte heruntergeladen und Fallbeispiele von bereits existierenden Erdwärmeanlagen in den Pilotgebieten angesehen werden.

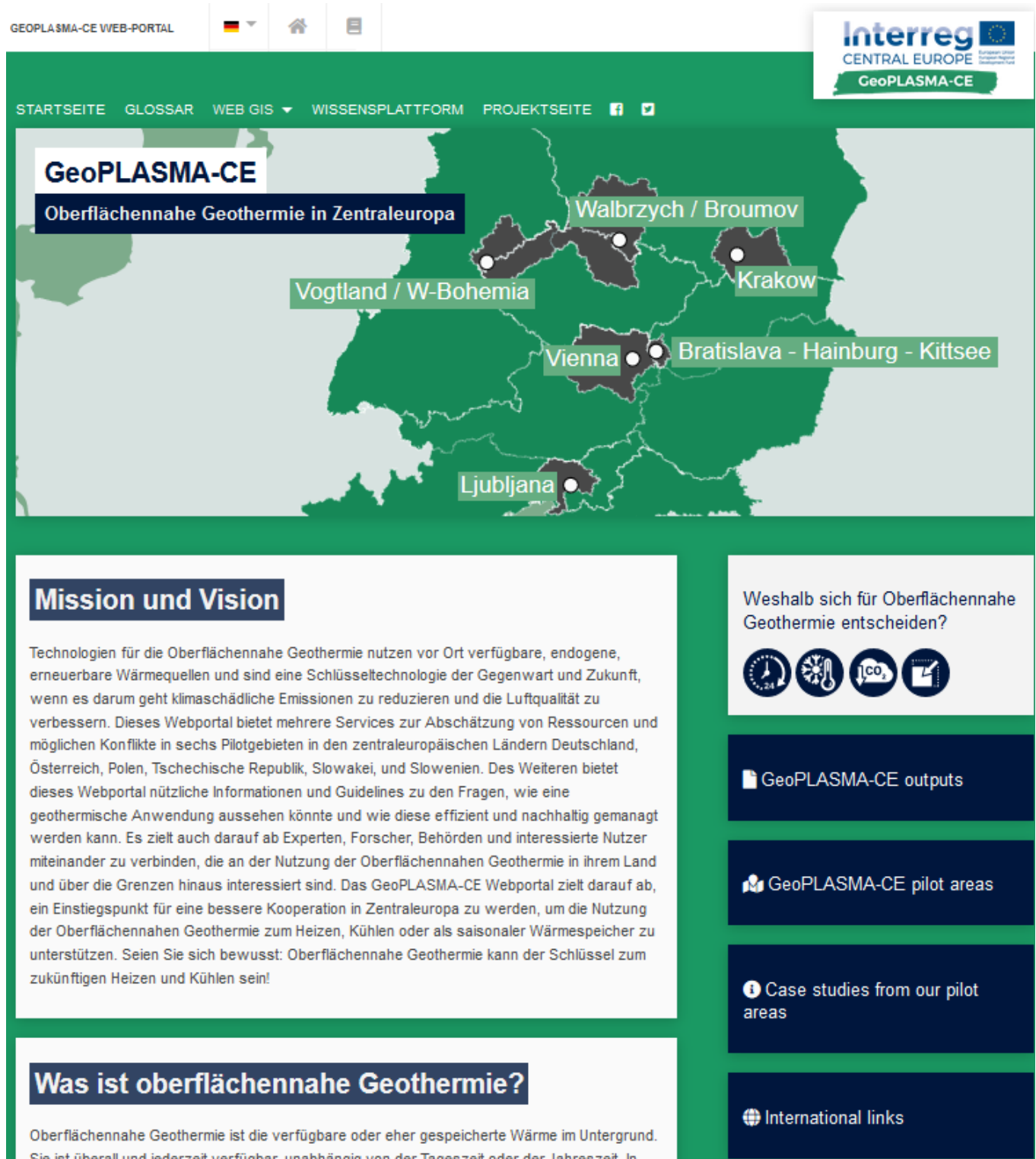


Abbildung 31: Screenshot der Startseite des Web-Portals.

5.3 Die Wissensplattform

Die Wissensplattform besteht aus drei Teilen:

- Literaturportal,
- Gelbe Seiten,
- Veranstaltungen.

Das Literaturportal umfasst Links zu technischen Berichten, Publikationen und Richtlinien zum Thema oberflächennahe Geothermie. Auf den Gelben Seiten findet man Kontakte zu nationalen und internationalen Experten, zu Planungsbüros, Installateuren und Behörden. Veranstaltungen aus ganz Europa, die sich mit dem Thema oberflächennaher Erdwärme beschäftigen, werden im Veranstaltungsportal aufgelistet.

5.4 Das Web-GIS

Das Web-GIS hat ein einheitliches Layout und eine einheitliche Struktur, ist aber in die sechs Pilotgebiete untergliedert, für welche unterschiedliche Layer und Features angeboten werden. Das Web-GIS stellt für jedes Pilotgebiet ein Set interaktiver thematische Karten zum Thema „Nutzung oberflächennaher Geothermie“ sowie ein Tool zur Standortabfrage bereit (Abbildungen 33 und 34).

Als erste und grundlegende Information sieht man Ampelkarten, die anzeigen, ob eine Nutzung oberflächennaher Erdwärme prinzipiell möglich oder verboten ist bzw. einer Einzelfallentscheidung bedarf. Verschiedene Potenzialkarten veranschaulichen, wie groß das geothermische Potenzial in verschiedenen Tiefen ist. Hat ein Standort ein geringes Potenzial, kann das beispielsweise kompensiert werden indem man die Bohrlochtiefe vergrößert oder eine zusätzliche Bohrung niederbringt. Die Karten bieten somit eine erste Orientierung wie viele Bohrungen man an einem bestimmten Ort in welcher Tiefe schätzungsweise benötigt, um eine bestimmte Heizleistung zu erhalten. Sie dürfen aber nicht als Planungsgrundlage für die Dimensionierung einer konkreten Anlage genutzt werden, da auch technische Aspekte der Anlage und die benötigte Heizleistung zu berücksichtigen sind. Weitere thematische Karten zeigen mögliche Landnutzungskonflikte, die zu berücksichtigen sind.

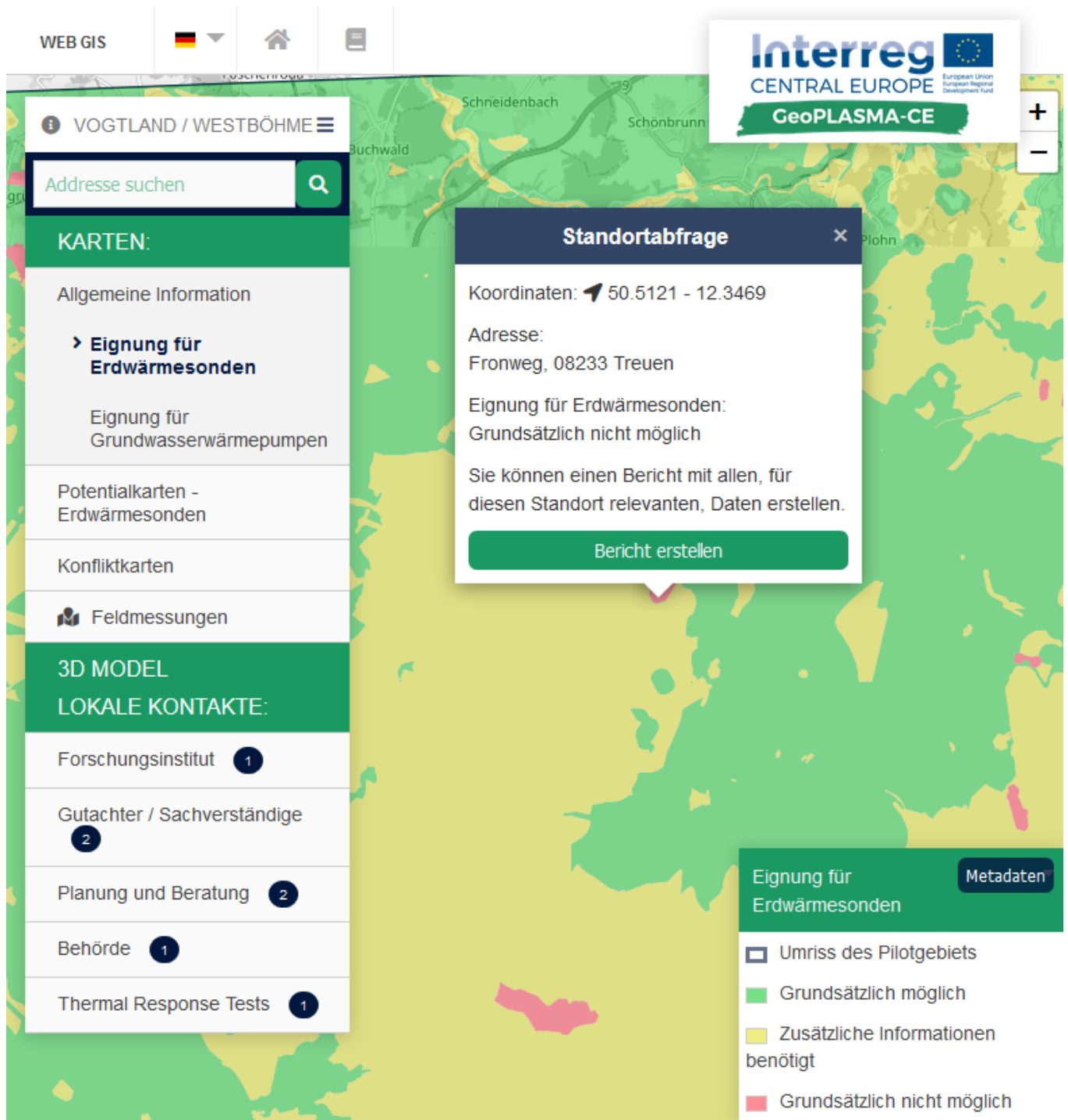


Abbildung 32: Thematische Karte im Web-Portal mit Legende.

Um die Standortabfrage zu nutzen, klickt man entweder mit der Maus in der Karte an eine bestimmte Stelle oder tippt eine gewünschte Adresse ein. Das Web-Portal gibt dann einen Überblick über das geothermische Potenzial, mögliche Gefahren und Konflikte sowie über den Aufbau des geologischen Untergrunds bis in 200 m Tiefe. Um die Abfrageergebnisse richtig zu interpretieren, muss berücksichtigt werden, dass die Datengrundlage im Maßstab 1: 50.000 erarbeitet wurde und nicht punktgenau ist. Außerdem kann das geologische 3D-Modell im Web-Browser aufgerufen und angesehen werden. Profilschnitte und virtuelle Bohrungen können abgerufen werden.

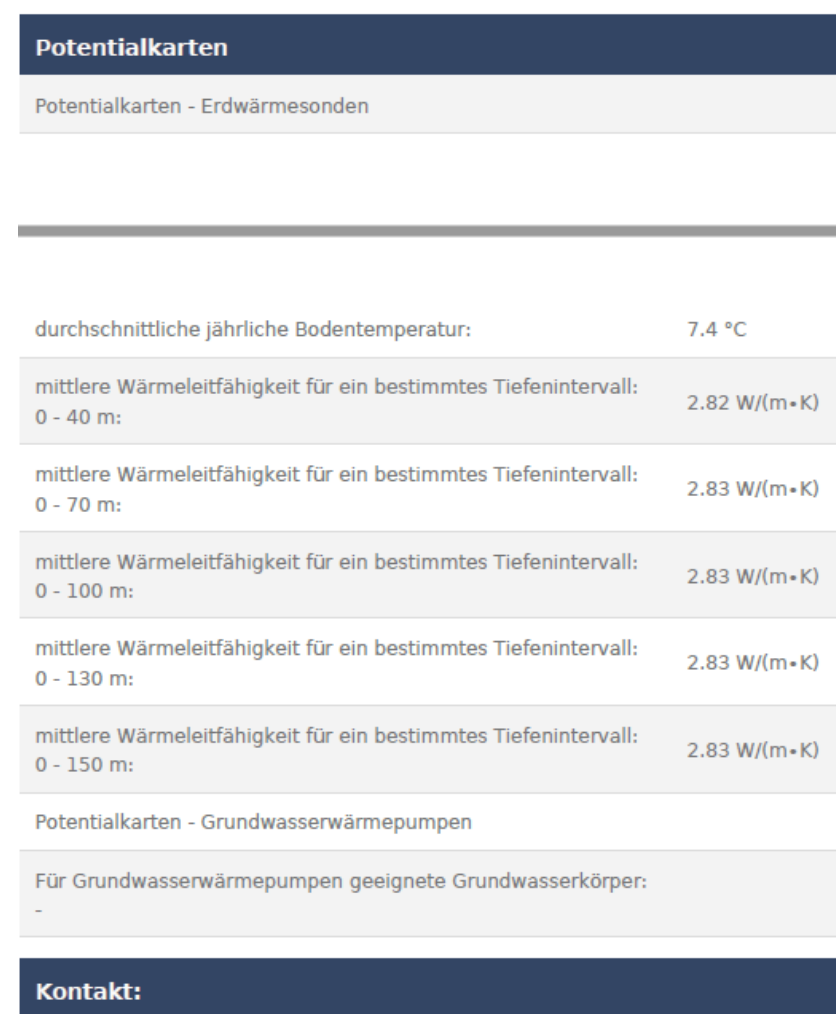
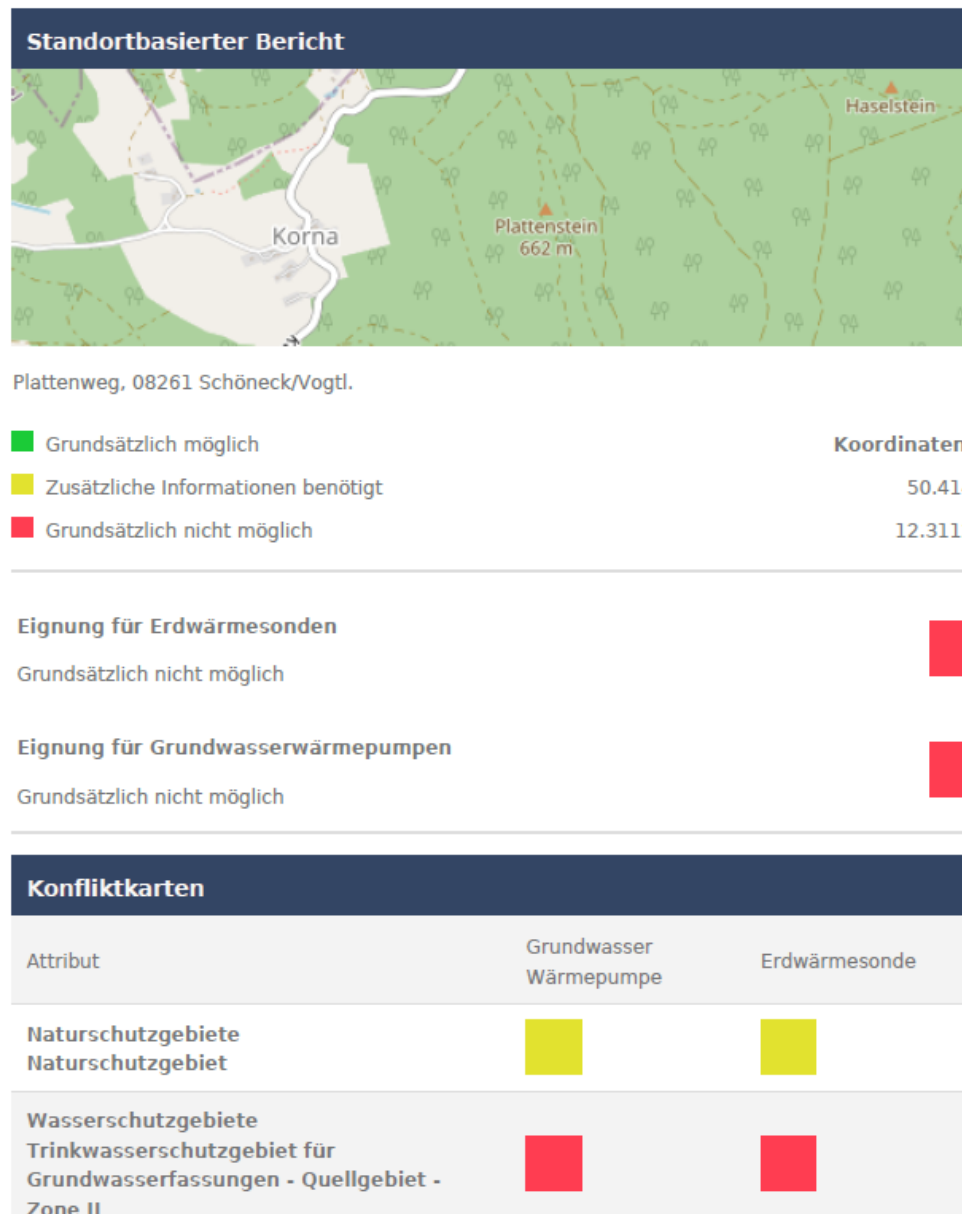


Abbildung 33: Bericht zur Standortabfrage.

6 Zusammenfassung

Eine sorgfältige Bewirtschaftung der klimafreundlichen und regenerierbaren Energieform Erdwärme ermöglicht, diese nachhaltig und effizient zu nutzen und stellt sicher, dass ihr Potenzial voll ausgeschöpft werden kann. Dafür müssen der gesetzliche Rahmen und die fachlichen Voraussetzungen geschaffen werden. Die fachlichen Voraussetzungen schließen ein fundiertes Wissen über das geothermische Potenzial sowie dessen gute Verfügbarkeit ein. Außerdem umfassen sie Qualitätsstandards für die Implementierung von Erdwärmeanlagen, das Monitoring von Bestandsanlagen sowie gut geschultes Personal. Im Projekt GeoPLASMA-CE arbeiteten elf europäische Partner aus dem Bereich der Geowissenschaften zusammen an Methoden und Konzepten, die eine optimale Nutzung der oberflächennahen Erdwärme länderübergreifend sicherstellen sollen. Sie vereinte das Ziel, die erneuerbare Ressource Erdwärme zum Heizen und Kühlen von Gebäuden stärker zu etablieren.

Eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz der Geothermie ist es, Schadensfälle zu vermeiden. Hier hat das Projekt GeoPLASMA-CE Grundlagen für die Bewertung und Zusammenstellung von Nutzungskonflikten geschaffen. Dazu wurden im Projekt die Kenntnisse, Erfahrungen und bisher angewandte Technologien der Projektpartner zusammenfassend bewertet und zu neuen harmonisierten Methoden weiterentwickelt. Außerdem wurden die Arbeitsabläufe zur 3D-Modellierung, zur Darstellung von geothermischen Potenzialen und Landnutzungskonflikten harmonisiert und standardisiert. Damit wurde ein wichtiger Schritt zur besseren Verständlichkeit bereitgestellter Informationen in der heterogenen Methoden- und Visualisierungslandschaft der oberflächennahen Geothermie getan.

Dem Projektteam wurde vom Fördermittelgeber Interreg Central Europe ein „External Evaluation and Advisory Board - EEAB“ aus internationalen Experten der geowissenschaftlichen und geothermischen Branche zur Seite gestellt. Die entwickelten harmonisierten Methoden wurden diesem Expertengremium während des Projekts fortlaufend vorgestellt und mit ihnen diskutiert. Nachdem die Methoden in den unterschiedlichen Pilotgebieten getestet waren, wurden die einzelnen Arbeitsschritte evaluiert und einen methodischeren Leitfaden für die Berechnung und Darstellung geologischer und geothermischer Sachverhalte inklusive potenzieller Nutzungskonflikte herausgegeben.

Die entwickelten harmonisierten Methoden bieten die Möglichkeit, einen grenzüberschreitenden Überblick über das geothermische Potenzial und Nutzungskonflikte zu erarbeiten. Vor allem geologische Dienste können die neu entwickelten und international abgestimmten Methoden als Grundlage nutzen, um eigene Informationsportale zu erstellen bzw. bestehende geothermische Informationssysteme zu aktualisieren. Die Karten dienen dazu, um die Eignung geothermischer Systeme darzustellen und das geothermische Potenzial abzuschätzen.

Obwohl die Technologie der Erdwärmenutzung nicht neu ist, muss sie noch in die rechtlichen Rahmenbedingungen und Energiemanagementkonzepte vieler Länder und Regionen integriert werden. Die erarbeiteten Standards und Empfehlungen für eine nachhaltige und umweltschonende Nutzung von Erdwärme können Entscheidungsträgern in Ministerien und lokalen Behörden dienen, um Erdwärmennutzungen erfolgreich zu verwalten und zu regulieren.

Die umfangreichen Ergebnisse des Projekts sowie der Erfahrungsaustausch mit den Projektpartnern und den lokalen Behörden in den Pilotgebieten bildeten die Grundlage, Mindestanforderungen bei der Planung, Errichtung und dem Monitoring von Erdwärmeanlagen länderübergreifend zu erarbeiten. Der Bericht „Erfolgsfaktoren für ein nachhaltiges Management oberflächennaher Erdwärme“ (Tabelle 1) fasst die aktuellen Richtlinien, Qualitätsstandards und angewandten Methoden im Bereich der oberflächennahen Erdwärme zusammen. Er wendet sich an alle mitteleuropäischen Regionen und dient dem Wissenstransfer. Darin enthalten sind auch Bewertungsbögen, die dazu dienen bestehende Systeme und die regionale Situation für oberflächennahe geothermische Systeme zu beurteilen und zu evaluieren.

Qualitätsstandards müssen die Sicherheit, Nachhaltigkeit und Effizienz einer Erdwärmeanlage während ihrer gesamten Lebensphase gewährleisten. Ein im Projekt entwickelter Ansatz für ein integriertes Managementkonzept berücksichtigt alle Installationen und deren kollektiven Einfluss auf den Untergrund. Das Handbuch zur Implementierung der Erdwärmenutzung in einzelnen Regionen stellt all diese Fakten zusammen. Das „Handbuch für eine erfolgreiche Implementierung oberflächennaher Erdwärme“ (Tabelle 1) richtet sich an Entscheidungsträger, Behörden und Experten und bietet eine Übersicht von Aspekten, die für eine erfolgreiche Regulierung und Verwaltung der Erdwärme während ihres gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen sind. Es enthält Richtlinien und die wichtigsten technischen Anforderungen für Erdwärmesondensysteme und Grundwasserwärmepumpen.

Im Rahmen des Projekts wurden weiterhin regionale Strategien erarbeitet, welche die Förderung der oberflächennahen Erdwärme und daraus resultierend eine Erhöhung ihres Marktanteils in den einzelnen Pilotgebieten zum Ziel haben. Für das Vogtland ist diese Strategie in Form eines Maßnahmenkatalogs konkretisiert. Mit dem „Maßnahmenkatalog zur Förderung Oberflächennaher Geothermie im Vogtland“ (Tabelle 1) sollen Wege zum Erreichen der im Klimaschutzteilkonzept Erneuerbare Energien Vogtlandkreis festgelegten Ziele aufgezeigt werden. Der Maßnahmenkatalog ist vorrangig an Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Vogtlandkreises und seiner Kommunen gerichtet, welche aufgrund ihrer Funktion mit Belangen umweltfreundlicher Wärmebereitstellung in Berührung kommen, z. B. als Energiebeauftragter, Bauleitplaner oder Mitarbeiter der unteren Wasserbehörden und in der Lage sind, einzelne Maßnahmen in die Realität umzusetzen (Tabelle 1).

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden auf internationalen, nationalen und regionalen Veranstaltungen verschiedenen Interessenträgern öffentlichkeitswirksam vorgestellt. Aus diesen Veranstaltungen entwickelte sich darauf in der Region Vogtland die Idee, regelmäßige Workshops zum Thema Erdwärme für verschiedene Nutzer wie z.B. Bürger, Heizungsinstallateure, Bohrfirmen, Planer und Behörden individuell durchzuführen. Somit können auch weiterhin die Projektergebnisse zielgerichtet verbreitet und weiterentwickelt werden.

7 Referenzen

- ESRI (2018a): ArcGlobe 10.5.1 Software, Hintergrundkarte.
- ESRI (2018b): ArcMap 10.5.1 Software, Hintergrundkarte.
- Geodati (2018): <http://www.geodati.fmach.it/eurolst.html>.
- GeoSN (2016): Geoportal Sachsenatlas. geoportal.sachsen.de.
- GiGa infosystems (2020): Firmen-Web-Seite. <https://giga-infosystems.com/products>.
- LfULG (1995): Geologische Karte Erzgebirge/Vogtland im Maßstab 1:50.000. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- LfULG (2014): Geothermieatlas Sachsen: Allgemeine Erläuterungen zum Kartenwerk der geothermischen Entzugsleistungen im Maßstab 1:50.000 GTK 50. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, https://www.geologie.sachsen.de/download/Erlaeuterungen_Geothermieatlas.pdf.
- LfULG (2018): interne Landesdatenbank geologischer Aufschlüsse.
- LfULG (2020): Geothermieatlas Sachsen - Karten des oberflächennahen geothermischen Potenzials. Interaktive Karte, <https://www.geologie.sachsen.de/geothermische-karte-13914.html>, Stand Juni 2020.
- HELLSTRÖM G. und SANNER B. (1994): Software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction. Beitrag zur Konferenz „Calorstock 1994“, Espoo/ Helsinki, Finland, 8 pages.
- HGC Hydro-geo-Consult GmbH (2017) ArcGIS-Erweiterung zur Berechnung der Informationsebene Geothermie für ArcGIS 10.5, Version 10.5 Build 6530, Halsbrücke.
- KRONER U., ROMER R.L., LINNEMANN U. (2010): The Saxo-Thuringian Zone of the Variscan Orogen as part of Pangea. In Linnemann U., Romer R.L. (eds): Pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia – From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen. Schweizerbart, Stuttgart, 3-16.
- KVIČINSKÝ Z.; 1988; Geologická mapa ČSR. List 11-12 Kraslice; Ústřední ústav geologický, Praha.
- MLČOCH B., HRADECKÝ P., KOVANDA J.; 1991; Geologická mapa ČSR. List 11-13 Hazlov; Česká geologická služba, Praha.
- NASA (2018): MODIS Land Science Team, <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/>.
- REUSS M. (2015): The use of borehole thermal energy storage (BTES) systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems, Methods and Applications, 117-147.
- ŠANTRŮČEK P., KRÁLÍK F., KVIČINSKÝ Z.; 1991; Geologická mapa ČSR. List 11-14 Cheb; Česká geologická služba, Praha.
- ŠKVOR V., SATTRAN V. et al.; 1974; Krušné hory, západní část 1 : 50 000. Soubor oblastních geologických map. Ústřední ústav geologický, Praha.
- ŠKVOR V. & KOVANDA J.; 1986; Geologická mapa ČSR. List 11-11 Aš; Ústřední ústav geologický, Praha
- Statista (2019): Statistiken zur Geothermie, A. Breitkopf, <https://de.statista.com/themen/1237/geothermie/>.

Anhang

Tabelle A 1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt

Zielparameter	Einheit	Beschreibung
3D-Modell		
Top einer geologischen Einheit	m über Meeresspiegel	Die Grenze geologischer Einheiten wird durch die Oberseiten geologischer Körper beschrieben
allgemeine Information		
Eignung für Erdwärmesonden	1 - Erdwärmeanlage möglich, 2 - Achtung, weitere Informationen benötigt, 3 - Erdwärmeanlage verboten	Thematische Karte, mit Informationen zur Eignung von geschlossenen Systemen (Erdwärmesonden) an einem bestimmten Standort: grundsätzlich möglich, zusätzliche Informationen benötigt oder grundsätzlich nicht möglich.
Eignung für Grundwasserwärmepumpen	1 - Erdwärmeanlage möglich, 2 - Achtung, weitere Informationen benötigt, 3 - Erdwärmeanlage verboten	Thematische Karte, mit Informationen zur Eignung von offenen Systemen (Grundwasserwärmepumpen) an einem bestimmten Standort: grundsätzlich möglich, zusätzliche Informationen benötigt oder grundsätzlich nicht möglich.
Virtuelles Bohrlochprofil	m über Meeresspiegel	virtuelles (nichtexistierendes) Bohrloch an einem ausgewählten Standort, welches basierend auf einem geologischen 3D-Modell die obere Grenzfläche einer geologischen Einheit zeigt. Sie kann z. B. durch einen markanten Gesteinswechsel, eine Diskordanz oder eine Störung gekennzeichnet sein.
geothermisches Potenzial für Erdwärmesonden		
Mittlere Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	Die Wärmeleitfähigkeit ist das Vermögen des Gesteins, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren. Es wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit für ein spezifisches Tiefenintervall angezeigt, ohne Berücksichtigung advektiver Effekte (einschließlich ungesättigter Zone).
Oberflächentemperatur	°C	Mittlere jährliche Bodentemperatur. Im Rahmen des Projekts GeoPLASMA-CE wird darunter die durchschnittliche Bodentemperatur direkt unter der Erdoberfläche verstanden. Sie kann aus der mittleren Temperatur der bodennahen Luft, durch satellitengestützte Messungen oder durch direkte Messung der Bodentemperatur in geringer Tiefe (< 5 m unter GOK) ermittelt werden.
Untergrundtemperatur	°C	Die geschätzte Durchschnittstemperatur für ein festgelegtes Tiefenintervall im Untergrund an einer Erdwärmesonde.

Fortsetzung Tabelle A1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt

Zielparameter	Einheit	Beschreibung
geothermisches Potenzial für Grundwasserwärmepumpen		
Für Grundwasserwärmepumpen geeignete Grundwasserkörper	0-nicht vorhanden, 1-vorhanden	Verbreitung von Grundwasserleitern, die für die Nutzung durch offene Systeme geeignet sind. Geeigneter Grundwasserkörper für Grundwasserwärmepumpen.
Spezifische thermische Leistung bei Spitzenlast	W/m ²	Spezifische thermische Leistung einer oberflächennahen Erdwärmeanlage bei Spitzenlast.
Energieinhalt	kWh/a/m ²	Die jährliche Wärmemenge pro Quadratmeter, die einem Aquifer entzogen bzw. zugeführt werden kann. Der Energiegehalt setzt stationäre Verhältnisse voraus und berücksichtigt Bestandsanlagen.
Spezifische hydraulische Produktivität bei Spitzenlast	l/d/m ²	Maximale Menge von Grundwasser, die an einem Brunnen pro Zeiteinheit gefördert werden kann. Förderrate, die an einem bestimmten Standort für ein offenes System (eine thermische Grundwassernutzung) über einen bestimmten Zeitraum hinweg erreicht werden kann. Bei maximaler Auslastung ist die Förderate für kurze Zeitspannen signifikant höher als im durchschnittlichen Betrieb.
Thermische Produktivität	°C	Grundwassertemperaturen an einem bestimmten Datum. Die Grundwassertemperatur bestimmt neben der Wassermenge, den verfügbaren Energieinhalt zum Heizen und Kühlen für die thermische Grundwassernutzung.

Fortsetzung Tabelle A1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt

Zielparameter	Einheit	Beschreibung
Landnutzungskonflikte und Risikofaktoren		
Versorgungsleitungen	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - Elektrizität, 3 - Gas, 4 - Fernheizung, 5 - Wasser, 6 - Abwasser, 7 - Telekommunikation	Unterirdische Infrastruktur kann die Standortwahl von oberflächennahen Erdwärmeanlagen beeinflussen (z.B. Gas, Fernwärme, Abwasser, U-Bahn).
Bohrungen	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Standort einer existierenden Bohrung mit geologischen Informationen.
Wasserschutzgebiete	nicht harmonisierbar, unterschiedliche Kategorien je Pilotgebiet	Gebiet, in welchem zum Schutz von Gewässern (u.a. von Trink- oder Heilwasservorkommen) besondere Verbote und Handlungseinschränkungen gelten. In diesen Gebieten kann der Einsatz von Erdwärmeanlagen mit Auflagen belegt oder verboten werden. Wasserschutzgebiete dienen der Vermeidung negativer Einflüsse auf Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird. In einer Verordnung wird das jeweilige Schutzgebiet abgegrenzt und notwendige Schutzmaßnahmen festgelegt. Darunter fallen zum Beispiel Eingriffsverbote oder Bewilligungspflichten, die die Nutzung oberflächennaher Geothermie beeinflussen können. Es wird eine individuelle, länderspezifische Kategorisierung vorgenommen.
Naturschutzgebiete	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - Naturschutzgebiet, indem Bohrungen nicht erlaubt sind, 3 - Naturschutzgebiet, indem Einzelfallentscheidungen getroffen werden	Ein rechtsverbindlich festgesetztes Gebiet, in dem ein besonderer Schutz von Natur und Landschaft erforderlich ist, um Tier- und Pflanzenarten oder Naturdenkmäler zu erhalten. In Landschaftsschutzgebieten, Natura 2000 Schutzgebieten und in Nationalparks kann es zu Nutzungseinschränkungen der oberflächennahen Erdwärme kommen. In solchen Gebieten können Bohrungen nicht erlaubt sein, oder nur im Einzelfall unter Auflagen genehmigt werden.
Gespanntes oder artesisches Grundwasser	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Aquifer unter erhöhten Druckverhältnissen mit einer darüber liegenden undurchlässigen Schicht. Wenn in einen solchen Aquifer eine Bohrung abgeteuft wird, steigt der Wasserspiegel in der Bohrung. Auf Grund der Hydrogeologie des Untergrunds kann gespanntes oder artesisch gespanntes Grundwasser in einer Bohrung angetroffen werden. Im Fall "Artesischer Brunnen in der Nähe" befinden sich im Umkreis von 200 m Brunnen, in denen in einer Tiefe von 100 m bis 200 m artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen wurde.

Fortsetzung Tabelle A1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt

Zielparameter	Einheit	Beschreibung
Tektonik/Störungen	0 - nicht vorhanden, 1 - Störung, 2 - Nebenstörung 3 - Hauptstörung	Tektonisch verursachte strukturelle Veränderungen eines Gesteinsverbandes. Beim Bohrvorgang oder beim Verfüllen von Erdwärmesonden können geotechnische Probleme auftreten.
Bergbaugebiete	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - stillgelegter Tagebau, 3 - aktiver Tagebau, 4 - stillgelegter Tiefbau, 5 - aktiver Tiefbau, 6 - gesichertes Rohstoffvorkommen, 7 - Abraumhalde	Durch Bergbau verursachte Hohlräume im Untergrund, die während des Bohrens oder des Verfüllvorganges bei Erdwärmesonden zu Problemen führen können. In solchen Gebieten kann es zu Bohreinschränkungen oder Verboten kommen.
Erdbeben	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - Zone mit Erdbebenrisiko, 3 - Ablagerung eines Erdbebens	Erdbeben, die entstehen, wenn ein Hang von einem stabilen in einen instabilen Zustand übergeht. Sie können Schäden an oberflächennahen Erdwärmeeinrichtungen verursachen.
Natürliche Gasaustritte	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - CO ₂ , 3 - Radon, 4 - Methan	Oberflächennahe Gasvorkommen, die zu Ausgasungen während des Bohrvorganges führen können. Es besteht Explosionsgefahr (Methan), Vergiftung und Absenkungen im Bohrbereich. In Einzelfällen können gasführende Klüftzonen angetroffen werden.
Karstgebiete und Höhlen	0 - nicht vorhanden, 1 - Karst inklusive Höhlen	Durch Auflösung von Karbonat- oder Sulfatgesteinen entstandene Hohlräume im Untergrund. Karstgebiete stellen empfindliche Grundwassersysteme mit hohen Durchlässigkeitsbeiwerten dar und können technische Probleme während des Bohrvorganges verursachen (z. B. Spülungsverlust).
Hydraulisch getrennte Grundwasserstockwerke	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Zwei Grundwasserleiter, welche durch mindestens einen Grundwasserhemmer getrennt werden. Durchbohren des Grundwasserhemmers kann zu einem hydraulischen Kurzschluss der Grundwasserkörper führen und das Gesamtsystem beeinflussen (z.B. Veränderung des Grundwasserchemismus beider Aquifere).
Bestehende oberflächennahe Erdwärmeeinrichtungen	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Standort, an dem eine oberflächennahe Erdwärmeeinrichtung vorhanden ist, was zu gegenseitiger Beeinflussung führen kann.
Altlasten und Aufschüttungen	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - Verfüllung, 3 - Aufschüttung	Eine an Basis und Oberfläche abgedichtete bauliche Anlage für die langfristige Lagerung von Abfällen. Als Altlasten werden nur Altablagerungen (Deponien, Halden) dargestellt. Informationen zu kontaminierten Flächen (Altlasten) werden nicht dargestellt.

Fortsetzung Tabelle A1: Ziel- und Ergebnisparameter im GeoPLASMA-CE-Projekt

Zielparameter	Einheit	Beschreibung
Problematischer Grundwasserchemismus	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden, 2 - reduzierende Verhältnisse, 3 - Metallkorrosion, 4 - Krustenbildung (Fe, Mn)	Verbreitung von Grundwasserleitern mit chemischen Eigenschaften, die zu Problemen im Betrieb von oberflächennahen Erdwärmeanlagen führen können, sofern keine geeigneten Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Beispiele sind hoher Sauerstoffgehalt (Metallkorrosion), hoher Gehalt an Eisen oder Mangan (Verockerung) oder ein niedriger pH-Wert. Diese kann zu Metallkorrosionen der Wärmetauscher oder Brunnenrohre oder zu Ausfällungen in Brunnen führen.
Unterirdische Infrastruktur	0 - nicht vorhanden, 1 - unterirdische Bauwerke/Bunker	Anthropogen errichtete unterirdische Objekte, welche nicht durchbohrt werden dürfen.
Hochwasserrisiko	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Bestimmte Bereiche in Regionen, die saisonal überflutet werden können.
Entwicklungsplan, Regionalplan	0 - nicht vorhanden, 1 - vorhanden	Region, welche durch einen regionalen Entwicklungsplan betroffen ist.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 2612-0

Telefax: +49 351 2612-1099

E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Karina Hofmann, Dr. Ines Görz

Abteilung 10 Geologie, Referat Rohstoffgeologie, Referat

Grundgebirgskartierung, Geophysik, Geologische Grundlagen

Halsbrücker Straße 31a, 09599 Freiberg

Telefon: +49 3731 294-1409

Telefax: +49 3731 294-1099

E-Mail:

karina.hofmann@smul.sachsen.de, ines.goerz@smul.sachsen.de

Fotos:

Autoren

Redaktionsschluss:

02.03.2021

ISSN

1867 - 2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de