

**Datum Auftragsnummer**

20.04.2026 5319

**Bearbeiter**

Petr Novak  
Maren T. Stefanak  
Tom Reinhardt

**E-Mail**

novak@geoenergie-konzept.de  
stefanak@geoenergie-konzept.de  
reinhardt@geoenergie-konzept.de

**Telefon**

+49 172 1822023

**Seiten**

121

**Anlagen**

3

## Potenzialstudie Berlin

# „Identifikation einer Flächenkulisse zur Konkretisierung der Potenziale an Wärme aus Oberflächennaher Geothermie“

### Auftraggeber

**Anschrift**

BEN Berlin Energie und Netzholding GmbH  
Sachsendamm 63  
10829 Berlin

**Ansprechpartner**

Sebastian Georgi

**E-Mail**

sebastian.georgi@be-nh.de

**Telefon**

+49 30530 116 964

**Projektnummer AG**

## Inhalt

Executive Summary.....	11
1 Motivation und Vorbemerkungen .....	15
2 Einführung und Grundlagen.....	15
2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes .....	16
2.2 Geologie und Hydrogeologie von Berlin .....	18
2.3 Relevante Vorarbeiten und Modelle .....	20
2.3.1 Stratigraphisches Modell und geologische Schnitte.....	21
2.3.2 Thermohydrodynamisches Modell.....	22
2.3.3 Zusammenfassung und Bewertung der Modellgrundlagen.....	23
2.4 Technische Grundlagen.....	23
2.4.1 Erdwärmesonden .....	25
2.4.2 Brunnenanlage .....	26
2.4.3 Wärmepumpe.....	27
2.4.4 Niedertemperaturnetz / Kalte Nahwärme .....	27
2.5 Potenzialarten und Bewertungsansätze.....	29
2.6 Herausforderungen im urbanen Raum.....	30
2.6.1 Flächenverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen.....	30
2.6.2 Thermische Wechselwirkungen.....	30
2.6.3 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen .....	31
2.7 Innovative Ansätze .....	32
3 Methodik.....	35
3.1 Eingangsdaten.....	36
3.2 Analyse der Ausschlussflächen.....	37
3.2.1 Theoretisches Potenzial.....	37
3.2.2 Technisches Potenzial .....	38
3.2.3 Interessenskonflikte.....	39
3.3 Aufbau des geothermischen Modells.....	41
3.3.1 Modell der Wärmeleitfähigkeit - Modell WLF-K.....	41
3.3.2 Modell der Wärmekapazität - Modell WK.....	46
3.3.3 Temperaturmodell - Modell T.....	48
3.4 Wärmeentnahmehmodell für die Nutzung von Erdwärmesonden.....	49
3.4.1 Anordnung der Erdwärmesonden .....	50
3.4.2 Erweiterter Ansätze zur Bohrpunktplatzierung .....	51
3.4.3 Bestimmung der Erdwärmesonden-Anzahl.....	52
3.4.4 Abstand zwischen den Erdwärmesonden .....	52
3.4.5 Tiefenstaffelung der Wärmeentnahmeberechnung.....	53

3.4.6	Relative Lastkurven .....	54
3.4.7	Randbedingungen der Anlagensimulation .....	55
3.4.8	Thermische Randbedingungen.....	56
3.4.9	Bestimmung der Wärmeentnahme .....	56
3.4.10	Thermische Wechselwirkungen.....	58
3.5	Wärmebedarf und Deckungsanteil .....	60
3.6	Strombedarfsanalyse .....	64
3.7	Ansatz für das wirtschaftliche Potenzial .....	66
3.8	Einfluss der Grundwasserströmung auf die Potenziale .....	68
3.9	Methodik für Erdwärmepumpen (offene Systeme).....	71
3.9.1	Grundwasserbeschaffenheitsbewertung .....	72
3.9.2	Abschätzung der thermische Leistung.....	72
4	Ergebnisse der Potenzialermittlung .....	73
4.1	Theoretisches Potenzial .....	73
4.2	Technisches Potenzial.....	75
4.3	Deckungsanteil.....	78
4.4	Potenzialbewertung zu Nahwärmenetzen.....	81
4.5	Stromleistungsanalyse.....	84
4.5.1	Blockebene.....	85
4.5.2	Gebietsebene.....	88
4.6	Wirtschaftliches Potenzial.....	91
4.7	Grundwasserpotenzial .....	98
4.7.1	Geometrische Parameter: Flurabstand und Grundwassermächtigkeit .....	98
4.7.2	Chemische Risiken: Eisen- und Manganausfällung .....	100
4.7.3	Ergebnis zur Abschätzung der thermischen Leistung.....	102
4.7.4	Implikationen für die Planung .....	103
5	Flächenkulisse des geothermischen Potenzials.....	104
5.1	Beispiele für geeignete geothermische Flächen.....	105
5.2	Erstellung der geothermischen Flächenkulisse auf Basis der Ergebnisse .....	106
5.2.1	Neubauf Flächen nach Abriss.....	106
5.2.2	Bestandsflächen mit hohem Deckungsanteil .....	107
5.2.3	Bestandsflächen mit hohem Deckungsanteil und Wirtschaftlichkeit.....	108
5.2.4	Netzlösungen auf LOR-Ebene.....	109
5.3	Von der Flächenkulisse zum Projekt: Nutzung und Weiterverarbeitung.....	111
6	Zusammenfassung .....	112
7	Literaturverzeichnis.....	115
8	Anlagen.....	119

## Anlagen

- Anlage 1: Potenzialbewertung zu kalten Nahwärmenetzen
- Anlage 2: Stromanalyse
- Anlage 3: Potenzial offene Systeme

## Abkürzungsverzeichnis

- BVG** - Bundesverband Geothermie
- BWP** - Bundesverband Wärmepumpe
- BZR** - Bezirksregion (LOR-Ebene)
- CAPEX** - Investitionskosten
- EED** - Earth Energy Designer
- EWS** - Erdwärmesonden
- FEFLOW** - Finite Element subsurface FLOW system (Finite-Elemente-System für Untergrundströmung) - Modellierungstool
- FIS-Broker** - alter Berliner Geoportal
- FW** - Fernwärme
- GD** - Geologischer Dienst
- GHEtool** - Python-Tool für EWS-Simulation
- GFZ** - Deutsches GeoForschungsZentrum
- GRD** - Geothermal Radial Drilling
- GRZ** - Gebietsrestriktionszonen (projektspezifisch)
- GWL** - Grundwasserleiter
- IB** - Bohrkosten
- IDA** - Datenquelle Wasserchemie (Geoportal)
- IHA** - Horizontale Anbindung
- InA** - Innovative Ansätze
- ISUS** - Informationssystem Stadt und Umwelt Blockstruktur
- I<sub>WP</sub>** - Investition Wärmepumpe
- IWU** - Institut Wohnen und Umwelt
- JAZ** - Jahresarbeitszahl
- LCoH / LCOH** - Levelized Cost of Heat
- LOR** - Lebensweltlich orientierte Räume
- LowEx** - Low-Exergy-Netz (Anergienetz)
- ONG** - Oberflächennahe Geothermie
- OPEX** - Betriebskosten
- PE** - Polyethylen (Sondenmaterial)
- PGR** - Prognoseraum
- PLR** - Planungsraum
- pygfunction** - Bibliothek für g-Funktionen
- QGIS** - open-source Geoinformationssystemtoolbox
- Qgis2threejs** - QGIS-Plugin für 3D-Visualisierung
- RT** - Rupelton-Tiefe (bis OK Rupelton oder max. 400 m)

- RWTH** – Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- S-Bahn** – Stadtschnellbahn
- SEER** – Seasonal Energy Efficiency Ratio
- StandAG** – Standortauswahlgesetz (Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle)
- TH Modell** – Thermohydrodynamisches Modell
- TRT** – Thermal Response Test
- TU** – Technische Universität
- U-Bahn** – U-Bahn
- UHI** – Urban Heat Island (Städtische Wärmeinsel)
- VDI 4640** – Richtlinie „Thermische Nutzung des Untergrunds“
- WGK** – Wärmegestehungskosten
- WHG** – Wasserhaushaltsgesetz (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts)
- WK** – Wärmekapazität
- WLF** – Wärmeleitfähigkeit
- WLF-GD** – Wärmeleitfähigkeitsmodell laut Geologischer Dienst
- WLF-K** – Kombiniertes Wärmeleitfähigkeitsmodell
- WLF-S** – Wärmeleitfähigkeitsmodell laut Stratigraphisches Modell
- WP** – Wärmepumpe

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Repräsentative thermohydrodynamische Eigenschaften, die zur Erstellung des thermohydrodynamischen .....	22
Tabelle 2: Vergleich der unterschiedlichen Technologien für die Nutzung von Oberflächennaher Geothermie .....	24
Tabelle 3: Breiten und Pufferzonen von Verkehrsstrassen .....	38
Tabelle 4: Darstellung, Einteilung und Bewertung der Konfliktrisikokategorien in Berlin.....	39
Tabelle 5: Übersicht der in der Studie verwendeten Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	67
Tabelle 6: Eingangsparameter, die für die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials verwendet wurden .....	91
Tabelle 7: CoH-Statistik (€/kWh) nach Betriebsvariante und Tiefe – Technisches Potenzial. Min, Median, Mittelwert und Maximalwert des wirtschaftlichen Potenzials (LCoH) über alle ISU5-Blöcke für die Betriebsvarianten Heizfall, Regeneration 50 % und ausgeglichener Betrieb in den Tiefen 100 m, 150 m, 200 m, 300 m sowie RT (bis Oberkante Rupelton bzw. max. 400 m) .....	94
Tabelle 8: Modellhafte Porositäten und Durchlässigkeiten der stratigraphischen Einheiten. Die quartären Einheiten (Holozän, Saale) weisen im Modell durchschnittlich höhere Durchlässigkeiten auf als die tiefer liegenden Schichten. [15].....	98

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stadtstruktur Berlins eingeteilt in unterschiedliche Zonen. Für diese Studie dient die ISU5-Blockstruktur als eine Grundlage der Potenzialbestimmung.....	16
Abbildung 2: Naturräumlich-geomorphologische Unterteilung von Berlin [6] .....	17
Abbildung 3: Oberflächennahe Geologie Berlins. [8] .....	18
Abbildung 4: Hydrogeologische Gliederung von Berlin: Hydrogeologischer Schnitt durch Berlin Bild: Umweltatlas Berlin, [10] .....	19
Abbildung 5: Visualisierung des stratigraphischen Modells im Raum Berlin. ....	21
Abbildung 6: Vergleich zwischen dem stratigraphischen Modell und den geologischen Schnitten.....	22
Abbildung 7: Prinzipskizze Erdwärmesondenanlage. ....	25
Abbildung 8: Prinzipskizze Erdwärmebrunnensystem.....	26
Abbildung 9: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe. [16].....	27
Abbildung 10: Schema eines kleineren kalten Nahwärmenetzes.....	28
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Beziehung zwischen theoretischem, technischem und wirtschaftlichem Potenzial. Das Diagramm veranschaulicht die hierarchische Ableitung des wirtschaftlich nutzbaren Anteils aus dem gesamten geothermischen Potenzial. Ausgehend vom theoretischen Potenzial werden durch technische und wirtschaftliche Einschränkungen sukzessive realisierbare Teilpotenziale bestimmt.....	29
Abbildung 12: Karte der Gebiete in Berlin, für die ein geothermisches Modell von geoENERGIE Konzept erstellt wurde.....	31
Abbildung 13: Schema von Geothermal Radial Drilling (links) [19], Geostar-System des Fraunhofer IEG (rechts) [20] .....	33
Abbildung 14: Skizzen Spiralsonde (links) und Erdwärmekorb (rechts) [19] .....	33
Abbildung 15: Schema Thermoroad (Thermostraße) Fernwärme und Fernkälte [24].....	34
Abbildung 16: Schematische Darstellung der drei Potenzialtypen im Rahmen der Potenzialanalyse - theoretisch, technisch und wirtschaftlich. Die Abbildung zeigt die methodische Abgrenzung und die jeweils berücksichtigten Parameter zur Ermittlung des geothermischen Potenzials. Während das theoretische Potenzial auf der Gesamtfläche basiert, berücksichtigt das technische Potenzial nutzbare Freiflächen unter Ausschluss von Hindernissen wie Bäumen. Das wirtschaftliche Potenzial ergänzt die Analyse um Investitions- und Betriebskosten.....	35
Abbildung 17: Entwickelte Ampelkarte mit Darstellung der Konfliktrisikokategorien für Berlin.....	40
Abbildung 18: Tiefenschnitt der effektiven Wärmeleitfähigkeit nach dem Modell WLF-GD für die 100 m-Ebene.....	42
Abbildung 19: Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für die Niveaus 100 m, 150 m, 200 m, 300 m und 400 m nach dem WLF-S-Modell.....	43
Abbildung 20: Differenz der von den Modellen WLF-GD und WLF-S gelieferten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für eine Tiefenstufe von 100 m. ....	44
Abbildung 21: Die Tiefenschnitte des WLF-K-Modells .....	45
Abbildung 22: Vergleich der einzelnen WLF-Modelle.....	46
Abbildung 23: Verteilung der effektiven Wärmekapazität für eine Tiefenstufe von 100 m. 48	

Abbildung 24: Vergleich der effektiven Temperatur des Untergrundes nach dem TH-Modell. [15]. (links) und geologische Dienst (rechts) [12]..... 49

Abbildung 25: Platzierung von Erdwärmesonden im theoretischen Potenzial (links) und im technischen Potenzial (rechts) Die schematische Darstellung zeigt die Verteilung der EWS innerhalb eines ISU5-Blocks. Links: gleichmäßige Belegung der gesamten Blockfläche (theoretisches Potenzial). Rechts: angepasste Platzierung unter Berücksichtigung von Ausschlussflächen (technisches Potenzial). ..... 50

Abbildung 26: Erweiterte Platzierung von Erdwärmesonden – schräge Bohrungen (links) und Gehwegnutzung (rechts) Links: Darstellung der EWS im technischen Potenzial (gelbe Punkte) sowie zusätzlich platzierte schräge Bohrungen (rote Punkte) entlang der Pufferlinien bestehender Sonden. Rechts: Platzierung von EWS entlang öffentlicher Gehwege gemäß den beschriebenen Geodaten und dem Poisson-Disk-Verfahren..... 51

Abbildung 27: Standardisierte Lastprofile zur Bewertung der Wärmeentnahme. Die drei dargestellten Kurven zeigen die monatliche Verteilung der Wärmeentnahme für unterschiedliche Betriebsvarianten: oben Heizfall (reine Entnahme), mittig 50 % Regeneration, unten ausgeglichener Betrieb mit vollständigem saisonalem Ausgleich. Diese Profile wurden zur Berechnung des geothermischen Potenzials verwendet. .... 55

Abbildung 28: Wärmebedarf im Stadtgebiet Berlin auf ISU5-Blockebene. Dargestellt ist der gebäudeseitige Wärmebedarf je ISU5-Block gemäß den vom Auftraggeber bereitgestellten Eingangsdaten. Die Werte dienen als Grundlage für die Berechnung des geothermischen Deckungsanteils. .... 60

Abbildung 29: Fernwärmeversorgungsbereiche im Stadtgebiet Berlin. [45] Dargestellt sind die bestehenden Fernwärmetrassen (braun) inklusive eines 250 m-Puffers. Die Fläche repräsentiert die angenommene Zone mit potenzieller Verfügbarkeit von Fernwärme und dient als Grundlage für die Abschätzung des geothermischen Deckungsanteils..... 61

Abbildung 30: Anteil der Fernwärmeversorgung je ISU5-Block im Stadtgebiet Berlin. Die Abbildung zeigt den geschätzten Versorgungsanteil mit Fernwärme pro Block. Grundlage ist die Annahme, dass innerhalb des 250 m-Puffers um bestehende Fernwärmetrassen ein pauschaler Deckungsanteil von 50 % besteht. Der Blockanteil innerhalb dieser Zone wurde mit dem Faktor 0,5 gewichtet..... 62

Abbildung 31: Reduzierter Wärmebedarf je ISU5-Block im Stadtgebiet Berlin. Die Darstellung zeigt den gebäudeseitigen Wärmebedarf nach Abzug des pauschal angenommenen Fernwärmeanteils gemäß dem beschriebenen Verfahren. Grundlage ist die Flächenüberlagerung mit dem Fernwärmeversorgungsgebiet und ein pauschaler Deckungsfaktor von 50 %..... 63

Abbildung 32: Ampelkarte zur Bewertung des Einflusses der Grundwasserströmung auf das geothermische Potenzial Einstufung auf Basis der Péclet-Zahl: grün ( $P \leq 1$ ) – kein Einfluss, gelb ( $1 < P \leq 5$ ) – Übergangsbereich, rot ( $P > 5$ ) – signifikanter Einfluss. .... 70

Abbildung 33: Theoretisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin, links) und für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder 400m, rechts), Heizfall..... 74

Abbildung 34: Theoretisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), ausgeglichener Betrieb (rechts)..... 75

Abbildung 35: Theoretisches (links) und technisches (rechts) Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m, Heizfall. .... 76

Abbildung 36: Technisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 77

Abbildung 37: Technisches Potenzial mit innovativen Ansätzen des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50% (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 77

Abbildung 38: Deckungsanteil des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin, links) und für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m, rechts), Heizfall, Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 78

Abbildung 39: Technisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 79

Abbildung 40: Technisches Potenzial für eine Tiefe von 100 m des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe, ISU5-Blöcke mit großem Potenzial für die Netznutzung-vierte Reihe) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 82

Abbildung 41: Technisches Potenzial für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m) des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe, ISU5-Blöcke mit großem Potenzial für die Netznutzung-vierte Reihe) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. .... 83

Abbildung 42: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung, Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglicherer Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts). .... 85

Abbildung 43: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung, Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglicherer Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts). .... 86

Abbildung 44: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Vergleich der elektrischen Leistung beim Heizen im Winter (linke Seite) und Kühlen im Sommer (rechte Seite) bei 50 % Regeneration (obere Zeile) und ausgeglichenem Betrieb (untere Zeile). .... 87

Abbildung 45: Stromleistung des Technisches Potenzials des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe) für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglicherer Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts). .... 89

Abbildung 46: Stromleistung des Technisches Potenzials des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe) für die maximal mögliche Tiefe

(Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglichener Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts)..... 90

Abbildung 47: Wirtschaftliche Potenzial der ISU5-Blöcke (in Euro pro kWh Produktion) für eine Tiefe von 100 m für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (Mitte), ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung..... 92

Abbildung 48: Wirtschaftliches Potenzial der ISU5-Blöcke (in Euro pro kWh Produktion) für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung..... 92

Abbildung 49: Flurabstand des Grundwassers in Berlin. Räumliche Verteilung des Flurabstands (Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel) im Quartär. Geringe Flurabstände (< 20 m) markieren Bereiche mit günstigen Voraussetzungen für die thermische Nutzung des Grundwassers..... 99

Abbildung 50: Grundwassermächtigkeit im Quartär. Darstellung der Grundwassermächtigkeit (Differenz zwischen Oberkante Holstein-Horizont und Grundwasserspiegel) in den ISU5-Blöcken. Hohe Mächtigkeiten deuten auf ein größeres nutzbares Volumen und damit auf ein höheres geothermisches Potenzial hin. .... 100

Abbildung 51: Risikobewertung - Wasserchemie. Blockweise Bewertung der Risiken für Eisen- und Manganausfällung sowie Korrosion auf Basis der aktuellen Messdaten (letzte 2 Jahren)..... 101

Abbildung 52: Räumliche Verteilung des geothermischen Potenzials von Grundwasser auf ISU5-Blockebene. Die thermische Leistung wurde auf Basis der maximalen Reichweite des Absenkrichters und der Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Rückführung berechnet..... 102

Abbildung 53: Ableitung einer Flächenkulisse aufgrund Bestandsflächen mit hoher Deckung. Die Karte zeigt Deckungsanteile auf ISU5-Blockebene für das Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Die Farbskala zeigt den Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie: dunklere Töne stehen für höhere Deckungsanteile. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche markieren Zonen mit potenziellen Konflikten, die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Karte dient der Identifikation von Vorrangflächen für Eigenversorgung oder Netzlösungen und illustriert, wie aus den bestehenden Ergebnissen eine Flächenkulisse abgeleitet werden kann..... 107

Abbildung 54: Ableitung einer Flächenkulisse für Bestandsflächen mit hoher Deckung und Wirtschaftlichkeit. Die Karte zeigt Deckungsanteile auf ISU5-Blockebene für das Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche kennzeichnen Zonen mit potenziellen Konflikten, die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Darstellung hebt „Low Hanging Fruits“ hervor – Blöcke, die nicht nur technisch geeignet sind, sondern auch wirtschaftlich attraktive Wärmegegestehungskosten aufweisen. Sie dienen als priorisierte Kandidaten für eine schnelle Umsetzung im Bestand. .... 109

Abbildung 55: Flächenkulisse für kalte Nahwärmenetze auf LOR-Ebene (PLR) im Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Die Farbskala zeigt den

Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie: dunklere Töne stehen für höhere Überdeckung. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche markieren Zonen mit potenziellen Konflikten (rechtliche oder nutzungsbedingte Einschränkungen), die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Darstellung dient der Identifikation von Vorrangflächen für die Bildung kalter Nahwärmenetze, bei denen Überschuss- und Defizitblöcke innerhalb eines Planungsraums gekoppelt werden können..... 110

## Executive Summary

### Ziel der Studie

Die Potenzialstudie verfolgt das Ziel, die Nutzungsmöglichkeiten der oberflächennahen Geothermie im Stadtgebiet Berlin systematisch zu erfassen und für die kommunale Wärmeplanung nutzbar zu machen. Sie identifiziert geeignete Flächen, quantifiziert das geothermische Potenzial auf mehreren Ebenen (theoretisch, technisch, wirtschaftlich) und leitet Handlungsempfehlungen für eine strategische Integration in die Wärmeversorgung ab.

### Was wurde analysiert?

Im Fokus der Studie steht die Potenzialermittlung von Erdwärmesonden (EWS) für eine nachhaltige Wärme-(Kälte)versorgung in Berlin sowie eine ergänzende, indikative Betrachtung von offenen Systemen (Brunnen). Analysiert wurden drei Potenzialebenen – theoretisch (unter idealisierten Bedingungen), technisch (unter Berücksichtigung realer Flächenrestriktionen und Nachbarschaftseffekte) und wirtschaftlich (auf Basis der Wärmegestehungskosten unter Einbeziehung von Investitions- und Betriebskosten sowie Diskontierung) – und deren Einfluss auf den geothermischen Deckungsanteil am Wärmebedarf. Die Methodik berücksichtigt die geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen des Untergrunds sowie technische und raumbezogene Restriktionen wie Flächenverfügbarkeit, Ausschlussflächen und innovative Bohransätze. Zusätzlich wurden Nachbarschaftseffekte und Wechselwirkungen zwischen benachbarten Anlagen explizit einbezogen, um eine realistische Potenzialabschätzung zu gewährleisten. Interessenskonflikte und Genehmigungsfragen wurden transparent dargestellt. Die Ergebnisse umfassen auch eine Stromleistungsanalyse für Wärmepumpen, die Bewertung von kalten Nahwärmenetzen auf LOR-Ebene und die Ableitung einer Flächenkulisse für die strategische Planung.

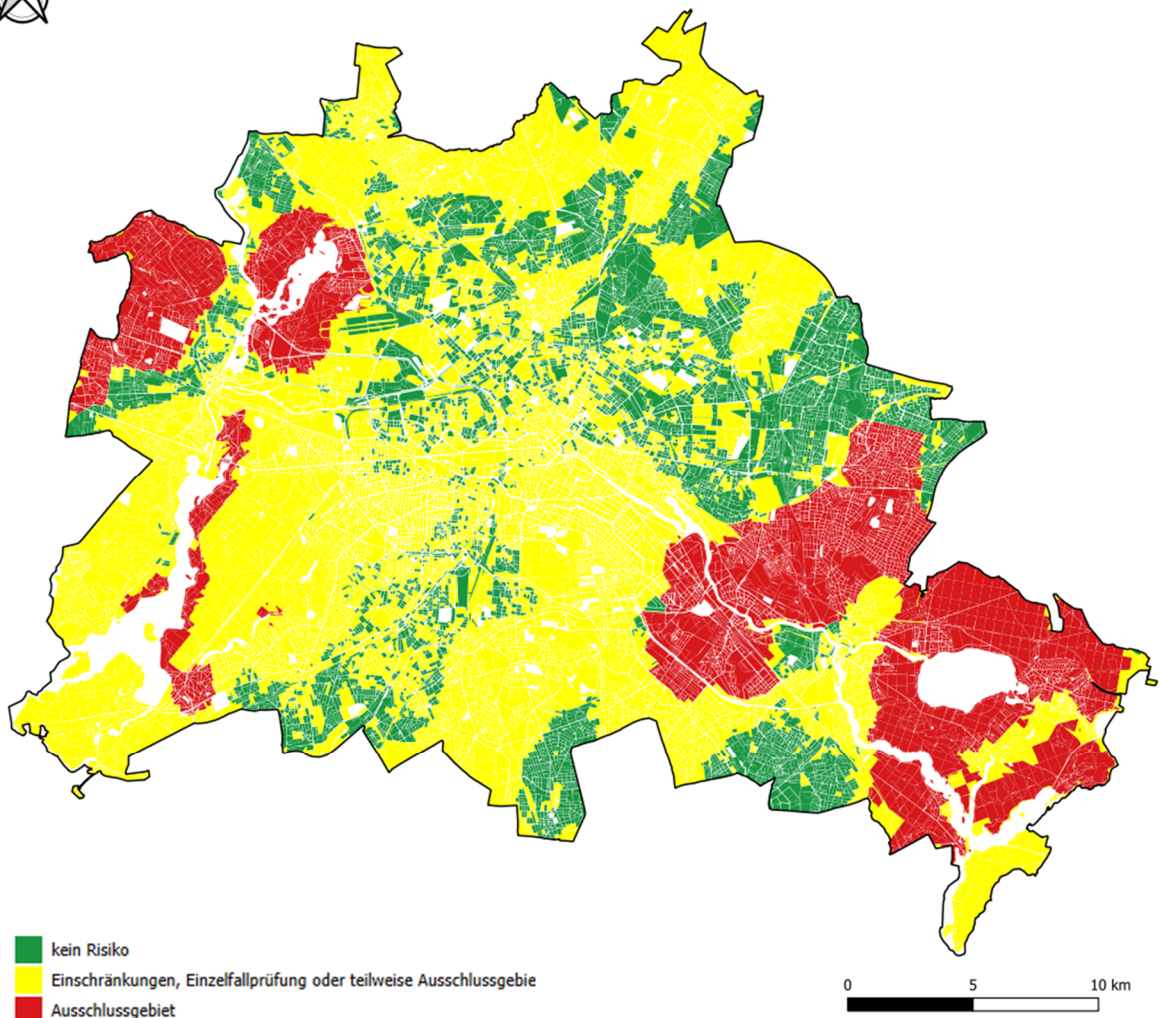
### Ergebnisse

Die Studie liefert ein umfassendes Set an Ergebnissen, die sowohl in Tabellenform als auch in räumlichen Datenbanken bereitgestellt werden.

### Räumliche Datenbanken (Karten) und Tabellen enthalten:

- **Drei Potenzialebenen für Erdwärmesonden** – theoretisches, technisches und wirtschaftliches Potenzial für unterschiedliche Tiefenstufen (ab 100 m bis max. 400 m) und Betriebsvarianten (*Heizfall, Regeneration 50 %, ausgeglichener Betrieb*).
- **Zugehörige Kennwerte** wie geothermischer Deckungsanteil und elektrische Anschlussleistungen der Wärmepumpen.
- **Bewertung des Einflusses der Grundwasserströmung** auf das Potenzial geschlossener Systeme (EWS).
- **Flächenkulisse** mit typischen Nutzungsbeispielen für Vorrangflächen und Netzlösungen.
- **Theoretisches Grobpotenzial offener Systeme (Brunnenanlagen)** als indikative Abschätzung.

- **Methodische Begleitinformationen** wie detaillierte Berechnungsansätze, Randbedingungen, Lastprofile und Genehmigungslogik.
- **Datensteckbriefe** zu allen zentralen Ergebnisdatensätzen
- **Konfliktpotenzialkarten** zu rechtlichen Einschränkungen, Wasserschutzgebieten und Denkmalschutz.



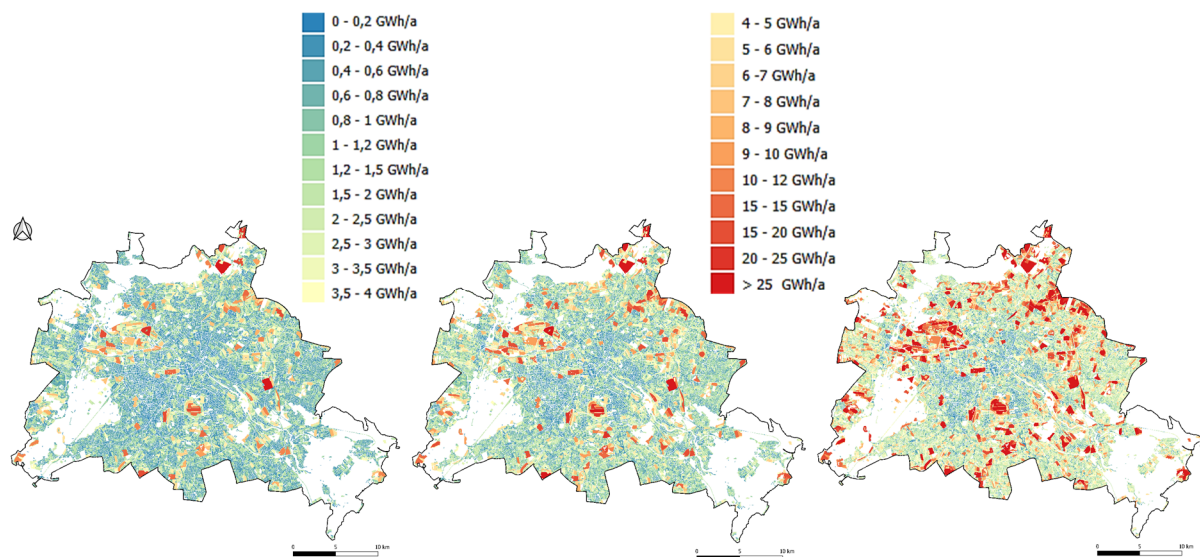
Entwickelte Ampelkarte mit den aktuellen Konfliktrisikokategorien für Berlin.

### Gesamtwärmebedarf in Berlin

- Gesamtwärmebedarf: 31 440 GWh/a
- Reduzierter Wärmebedarf (durch Fernwärme): 20 203 GWh/a

## Geothermisches technisches Gesamtpotenzial in Berlin

	Heizfall	Regeneration 50%
100m	13 483 GWh/a	20 649 GWh/a
RT	18 595 GWh/a	29 709 GWh/a



Technisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglicherer Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

## Bedarfsdeckung in Berlin

	Heizfall		Regeneration 50%	
	Gesamt-wärmebedarf	reduzierter Bedarf	Gesamt-wärmebedarf	reduzierter Bedarf
100m	43%	67%	66%	102%
RT	59%	92%	95%	147%

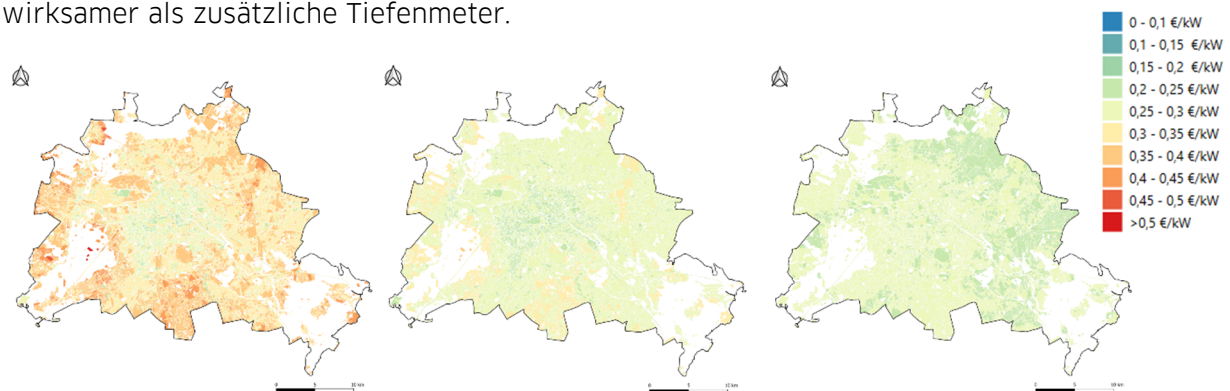
## Hauptbefunde in Kürze

**Technisches Potenzial & Deckungsanteil:** Das geothermische Potenzial steigt mit der Bohrtiefe und dem Regenerationsgrad. Regeneration ist ein entscheidender Hebel, um die Effizienz zu erhöhen und nachbarschaftliche Beeinflussungen zu reduzieren. Der geothermische Deckungsanteil hängt stark von Tiefe, Betriebsweise und Flächenverfügbarkeit ab.

**Kalte Nahwärmenetze:** Die Analyse auf LOR-Ebene zeigt, dass Defizitblöcke durch Vernetzung mit Überschussblöcken effizient versorgt werden können. Kalte Netze sind besonders dort sinnvoll, wo die Gesamtdeckung eines Planungsraums  $\geq 100\%$  beträgt. Defizitblöcke in LOR-Gebieten mit Gesamtdeckung  $\geq 100\%$  sollten über kalte Netze mit Überschussblöcken verbunden werden, um den geothermischen Deckungsanteil gebietlich zu maximieren.

**Stromleistungsanalyse:** Winterlasten bleiben für die Netzplanung kritisch. Ausgeglichene Betriebsweisen verlagern elektrische Arbeit teilweise in den Sommer und eröffnen Chancen für netzdienliche Betriebsstrategien. Passive Kühlung ist besonders effizient. Überschüsse im Sommer (Kältebedarf, PV-Strom) sollten zur Regeneration genutzt werden, um die Wintereffizienz (JAZ) zu erhöhen, die Wärmegestehungskosten zu senken und die Netzlasten zu entzerren.

**Wirtschaftlichkeit:** Die Wärmegestehungskosten liegen im Mittel zwischen 0,23 und 0,34 €/kWh. Regeneration senkt die Kosten deutlich stärker als zusätzliche Tiefe. Geringere Sondendichten und größere Abstände können wirtschaftlich vorteilhaft sein, insbesondere im Innenstadtbereich. Regenerationsstrategie und Sonden geometrie (Abstand/Dichte) sind oft wirksamer als zusätzliche Tiefenmeter.



Wirtschaftliche Potenzial der ISU5-Blöcke (in Euro pro kWh Produktion) für eine Tiefe von 100 m für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (Mitte), ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

**Systemintegration:** Die Kopplung mit PV, Fernkälte oder Abwärme schafft zusätzliche Synergien und erhöht die Systemstabilität. In dicht bebauten urbanen Räumen kann thermische Regeneration eine planerische Notwendigkeit werden, um die Leistungsfähigkeit des Systems langfristig zu sichern.

### Flächenkulisse

Die Kulisse umfasst Vorrangflächen für Eigenversorgung, wirtschaftlich attraktive Bestandsflächen, Netzlösungen auf LOR-Ebene sowie innovative Nutzungen (z. B. Gehwege, Sportflächen). Mehrfachnutzung und Integration in die Infrastruktur sind zentrale Planungsansätze.

### Offene Systeme (Brunnen)

Das Potenzial wird nur indikativ und grob klassiert dargestellt (Leistungsklassen in kW). Lokale hydrogeologische und chemische Bedingungen können stark abweichen, weshalb eine standortspezifische Prüfung erforderlich ist.

## 1 Motivation und Vorbemerkungen

Ziel der vorliegenden Studie ist die Identifikation und Bewertung des Potenzials zur Nutzung oberflächennaher Geothermie im Stadtgebiet Berlin unter besonderer Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit von Erdwärmesondenanlagen. Im Fokus steht die Erstellung eines GIS-basierten Datensatzes, der unterschiedliche Potenzialebenen (theoretisch, technisch, wirtschaftlich) in räumlich differenzierter Form abbildet.

Die Studie verfolgt dabei folgende zentrale Zielsetzungen:

- **Identifikation geeigneter Flächen** zur Erschließung von geothermischer Wärme durch vertikale Erdwärmesonden unter Berücksichtigung technischer, rechtlicher und geologischer Rahmenbedingungen.
- **Quantifizierung des geothermischen Potenzials** auf Blockebene (ISU5) in Form von Wärmeleistung, Energieertrag und Volllaststunden.
- **Abschätzung des Strombedarfs** für die Nutzung der geothermischen Wärme mittels Wärmepumpensystemen.
- **Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung** benachbarter geothermischer Anlagen im urbanen Raum.
- **Integration innovativer Erschließungskonzepte**, insbesondere für den Bestand und öffentliche Räume.
- **Ableitung von Empfehlungen** für die strategische Nutzung oberflächennaher Geothermie im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung.

Die Ergebnisse der Studie sollen als Entscheidungsgrundlage für die weitere Planung und Umsetzung geothermischer Projekte in Berlin dienen. Sie werden in Form eines digitalen GIS-Datenpakets sowie eines Abschlussberichts bereitgestellt und können zur fundierten Integration geothermischer Potenziale in die kommunale Wärmeplanung beitragen, sowie eine Grundlage für die Planung des Stromnetzes bereitstellen.

## 2 Einführung und Grundlagen

Die Nutzung oberflächennaher Geothermie zur Gebäudetemperierung stellt in Deutschland eine etablierte und zunehmend verbreitete Technologie dar. Insbesondere in urbanen Räumen wie Berlin gewinnt sie als klimafreundliche Alternative zu konventionellen Heiz- und Kühlsystemen an Bedeutung. Im Hinblick auf die Berliner Flächenkulisse eignen sich Erdwärmesondenanlagen besonders gut für das Stadtgebiet, da diese Technologie auch auf engem Raum einsetzbar ist und die Flächen nach der Installation anderweitig genutzt werden können z.B. Überbauung mit Gebäuden oder Nutzung als Grünfläche. Mit der wachsenden Zahl an Erdwärmeanlagen steigt jedoch auch die Komplexität der planerischen und genehmigungsrechtlichen Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die thermische Wechselwirkung benachbarter Systeme.

Im Rahmen dieser Studie wird die oberflächennahe Geothermie bis zu einer Tiefe von maximal 400 m betrachtet. Diese Grenze entspricht der allgemein anerkannten Definition für „oberflächennahe“ Systeme. [1], [2], [3] Technologisch wird zusätzlich die geologische Grenze der Rupelton-Oberkante berücksichtigt, da unterhalb dieser Schicht salzhaltige Formationen auftreten können, deren Freilegen durch Anbohren das Risiko einer zunehmenden Versalzung der darüberliegenden Süßwasserleiter birgt. Die tatsächliche Tiefe der betrachteten Erdwärmesonden richtet sich somit nach dem jeweils oberflächennäheren Grenzwert – dementsprechend ist es entweder die literarische 400 m-Tiefengrenze oder die Rupelton-Oberkante.

## 2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

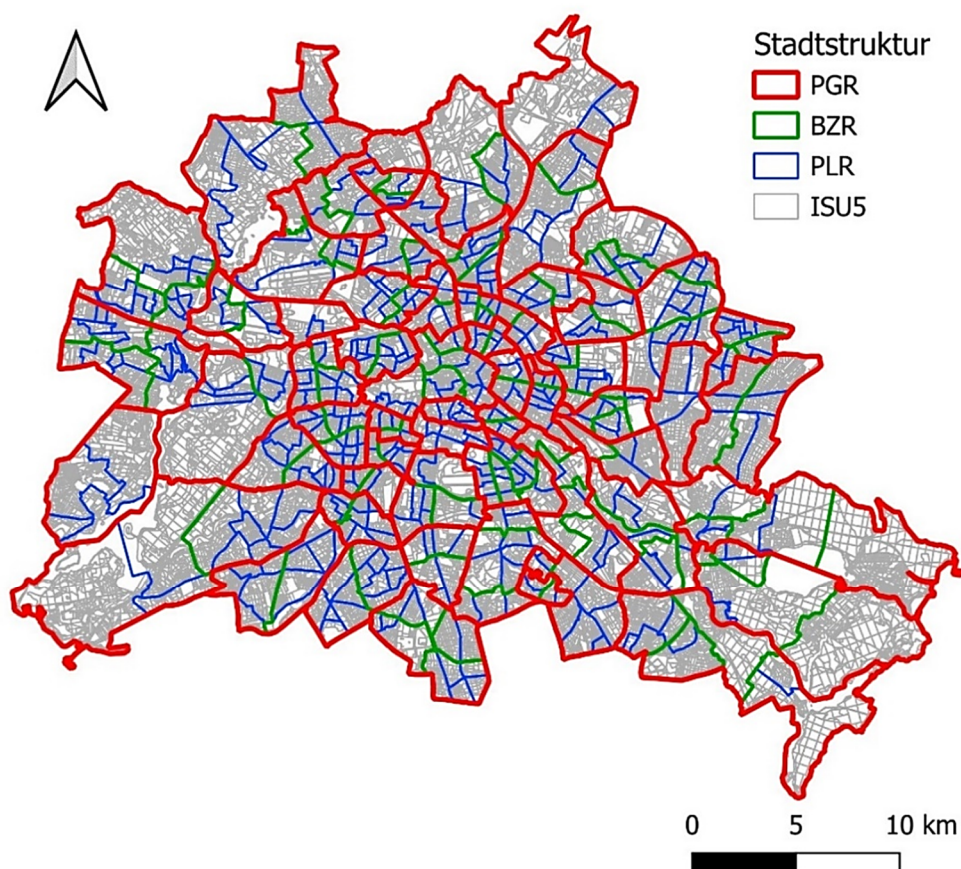


Abbildung 1: Stadtstruktur Berlins eingeteilt in unterschiedliche Zonen. Für diese Studie dient die ISU5-Blockstruktur als eine Grundlage der Potenzialbestimmung.

Berlin ist eine vielfältige Metropole mit rund 3,7 Millionen Einwohnern und einer Fläche von etwa 892 km<sup>2</sup>, was sie zur flächengrößten Stadt Deutschlands macht. Die Stadt ist vollständig vom Land Brandenburg umgeben und erstreckt sich etwa 45 km in Ost-West-Richtung und 38 km in Nord-Süd-Richtung. [4]

Die Stadtstruktur ist in unterschiedliche Flächentypen gegliedert, die die dichte Bebauung Berlins abbilden. [5] Dazu zählen unter anderem Großsiedlungen, dichte Blockbebauungen (typisch innerhalb der Ringbahn), Grün- und Freiflächen sowie Verkehrs- und

Industrieflächen. Ganz Berlin wurde zudem in eine Blockstruktur unterteilt, die durch die sogenannten ISU5-Blöcke beschrieben wird (siehe Abbildung 1). Die Potenzialberechnungen basieren auf dieser Blockstruktur. Für die Simulation möglicher Wärmenetze sind die größeren Strukturen der LOR-Gebiete verwendet worden (PGR-, PLR- und BLZ-Räume).

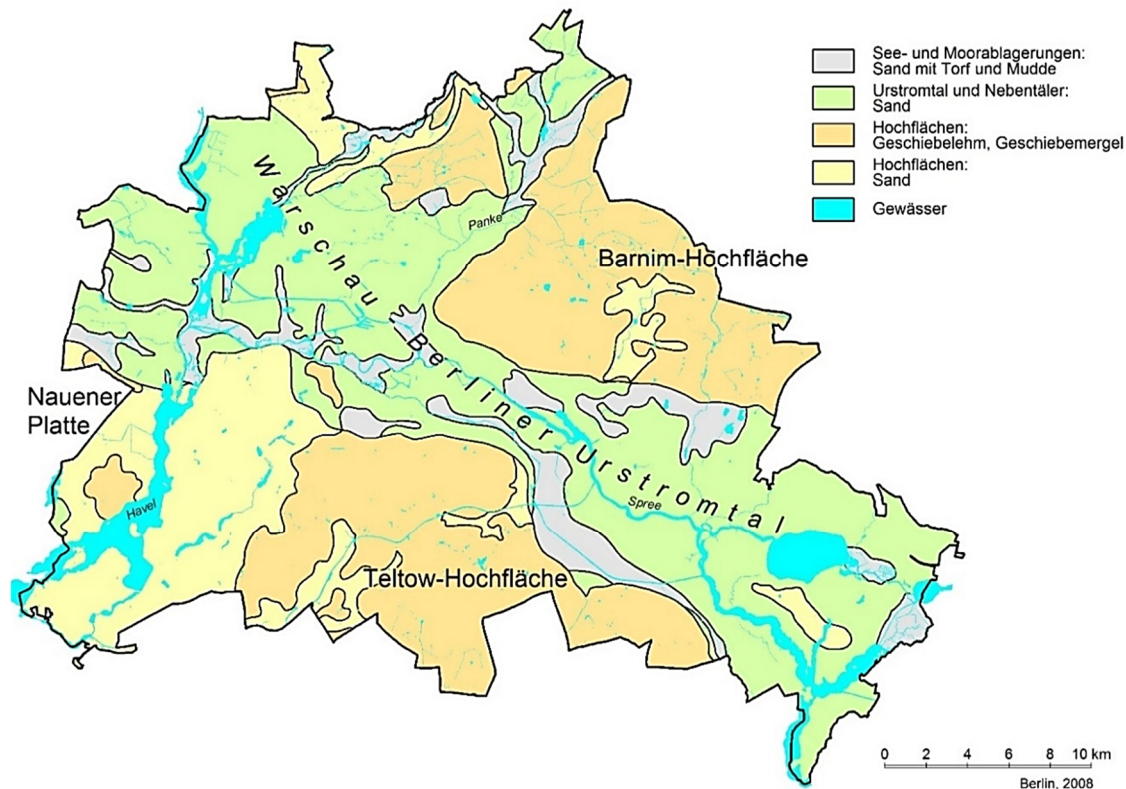


Abbildung 2: Naturräumlich-geomorphologische Unterteilung von Berlin [6]

Strukturgeographisch liegt Berlin im Norddeutschen Tiefland und weist eine relativ flache Topographie auf. Die wichtigsten morphologischen Großeinheiten sind das Warschau-Berliner Urstromtal, das von Südosten nach Nordwesten durch das Stadtgebiet verläuft, und die Hochebenen „Barnim“ im Nordosten und „Teltow“ sowie die „Nauener Platte“ im Südwesten, von denen es umgeben wird (siehe Abbildung 2).

Berlin wird von mehreren größeren Flüssen durchzogen. Die Spree durchquert die Stadt in Ost-West-Richtung und mündet in Spandau in die Havel, die in Nord-Süd-Richtung durch den Westen Berlins fließt. Außerdem gibt es weitere Nebenflüsse wie die Dahme, Panke, Wuhle und Erpe sowie zahlreiche Seen, die das Stadtbild prägen wie z.B. der Große Müggelsee (größter See Berlins) und der Tegeler See. [4] Neben der dichten städtischen Bebauung wird ca. 18 % der Gesamtfläche Berlins von Waldgebieten bedeckt, wobei die größten zusammenhängenden Waldflächen der Grunewald, Spandauer Forst, Müggelwand und Wuhlheide sind [7].

Die Flächengestaltung in Berlin ist also sehr vielfältig und wird nicht nur von urbanen Strukturen, sondern auch von unterschiedlichen Naturräumen geprägt.

## 2.2 Geologie und Hydrogeologie von Berlin

Berlin befindet sich innerhalb der Norddeutschen Senke, die einen Teil des Mitteleuropäischen Beckens bildet. Die geologische Entwicklung Berlins ist geprägt durch eine lange Sedimentationsgeschichte, die vom Paläozoikum bis in das Zeitalter des Quartärs reicht. Die Region wurde vor allem durch subsidente Prozesse und glaziale Überprägung geformt, insbesondere durch die Weichsel- und Saale-Kaltzeit, die die heutige Oberflächenform maßgeblich bestimmt hat.

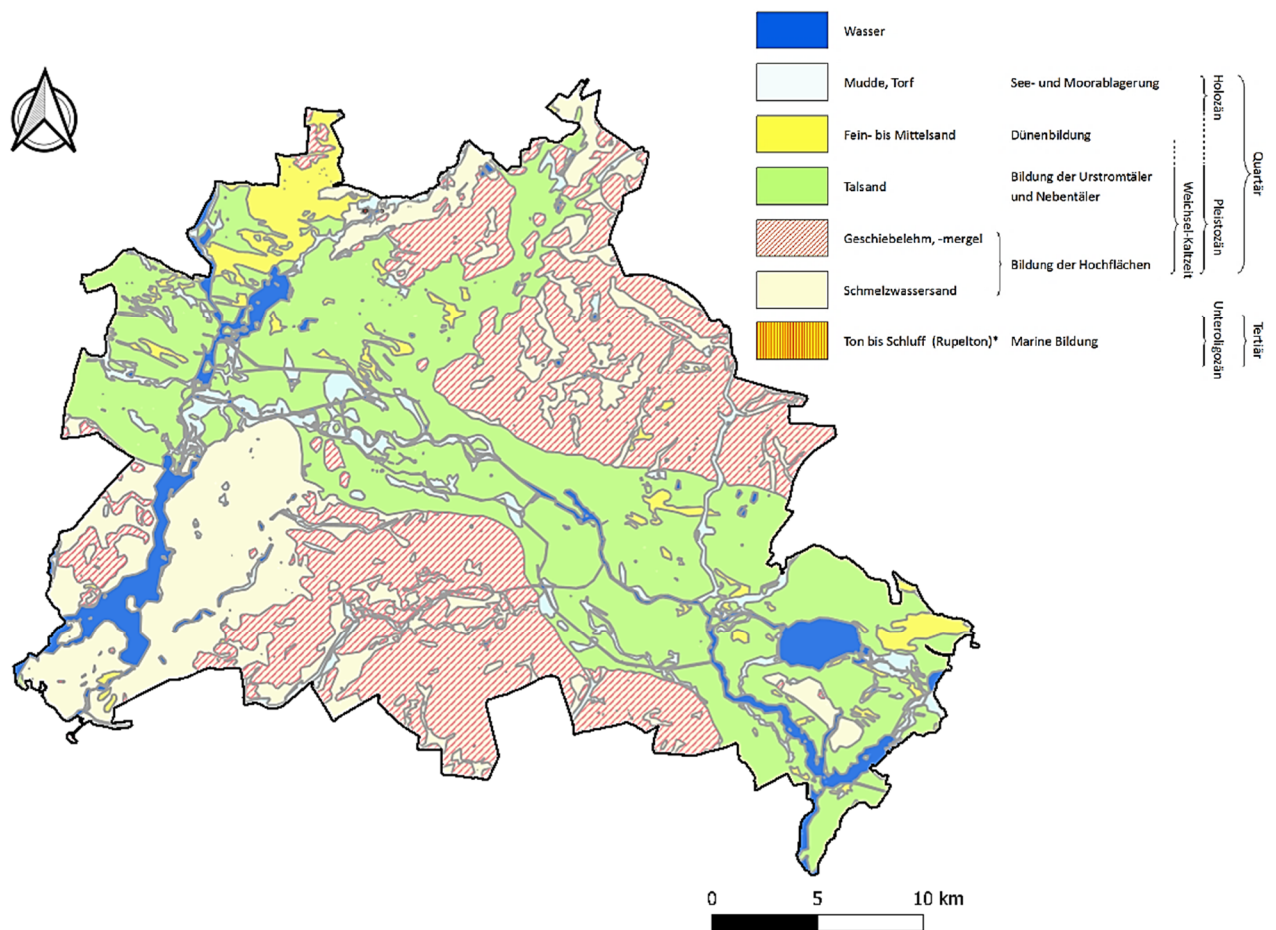


Abbildung 3: Oberflächennahe Geologie Berlins. [8]

Der oberflächennahe Untergrund wird im Warschau-Berliner Urstromtal von sandigen und kiesigen Ablagerungen dominiert.

Die Barnim-Hochfläche im Norden und die Teltow-Hochfläche mit der Nauener Platte im Süden sind mit Geschiebemergeln und -lehmern der Grundmoränen bedeckt. Oberflächennah können ebenfalls organische Sedimente wie Torfe oder Mudden auftreten sowie an vereinzelten Standorten Tone und Schluffe der Rupeltonschichten (siehe Abbildung 3).

Unterhalb der oberflächennahen quartären Ablagerungen befinden sich mächtige Sedimentpakete aus dem Tertiär, bestehend aus Feinsanden, Braunkohleschluffen und -tonen und kiesigen Sanden des Miozäns, gefolgt von schluffigen Feinsanden mit Übergang zu tonigeren Sedimenten des Oberoligozäns. Daran anschließend folgt das Unteroligozän bzw. der Rupelton als dunkelgraues toniges Sediment mit einer geringen Durchlässigkeit. Die Schichten des Rupeltons fungieren als hydraulische Trennschicht zwischen den Grundwasserleitern des süßwasserführenden Quartärs und des salzwasserführenden Tertiärs. Aufgrund von Salztektunik können die Schichten des Rupeltons lokal aufgewölbt sein und bereits oberflächlich angetroffen werden. [9]

Der Untergrund von Berlin ist also bis in eine Tiefe von 400 m ausschließlich geprägt durch Lockergesteine wie Sand, Kies, organische Sedimente, Schluff, Braunkohle und Ton.

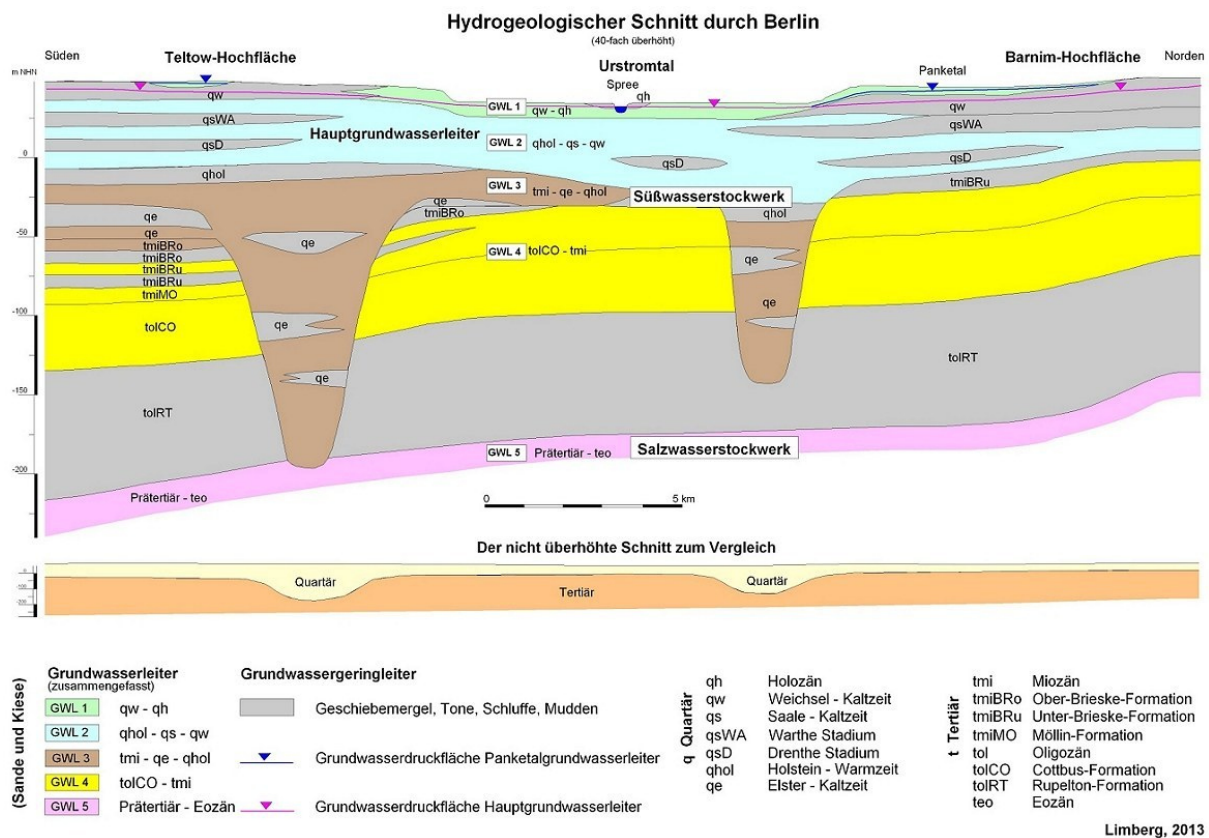


Abbildung 4: Hydrogeologische Gliederung von Berlin: Hydrogeologischer Schnitt durch Berlin Bild: Umweltatlas Berlin, [10]

Die Verfügbarkeit von geologischen Bohrdaten in Berlin ist sehr gut und über das Geoportal Berlin einfach zugänglich. Diese Daten sind essenziell für die Analyse des Untergrundes und die Erstellung eines geothermischen Modells. Die Bohrdatenbasis bildet u. a. auch die Grundlage für das stratigraphische Landesmodell, das die räumliche Verbreitung der Schichten im Quartär und Tertiär flächendeckend darstellt (siehe Abschnitt 2.3.1).

Die hydrogeologische Gliederung Berlins basiert auf einer hydrostratigrafischen Klassifikation, die im Rahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie entwickelt wurde. Für Berlin wurden fünf hydraulisch unterscheidbare Grundwasserleiter (GWL) definiert: GWL 1 ist der flachgründige Grundwasserleiter im Quartär, bestehend aus Sanden und Kiesen, der durch die Rupeltonschichten von den tieferen Grundwasserleiter GWL 2-5 in den tertiären und älteren Sedimenten getrennt wird. Diese Einheiten bilden die Grundlage für die Bewertung der Grundwasserverfügbarkeit und -qualität (siehe Abbildung 4).

Das Grundwasser in Berlin wird hauptsächlich durch Niederschläge gespeist. Die Fließverhältnisse sind abhängig von der geologischen Struktur, der Durchlässigkeit der Sedimente und anthropogenen Einflüssen wie Versiegelung und Wasserentnahme. Die Grundwasserneubildung erfolgt vor allem in den sandigen Bereichen des Urstromtals. In den dicht bebauten Stadtteilen ist sie durch Versiegelung stark eingeschränkt. Die Grundwasserstände werden über ein Landesgrundwassermessnetz kontinuierlich überwacht. [10]

Um den Schutz der Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser Berlins zu gewährleisten und einem Versalzen des Wasservorkommens entgegenzuwirken, müssen die Rupeltonschichten als natürliche Grenze zwischen den Grundwasserstockwerken weiterhin eine maßgebliche Bedeutung bei den Zulassungsverfahren bezüglich verschiedener Grundwassernutzungen haben. Dies ist ebenfalls für oberflächennahe geothermische Anlagen von hoher Bedeutung.

### 2.3 Relevante Vorarbeiten und Modelle

Das Land Berlin verfügt über eine Reihe von guten Grundlagen, die die Erstellung eines geothermischen Modells zur Erreichung des vorgegebenen Ziels ermöglichen. Die wichtigsten Dokumente sind folgende:

- Effektives Wärmeleitfähigkeitsmodell für Tiefenschnitte von 40, 60, 80 und 100 m, das vom Geologischen Dienst durch Interpolation auf der Grundlage von Bohrlochprofilen mit berechneten Wärmeleitfähigkeiten erstellt wurde [11],
- Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tiefenstufen (20, 40, 60, 80 und 100 m) und ein 2D-Modell der durchschnittlichen Temperatur in den genannten Tiefenabschnitten (20-100 m) [12],
- Geologische Schnitte [13]
- 3D-Stratigraphiemodell von Maximilian Frick und Kollegen (GFZ Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam, RWTH Aachen, Aachen, Technische Universität Berlin, Freie Universität Berlin, Berlin, Deutschland) - [14]
- Thermohydrodynamisches Modell, das von Maximilian Frick auf der Grundlage eines stratigraphischen Modells erstellt wurde [15].

Trotz einer allgemein guten Datenverfügbarkeit und -qualität ist die Datenlage im Stadtgebiet teilweise sehr heterogen. Während für einige Stadtgebiete detaillierte geologische und hydrogeologische Informationen vorliegen, bestehen in anderen Bereichen Unsicherheiten hinsichtlich der Untergrundverhältnisse.

Dies betrifft insbesondere die Tiefe der Rupelton-Oberkante, die hydrogeologischen Fließverhältnisse sowie anthropogene Einflüsse auf die Untergrundtemperatur (Urban Heat Island Effect).

### 2.3.1 Stratigraphisches Modell und geologische Schnitte

Das stratigraphische Modell wurde mit dem Programm „Qgis2treejs“ in 3D visualisiert (siehe Abbildung 5). Es wurden digitalisierte Schnittstellen des ausgewählten geologischen Schnitts (N2,5) mit senkrechten Schnitten (E08 bis E32) kombiniert und darin eingefügt. Die Visualisierung (siehe Abbildung 6) zeigt eine gute Übereinstimmung beider Interpretationen der geologischen Situation, die nur durch eine lokale Diskrepanz in der Höhe der Geländeoberfläche gestört wird, die voraussichtlich auf die Ungenauigkeit der Digitalisierung der Rastergrundlagen der Schnitte zurückzuführen ist.

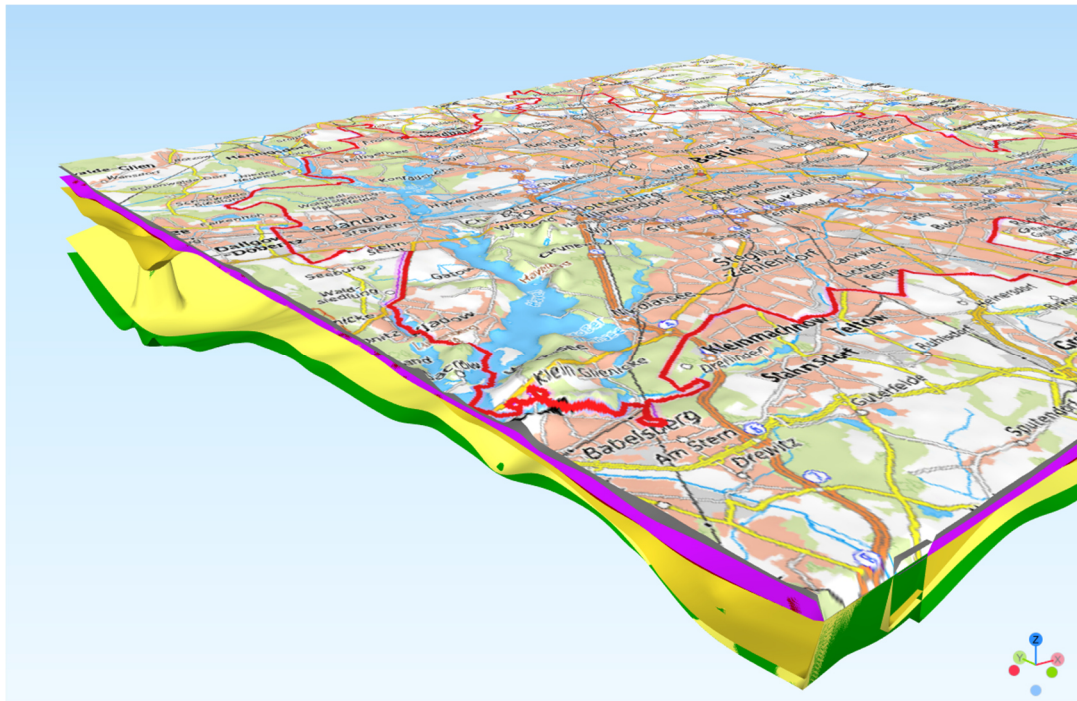


Abbildung 5: Visualisierung des stratigraphischen Modells im Raum Berlin.

Die allgemeine Übereinstimmung zwischen dem stratigraphischen Modell und den geologischen Schnitten ist nicht überraschend, da die Schnitte selbst eine der Grundlagen für das stratigraphische Modell waren [15], zusammen mit Bohrdaten, seismischen Profilen und älteren Modellen. Auf der Grundlage des vorgenommenen Vergleichs und der Methodik der Konstruktion des stratigraphischen Modells kann man zu dem Schluss kommen, dass das stratigraphische Modell mit anderen geologischen Daten konsistent ist und seine 3D-Morphologie einen geeigneten Ausgangspunkt für die Konstruktion eines geothermischen Modells darstellt.

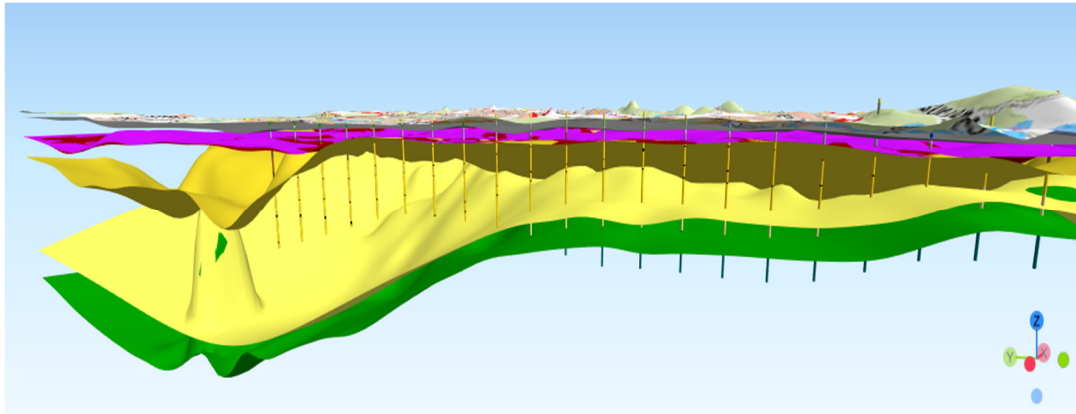


Abbildung 6: Vergleich zwischen dem stratigraphischen Modell und den geologischen Schnitten.

Der Nachteil des stratigraphischen Modells ist der relativ hohe Verallgemeinerungsgrad, der sich in der Reduktion der Gesteinsschichten in stratigraphische Einheiten manifestiert, die es nicht erlauben, die detaillierte Geologie zu erfassen, insbesondere die Ausdehnung der signifikanten Positionen von Braunkohle und Braunkohlenschluff, die deutlich reduzierte Wärmeleitfähigkeitswerte aufweisen.

### 2.3.2 Thermohydrodynamisches Modell

Auf der Grundlage des stratigraphischen Modells hat Dr. Frick ein übersichtliches thermohydrodynamisches Modell in FEFLOW erstellt, das die thermohydrodynamischen Prozesse im gesamten Berliner Gebiet bis zu einer Tiefe von etwa 6 km beschreibt [14]. Obwohl das thermohydrodynamische Modell für die Bewertung des thermischen Potenzials der Erdwärmesonden im ISU5-Block relativ grob ist, stellt es eine wichtige Informationsquelle dar.

Zur Erstellung des Modells wurde eine statistische Auswertung über das Vorhandensein bestimmter Gesteinstypen und ihrer Anteile in den einzelnen stratigraphischen Einheiten durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden durchschnittliche (repräsentative) Werte für physikalische Parameter wie Wärmeleitfähigkeit und -kapazität sowie Porosität stochastisch berechnet (siehe Tabelle 1), die eine grobe Einschätzung pro stratigraphische Einheit ermöglichen.

Tabelle 1: Repräsentative thermohydrodynamische Eigenschaften, die zur Erstellung des thermohydrodynamischen Modells verwendet wurden [14]

Einheit	WLF [W/(m.K)]	Cs [MJ/(m <sup>3</sup> .K)]	Porosität	Kxy [m/s]
1_Holocene	2,71	1,57	0,32	0,00142
2_Saalian	2,59	1,58	0,314	0,000404
3_Holstein	2,17	1,67	0,296	1,91E-06
4_Elsterian	2,35	1,61	0,304	8,98E-05
5_Miocene	2,47	1,56	0,301	6,88E-05
6_Cottbus	2,62	1,7	0,305	0,000115
7_Rupelian	1,64	1,81	0,237	3,23E-06

### 2.3.3 Zusammenfassung und Bewertung der Modellgrundlagen

Die von der Senatsverwaltung (vom Geologischen Dienst) erstellten Tiefenprofilschnitte/Karten der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes [11] sind zweifellos die detailliertesten Daten, die für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Berliner Raum zur Verfügung stehen. Die Wärmeleitfähigkeitskarten sind bis 100 m Tiefe verfügbar und dienen u. a. als Orientierung für die aktuelle Genehmigungspraxis für Geothermie-Bohrungen im Land Berlin. Im Projekt soll eine Tiefe bis max. 400 m betrachtet werden, weshalb es notwendig war, einen geeigneten Weg zu finden, das bestehende Modell auf eine Betrachtungstiefe bis zur Rupelton-Oberkante bzw. bis 400 m Tiefe zu erweitern.

## 2.4 Technische Grundlagen

Oberflächennahe Geothermie nutzt die im obersten Bereich der Erdkruste gespeicherte Wärmeenergie. Die häufigste technische Umsetzung erfolgt über vertikale Erdwärmesonden (EWS), die in Tiefen bis zu 400 m eingebracht werden. In Kombination mit Wärmepumpen ermöglichen sie eine effiziente Beheizung und - bei entsprechender Auslegung - auch Kühlung von Gebäuden.

In Tabelle 2 ist eine Übersicht und ein Vergleich der unterschiedlichen technischen Systeme im Bereich der oberflächennahen Geothermie bis 400 m Tiefe dargestellt. In den Unterkapiteln 2.4.1 bis 2.4.4 werden die in der Studie näher betrachteten technischen Systeme erläutert.

Bei dieser Studie liegt der Fokus auf der Betrachtung von Potenzialen von vertikalen Erdwärmesonden, da diese für den Einsatz in dicht bebauten Gebieten mit einem hohen Wärmebedarf am effizientesten sind. Zusätzlich wurden Erdwärmeebrunnensysteme für die Nutzung in Berlin oberflächlich betrachtet, um eine erste Einschätzung und einen Überblick für Einsatzmöglichkeiten zu bekommen. Erdwärmekollektoren wurde nicht betrachtet, aufgrund der geringen Platzverfügbarkeit im Stadtgebiet Berlins. Energiepfähle und thermisch aktivierte Bauteile wurden ebenfalls nicht betrachtet, da deren Einsatz sehr projektspezifisch und von anderen Parametern ist.

Tabelle 2: Vergleich der unterschiedlichen Technologien für die Nutzung von Oberflächennaher Geothermie

Name	Tiefenbereich	Funktionsweise	Vorteile / Nachteile	Typischer Einsatzbereich
Erdwärmesonden	50–150 m, bis max. 400 m	U-förmige Kunststoffrohre mit Wärmeträgerflüssigkeit zur Wärmeaufnahme aus dem Boden	<input checked="" type="checkbox"/> Für große Gebäude geeignet <input checked="" type="checkbox"/> Bohrgenehmigung erforderlich	Einzelhäuser, große Gebäude, Sondenfelder
Erdwärmekollektoren	1–2 m	Flächige Verlegung von Rohrleitungen zur Wärmeaufnahme aus oberflächennahen Bodenschichten	<input checked="" type="checkbox"/> Günstige Installation <input checked="" type="checkbox"/> Großer Platzbedarf	Gärten, Freiflächen bei Einfamilienhäusern
Energiepfähle	bis ca. 30 m	Betonfundamente mit integrierten Rohrleitungen zur Wärmeabgabe	<input checked="" type="checkbox"/> Kombination von Statik und Geothermie <input checked="" type="checkbox"/> Nur bei Neubauten sinnvoll	Fundamente von Gebäuden, ggf. weiteren Bauwerken (Brücken)
Grundwasserbrunnen (offenes System)	meist <100 m	Förderung und Rückführung von Grundwasser zur Wärmeentnahme über Wärmepumpe	<input checked="" type="checkbox"/> Hohe Effizienz <input checked="" type="checkbox"/> Genehmigung und geeignete Geologie erforderlich	Gebäude, Wärmenetze, Quartiere mit Zugang zu Grundwasser und ausreichenden Flächen
Thermoaktive Bauteile	keine Bohrung nötig	Nutzung von Bauteilen (z. B. Betondecken) zur Speicherung und Abgabe von Wärme/Kälte	<input checked="" type="checkbox"/> Keine Bohrung nötig <input checked="" type="checkbox"/> Geringere Leistung	Kombination mit anderen Systemen in Gebäuden

### 2.4.1 Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden in Bohrungen senkrecht in den Untergrund eingebracht. In den Sonden zirkuliert ein Wasser-Glykol-Gemisch, das dem Untergrund beim Durchströmen Wärme entzieht. Die Tiefe der Bohrungen hängt von den Gesteinseigenschaften, dem Energiebedarf des Verbrauchers und der Betriebsweise ab. Da das Umfeld der Sonden thermisch beeinflusst wird, sind Mindestabstände (6-12 m) zwischen den Sonden zu beachten. Eine gegenseitige Beeinflussung wird somit reduziert.

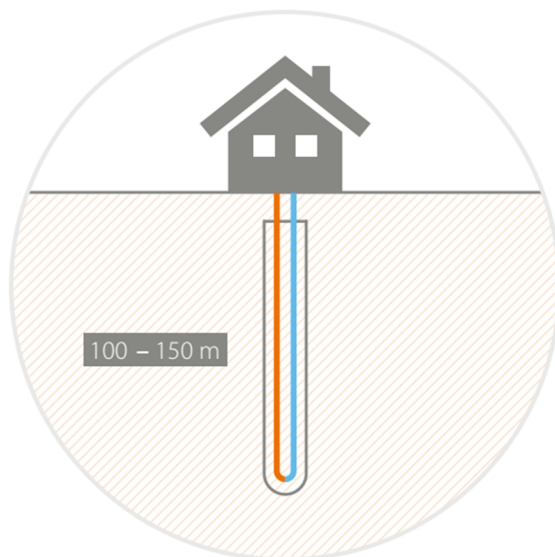


Abbildung 7: Prinzipskizze Erdwärmesondenanlage.

Für die Erschließung des Untergrundes werden Tiefenbohrungen durch ein spezielles Bohrgerät hergestellt. In ein Bohrloch mit 152 mm Durchmesser werden Erdwärmesonden aus PE in Doppel- oder Einfach-U-Form mit einem Außendurchmesser von 32 mm eingebracht. Ab einer Bohrtiefe von ca. 125 m nutzt man zur Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften 40 mm-Sonden, wodurch sich der Bohrlochdurchmesser typischerweise auf 168 mm erhöht. In diesem geschlossenen System zirkuliert ein wasserrechtlich unbedenkliches Wasser-Glykol-Gemisch oder in Sonderfällen reines Wasser als Wärmeträgermedium.

Die Verfüllung des Ringraums erfolgt mit thermisch verbessertem Material, um einen optimalen Wärmeübergang zwischen Erdwärmesonde und Gestein zu ermöglichen.

Als Platzbedarf sind Freiflächen für die Bohrungen erforderlich, welche im Umfeld des Bauvorhabens meist ausreichend zur Verfügung stehen. Bei Bedarf können die Flächen später überbaut werden.

Am Kopf der Bohrung erfolgt ein Anschluss der Erdwärmesonde an jeweils eine horizontale Vor- und Rücklaufleitung. Im Falle einer Doppel-U-Sonde werden beide Kreisläufe zunächst über ein Hosenstück und durch korrosionsfreie Schweißmuffen verbunden.

Bei der Nutzung von mehreren Erdwärmesonden werden die Vor- und Rücklaufleitungen in einem Verteiler- und Sammlersystem zusammengeführt, sodass üblicherweise lediglich jeweils eine Vor- und Rücklaufleitung zum Anschluss an die Wärmepumpe verlegt werden muss. Das eingesetzte Verteilersystem kann entweder in einem speziellen PE- bzw. Betonschacht oder direkt innerhalb des Hausanschlussraums oder einer Heizzentrale platziert werden.

## 2.4.2 Brunnenanlage

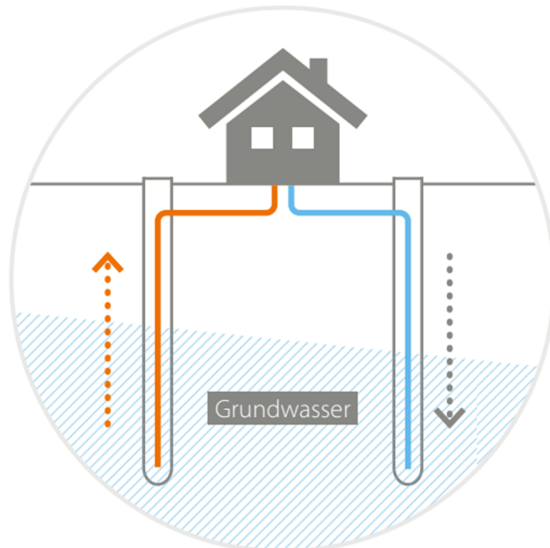


Abbildung 8: Prinzipskizze Erdwärmepumpensystem

Brunnenanlagen sind sehr effizient, erfordern jedoch einen hohen Planungs- und Erkundungsaufwand, da für den Bau umfangreiche Kenntnisse der hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse vor Ort erforderlich sind. Bei Planung, Bau und Betrieb von Brunnenanlagen zur thermischen Nutzung des Untergrunds sind die wasserrechtlichen und bergrechtlichen Vorgaben sowie die jeweiligen landesspezifischen Regelungen zu beachten. Die Anlagen sind nicht wartungsfrei und müssen in regelmäßigen Abständen überwacht werden.

Eine Brunnenanlage zur thermischen Nutzung besteht aus mindestens einem Förder- und einem Schluckbrunnen. Wichtig ist die Beachtung des Abstandes zwischen Entnahme- und Schluckbrunnen sowie die An-

ordnung in Fließrichtung des Grundwassers. Die Leistungsfähigkeit der Brunnenanlage muss die dauerhafte Gewinnung und Rückführung des zur Deckung des Wärme- und/oder Kühlbedarfs erforderlichen Volumenstroms gewährleisten.

### Erdwärmesonden vs. Brunnenanlagen

### Kernbotschaft

Erdwärmesonden sind nahezu immer realisierbar und werden lediglich in wenigen Arealen in Berlin ohne Potenzial für eine effiziente Wärmeversorgung eingeordnet. Zudem ist die Datengrundlage für eine Machbarkeitsprüfung bei Erdwärmesonden außerordentlich gut.

Die Nutzbarkeit von Brunnenanlagen hängt dagegen stark von den konkreten Standortbedingungen ab (insbesondere von der Grundwassersituation, geologischen Bedingungen, Bebauung, Grundstücksgröße und -ausrichtung).

Diese Gegensätze spiegeln sich auch im Genehmigungsverfahren wider. Allgemeine geologische oder hydrogeologische Modelle auf der Stadtebene liefern in der Regel keine ausreichenden Informationen zum Grundwasserfluss, sodass meist frühzeitig im Projektverlauf zusätzliche Erkundungsarbeiten für Brunnensysteme erforderlich sind. Es entstehen höhere Planungskosten und das Risiko, ein Projekt nicht realisieren zu können, bleibt vergleichsweise hoch gegenüber Erdwärmesondensystemen.

### 2.4.3 Wärmepumpe

Der Einsatz von Erdwärme zur Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung stellt eine immer kostengünstigere Möglichkeit der Energieversorgung dar. Über die oben beschriebene Erschließung des Erdreichs wird dem Untergrund Wärme entzogen, die mittels Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau angehoben wird. Für die bereitgestellte Wärmeenergie beträgt der benötigte elektrische Anteil des Wärmepumpenprozesses ca.  $\frac{1}{4}$ .

Analog kann im Falle von Gebäudekühlung das Fluid (Wärmeträgermedium) zur Wärmepumpe geführt und auf das entsprechend kühle Temperaturniveau gebracht werden. Besonders die passive (freie) Kühlung ist als ökonomisch und ökologisch sehr effiziente Nutzung anzusehen, da lediglich geringe Mengen Elektroenergie benötigt werden. Außerdem wird u.a. durch die Gebäudekühle wieder Wärme in den Untergrund eingetragen und nutzbar gemacht.

Um die Effizienz des Systems langfristig zu wahren, muss das Geothermiesystem so dimensioniert werden, dass eine natürliche Regeneration des Untergrundes ermöglicht wird. Sollte diese natürliche Regeneration nicht ausreichen, bestehen weitere Möglichkeiten eine aktiven thermischen Regeneration auf die im weiteren Verlauf eingegangen wird. Ist dies gewährleistet, arbeitet das System ohne Abstriche über einen langen Zeitraum.

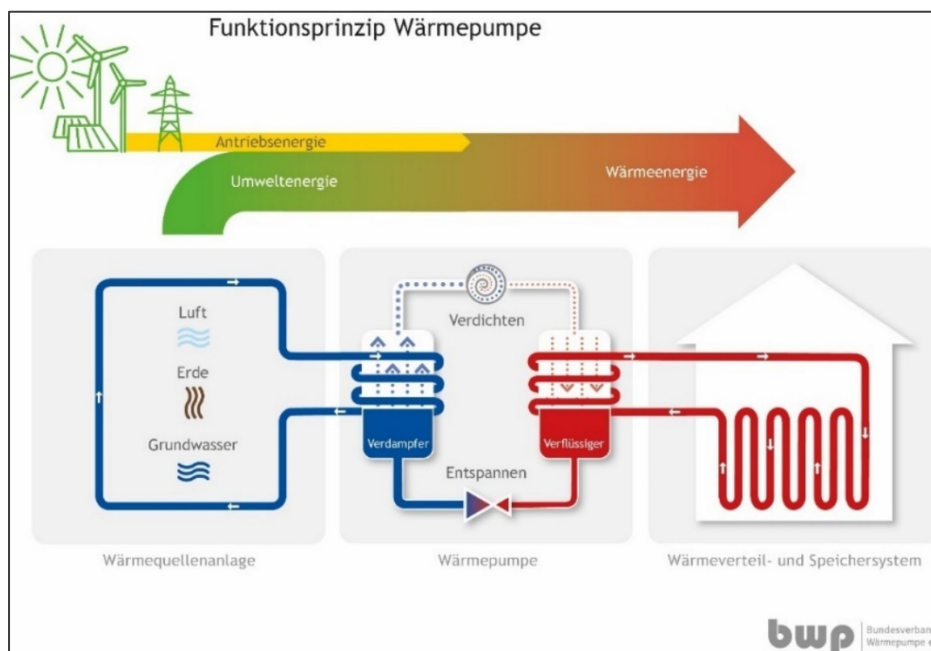


Abbildung 9: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe. [16]

### 2.4.4 Niedertemperaturnetz / Kalte Nahwärme

Bei einem Niedertemperaturnetz handelt es sich um ein Konzept zur Wärmeversorgung über ein lokales Netz, an dem verschiedene Verbraucher und Erzeugersysteme angeschlossen werden. Die Übertragung findet im Vergleich zu Fernwärmenetzen über eine verhältnismäßig geringe Distanz statt, was die Wärmeverluste minimiert. Ein solches Wärmenetz der 5. Generation ist unter verschiedenen Bezeichnungen bekannt: Niedertemperaturnetz, Anergienetz, LowEx-Wärmenetz oder Wärmenetz 5.0 in Anlehnung an die Bezeichnung Wärmenetz 4.0.

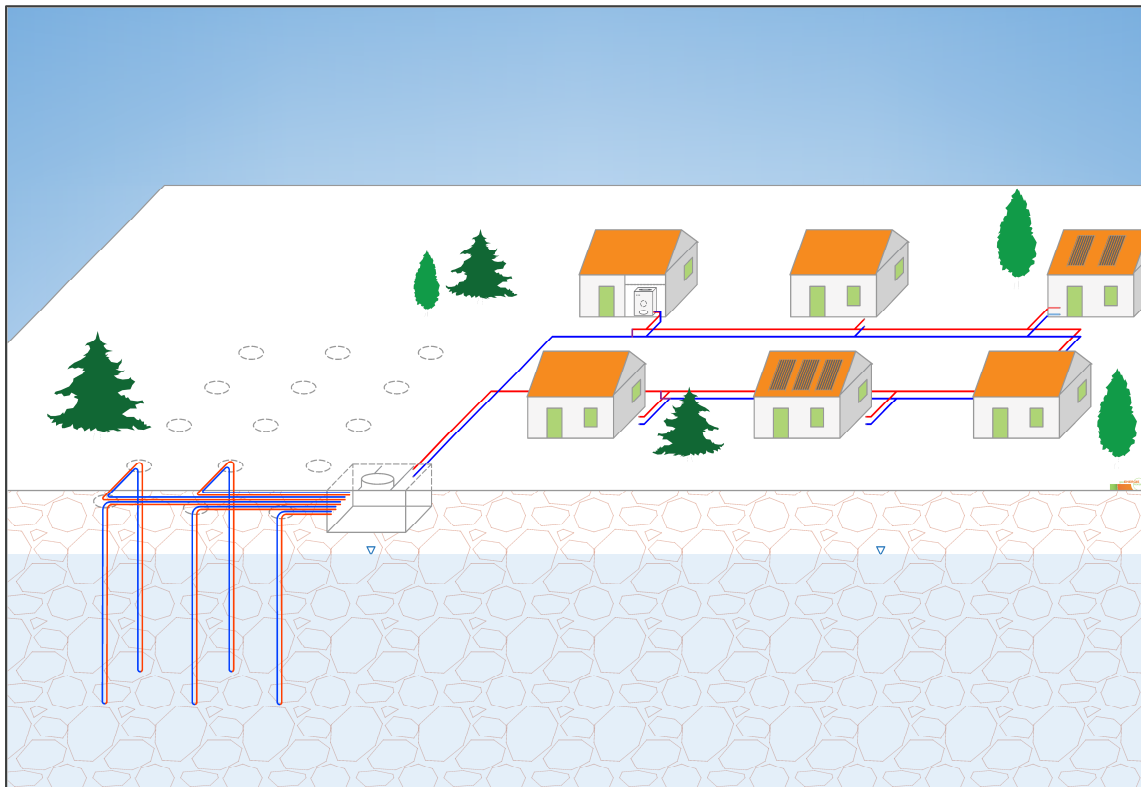


Abbildung 10: Schema eines kleineren kalten Nahwärmenetzes.

Generell zirkuliert in einem Niedertemperaturnetz ein Wärmeträgermedium auf einem niedrigen Temperaturniveau von ca. 5 °C bis 35 °C. Im Vergleich zu herkömmlichen Fernwärmenetzen (50–100 °C) kann bei diesen niedrigen Temperaturen mit ungedämmten Leitungen gearbeitet werden, ohne dass signifikante Wärmeverluste auftreten. Ein weiterer erwähnenswerter Vorteil: Liegt die Wassertemperatur im Rohr bei oder unter der Temperatur des umgebenden Erdreichs, entstehen keine Energieverluste beim Transport – es können sogar „negative“ Verluste erreicht werden, wie sie für Anergienetze typisch sind. Nachteilig wirken sich die geringen Temperaturen lediglich auf die Viskosität des Mediums aus und damit auf den Volumenstrom, sodass mit größeren Leitungsquerschnitten und Umwälzpumpen gearbeitet werden muss.

Moderne Wärmenetze können in unidirektionale und bidirektionale sowie gerichtete und ungerichtete Netze unterteilt werden. In unidirektionalen Netzen wird lediglich Wärme an entsprechende Verbraucher abgegeben, wohingegen in bidirektionalen Wärmenetzen auch Kälte für die Verbraucher bereitgestellt werden kann. Durch den Kältebedarf der Teilnehmer wird Abwärme ins Netz eingespeist, was beispielsweise für eine Regeneration der Geothermieanlage genutzt werden kann. Im Falle der parallelen Nutzung von Wärme und Kälte können zwei getrennt voneinander verlaufende Ringleitungen verlegt werden, wobei das kalte Netz für die Nutzung einer passiven Kühlung ca. 5 bis 10 Kelvin kühler ist als der warme Leiter.

In gerichteten Wärmenetzen wird das Fluid in der Ringleitung durch eine zentrale Umwälzpumpe dauerhaft in einer Richtung zirkuliert. Bei ungerichteten Netzen kann die Fließrichtung durch verschiedene Verbraucher verändert werden.

## 2.5 Potenzialarten und Bewertungsansätze

Zur systematischen Bewertung geothermischer Ressourcen werden in der Fachliteratur verschiedene Potenzialbegriffe unterschieden (vgl. Kaltschmitt et al. [17]):

- **Theoretisches Potenzial:** Gesamte im Untergrund gespeicherte Wärmeenergie.
- **Technisches Potenzial:** Anteil, der mit heutiger Technik unter Berücksichtigung von Einschränkungen (z. B. Bohrtiefe, Ausschlussflächen) nutzbar ist.
- **Wirtschaftliches Potenzial:** Teil des technischen Potenzials, der unter aktuellen Marktbedingungen wirtschaftlich erschließbar ist.
- **Erschließbares Potenzial:** Realisierbarer Anteil unter Berücksichtigung praktischer und administrativer Rahmenbedingungen.

Diese Begriffe bilden die Grundlage für die in dieser Studie angewandte mehrstufige Potenzialermittlung (Abbildung 11).

Es wurden die ersten drei Potenzialebenen nach Kaltschmitt [17] betrachtet. Das erschließbare Potenzial ist zu projektspezifisch und wird im Rahmen der Analyse nicht ermittelt. In dieser Studie wurden die drei Potenzialebenen für die Nutzung von Erdwärmesonden wie folgt festgelegt:

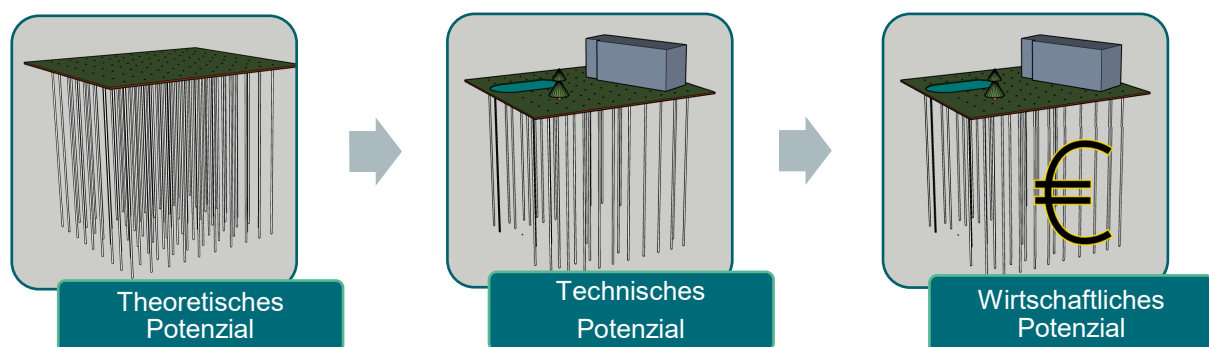


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Beziehung zwischen theoretischem, technischem und wirtschaftlichem Potenzial. Das Diagramm veranschaulicht die hierarchische Ableitung des wirtschaftlich nutzbaren Anteils aus dem gesamten geothermischen Potenzial. Ausgehend vom theoretischen Potenzial werden durch technische und wirtschaftliche Einschränkungen sukzessive realisierbare Teilpotenziale bestimmt.

Das theoretische Potenzial stellt die Wärmeenergie im Untergrund bis 400 m Tiefe bzw. bis zur Rupeltonoberkante dar, die verfügbar wird bei flächendeckender Platzierung von Erdwärmesonden auf der Landesfläche abzüglich der Gewässer- und Friedhofsflächen (definiert durch ISU5-Blöcke) [18]. Das technische Potenzial beschreibt die unterirdische

Wärmeenergie, die unter Einbezug der tatsächlich vorhandenen oberirdischen Freiflächen für die Platzierung von Erdwärmesondenfeldern erschlossen werden kann. Um das wirtschaftliche Potenzial abzuschätzen, werden für alle Flächen mit technischem Potenzial etwaige Wärmegestehungskosten berechnet.

Neben der Analyse des Potenzials auf ISU5-Block-Ebene wurden die genannten Potenziale ebenfalls auf der Ebene von großräumigeren Strukturen betrachtet, um die mögliche Wärmeversorgung über Netzstrukturen näher bewerten zu können.

## **2.6 Herausforderungen im urbanen Raum**

Die Umsetzung geothermischer Systeme im dicht bebauten urbanen Raum wie Berlin ist mit einer Reihe spezifischer Herausforderungen verbunden, die sowohl technischer als auch planerischer Natur sind. Diese Aspekte müssen bei der Potenzialermittlung und der Bewertung der Umsetzbarkeit besonders berücksichtigt werden.

### **2.6.1 Flächenverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen**

In innerstädtischen Lagen ist die Verfügbarkeit geeigneter Freiflächen für die Errichtung von Erdwärmeanlagen stark eingeschränkt. Bebauung, Versiegelung, unterirdische Infrastruktur sowie Baumschutz und Denkmalschutz führen zu einer erheblichen Reduktion der nutzbaren Flächen. Darüber hinaus bestehen Nutzungskonkurrenzen mit anderen unterirdischen und oberirdischen Systemen. Außerhalb der dicht bebauten Innenstadtbereiche nehmen die Freiflächen zu, sodass dort Flächen für geothermische Erschließungen besser verfügbar sind.

Grundsätzlich sind Erdwärmesondenanlagen nach deren Errichtung im späteren Verlauf überbaubar, wobei eine gewisse Überdeckung zwischen Leitungsverbindungen und Gebäude einzuhalten ist. Demnach sind tief eindringende Bauwerke nicht ohne weiteres im Bereich bereits gebauter Erdwärmesondenfelder möglich. Auch aus diesem Grund wird das theoretische Potenzial selbst bei bestehender Bebauung oder Versiegelung angegeben, falls eine Überbauung in Betracht kommen sollte. Bei anderen geothermischen Erschließungssystemen gestaltet sich eine Überbauung schwierig. Flächenkollektoren nutzen insbesondere die Wärme von Atmosphäre, Sonneneinstrahlung und Wasserzutritt und sind daher nicht überbaubar. Offene Systeme (Brunnenanlagen) müssen im Bereich der errichteten Brunnenbohrungen stets revisionierbar und für Wartungen zugänglich sein. Dies sind weitere Gründe, weshalb sich diese Studie überwiegend auf Erdwärmesonden konzentriert.

### **2.6.2 Thermische Wechselwirkungen**

Die zunehmende Dichte geothermischer Nutzungen in urbanen Gebieten führt zu einer potenziellen thermischen Beeinflussung benachbarter Anlagen. Diese Wechselwirkungen können die Effizienz einzelner Systeme beeinträchtigen und langfristig zu einer Übernutzung des Untergrundes führen. Daher sind eine abgestimmte Planung und eine flächenbezogene Betrachtung der Entzugs- und Regenerationsverhältnisse erforderlich.

Bereits jetzt gibt es zahlreiche Erdwärmeanlagen in unmittelbarer Nähe, bei deren Planung diese thermischen Wechselwirkungen im Planungsprozess beachtet werden müssen (siehe Abbildung 12).

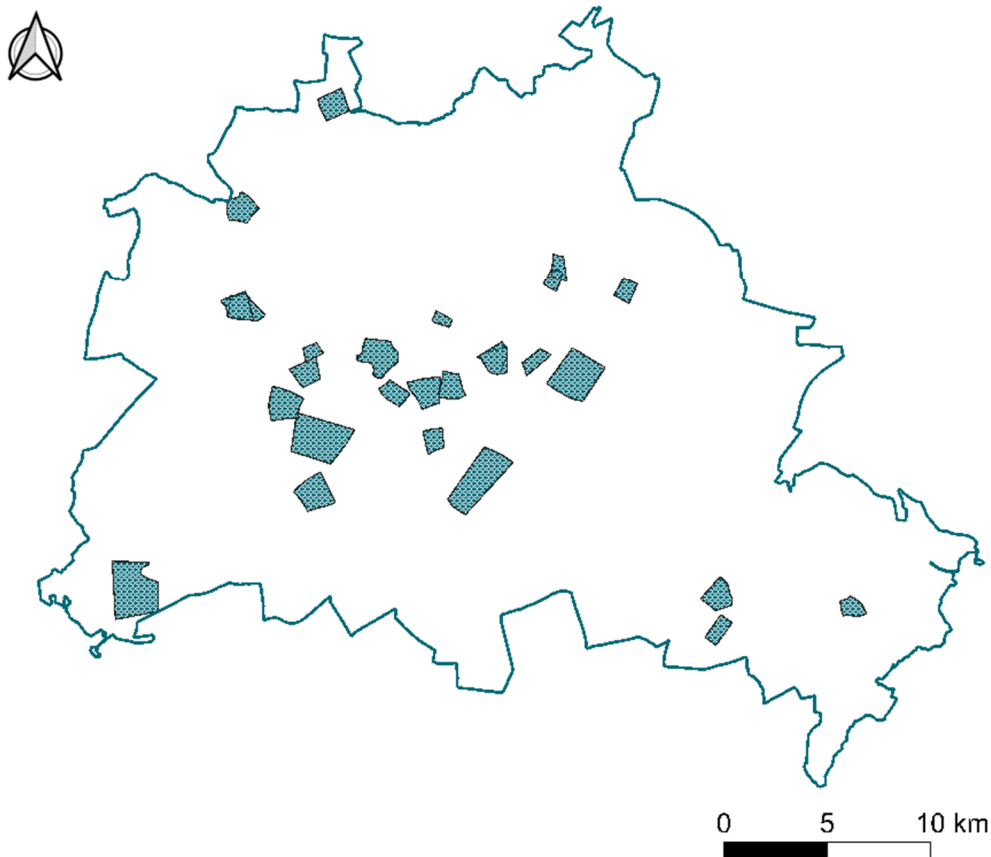


Abbildung 12: Karte der Gebiete in Berlin, für die ein geothermisches Modell von geoENERGIE Konzept erstellt wurde.

Bei größeren geothermischen Anlagen wird eine dreidimensionale Modellierung der thermischen Wechselwirkungen auf die Umgebung als Auflage beim Zulassungsverfahren der Anlage bereits gefordert (siehe 2.6.3). Dabei zeigt sich zunehmend, dass in der Planung einer neuen Anlage bereits bestehende Anlagen beachtet werden müssen. Daher wird der Thematik der gegenseitigen Beeinflussung in der Potenzialanalyse besondere Beachtung bei der Entwicklung der Methodik geschenkt.

### 2.6.3 Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

Die Errichtung von Erdwärmesonden unterliegt in Berlin einer Vielzahl von rechtlichen Vorgaben, insbesondere im Hinblick auf:

- Wasserschutzgebiete und hydrogeologische Schutzbereiche,
- Bohranzeige- und Genehmigungsverfahren,
- Anforderungen an Bohrtechnik und Verfüllmaterialien,
- Sowie die Einhaltung von Mindestabständen zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen.

Diese Vorgaben beeinflussen die technische Machbarkeit erheblich und müssen in der Flächenanalyse berücksichtigt werden.

Anlagen zur Nutzung von Erdwärme bedürfen generell der Anzeige und Genehmigung bei der Unteren Wasserbehörde der Senatsverwaltung (Wasserhaushaltsgesetz). Je nach Nutzungsform der Erdwärme bestehen verschiedene Anforderungen bei der Planung und Beantragung.

Für die Positionierung der Bohrungen ist entsprechend VDI 4640 Blatt 1 ein Grenzabstand von 5 m zu benachbarten Grundstücken anzustreben. Eine Abweichung von dieser Regelung ist möglich. Ein Abstand zu bestehenden Leitungen von 1 m sollte eingehalten werden. Ebenso ist bestehender Baumbestand zu berücksichtigen und Abstände von ca. 1 m außerhalb der Baumkrone einzuhalten.

Der Beginn und die Dokumentationsunterlagen der Bohrungen müssen laut Geologiedatengesetz fristgerecht beim geologischen Dienst angezeigt bzw. übermittelt werden.

Mit zunehmender Anlagengröße ist für die Genehmigungsfähigkeit der geothermischen Nutzung eine möglichst ausgeglichene Balance zwischen Wärmeentzug und Wärmeeintrag (Heizen und Kühlen) vorzusehen und wird durch die Forderung einer dreidimensionalen thermohydrodynamischen Modellierung als Auflage überprüft. Damit soll der thermische Einfluss auf den Untergrund in der Nachbarschaft der Anlage minimiert werden. Außerdem kann durch eine thermische Balance die Effizienz des Systems deutlich gesteigert werden. Durch die intensive städtische Nutzung (Versiegelungsgrad, Heizungskeller, Tiefgeschoss) ist die Temperatur im Berliner Grundwasser bereits angestiegen. Aus diesem Grund wird in Berlin ein überwiegender Eintrag von Wärme aus geothermischer Gebäudekühlung oder weiteren Abwärmeeinheiten in den Boden und in das Grundwasser nicht zugelassen.

Zu den genehmigungsrechtlichen Anforderungen hat die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz ein Merkblatt (Stand Januar 2022) veröffentlicht. Grundwasserbenutzungen bedürfen nach § 8 WHG einer wasserbehördlichen Erlaubnis. Diese ist bei der Wasserbehörde der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz zu beantragen.

Derzeit sind für das Bundesland Berlin ausschließlich Bohrtiefen zur geothermischen Nutzung von bis zu 100 m zugelassen. Eine tiefere Erschließung des Untergrundes ist demnach zum Stand der Erstellung des Berichts nicht möglich. Jedoch ist eine Novellierung dieser Bohrtiefenbegrenzung derzeit in Bearbeitung.

Sollten zukünftig Bohrtiefen von mehr als 100 m in Berlin zulässig sein, sind weitere Anforderungen in Genehmigungsverfahren zu beachten und insbesondere die Vorgaben nach Bundesrecht zu erfüllen. Dabei gelten zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Bestimmungen des Standortauswahlgesetzes (StandAG) für Bohrungen ab einer Tiefe von 100 m, welche einer Zustimmung des BASE, Bundesamt für Endlagersicherheit bedürfen.

## 2.7 Innovative Ansätze

Neben klassischen vertikalen Erdwärmesonden werden zunehmend alternative Erschließungskonzepte diskutiert, etwa die Nutzung öffentlicher Räume (z. B. Gehwege) oder die Erschließung unter Bestandsgebäuden. Auch die Integration in kalte Nahwärmenetze gewinnt an Bedeutung und wird im Rahmen dieser Studie konzeptionell mitbetrachtet.

Die oberflächennahe Geothermie bietet ein enormes Potenzial für die nachhaltige Wärmeversorgung, insbesondere in dicht besiedelten urbanen Räumen. Aufgrund der begrenzten

Flächenverfügbarkeit und der komplexen baulichen Strukturen in Städten sind innovative technische Lösungen in der Analyse erforderlich, um die Nutzung geothermischer Energie effizient und flächensparend zu gestalten. Ein zentrales Element sind dabei die Erdwärmesonden, die in vertikaler oder schräger Anordnung in den Untergrund eingebracht werden.

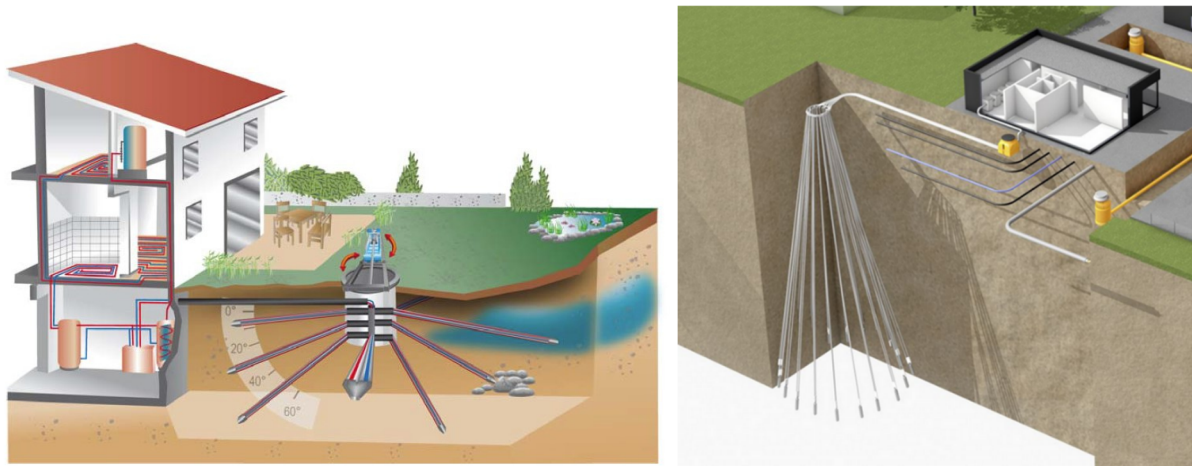


Abbildung 13: Schema von Geothermal Radial Drilling (links) [19], Geostar-System des Fraunhofer IEG (rechts) [20]

Ein innovatives Verfahren stellt das sogenannte Geothermal Radial Drilling (GRD, Abbildung 13, links) dar. Dabei werden Erdwärmesonden strahlenförmig und dreidimensional in einem Winkel von 10° bis 60° zur Vertikalen eingebracht. Diese Technik erlaubt eine optimale Ausnutzung der Grundstücksfläche und ermöglicht die gezielte Erschließung weiterer Bodenschichten. [21] Ein Beispiel für dieses Verfahren ist das Projekt GeoStar 2.0 des Fraunhofer IEG (Abbildung 13, rechts), bei dem an der Hochschule Bochum zwölf Sondensysteme mit je 150 Metern Tiefe sternförmig installiert wurden. [20]

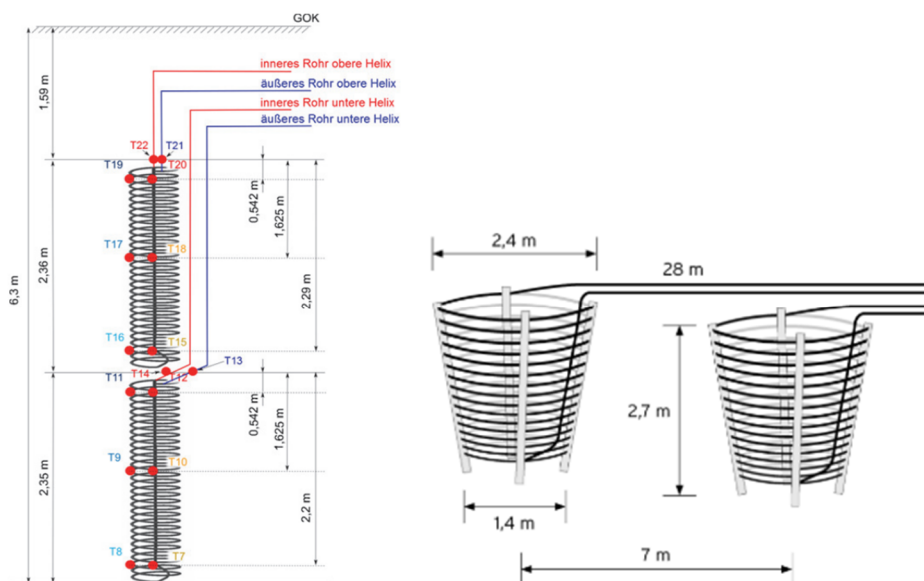


Abbildung 14: Skizzen Spiralsonde (links) und Erdwärmekorb (rechts) [19]

Ein ähnliches Verfahren erlaubt die Kombination mehrerer Bohrpfade von einem zentralen Schacht aus. [22], [23]

Neben den klassischen Sonden kommen auch Spiralsonden und Erdwärmekörbe (Abbildung 14) zum Einsatz. Diese Systeme stellen eine Kombination aus vertikalen Sonden und horizontalen Flächenkollektoren dar und eignen sich besonders für den Einsatz in Wasserschutzgebieten. Sie sind kostengünstig in der Installation, benötigen jedoch mehr Fläche und sind hydraulisch schwerer zu regeln [19], (VDI 4640, 2023). Der Bundesverband Geothermie sieht in dieser Technologie weiteres Potenzial zur Effizienzsteigerung.

Ein weiteres zukunftsweisendes Konzept ist das dänische Projekt „Thermoroad“, bei dem geothermische Rohrleitungen in den Straßenunterbau integriert werden. Die Infrastruktur dient gleichzeitig als geothermische Quelle und als Regenwasserrückhalte- sowie Entwässerungssystem. Zusätzlich wird Abwärme aus Abwasserleitungen genutzt. [24], [25], [26] In Horsens wurde 2024 ein Prototyp in Betrieb genommen, der als Blaupause für weitere urbane Anwendungen dienen könnte. [26]

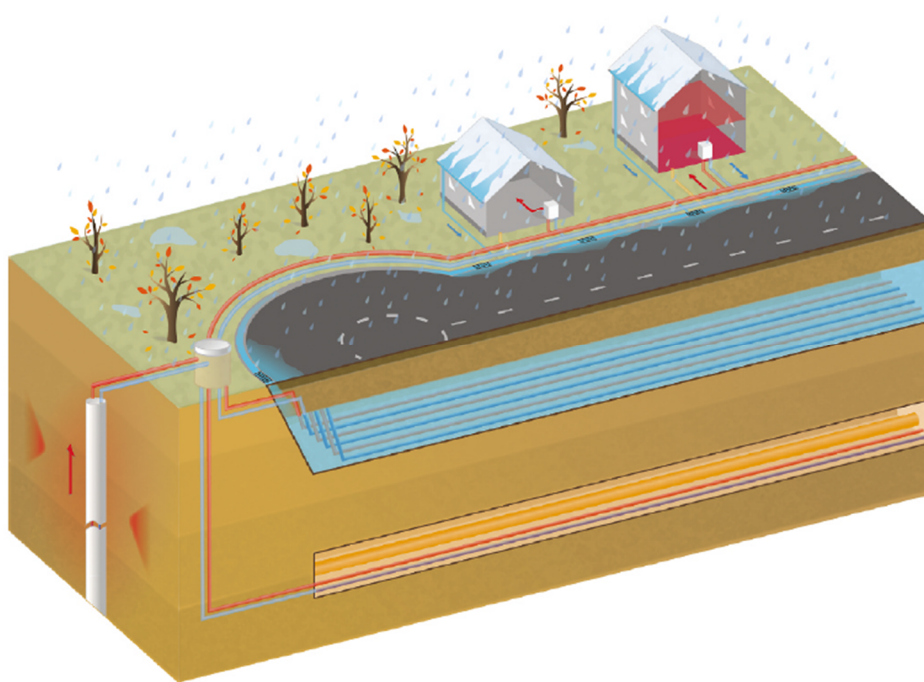


Abbildung 15: Schema Thermoroad (Thermostraße) Fernwärme und Fernkälte [24]

Diese innovativen Ansätze zeigen, dass die oberflächennahe Geothermie nicht nur technisch weiterentwickelt, sondern auch systemisch in urbane Infrastrukturen integriert werden kann.

Im Rahmen dieser Studie wird als innovativer Ansatz die Nutzung von geneigten (schrägen) Bohrungen mit geringfügigem Winkel (Inklination) betrachtet, um die Fläche unterhalb von Gebäuden zu erschließen. Außerdem wird die Nutzung von weiteren Flächen im öffentlichen Raum, wie Gehwegen, diskutiert.

### 3 Methodik

Die Potenzialanalyse erfolgt in einem modularen, schrittweisen Verfahren, das auf der Kombination geowissenschaftlicher, energetischer und planerischer Daten basiert. Ziel ist es, das theoretische, technische und wirtschaftliche geothermische Potenzial für Erdwärmesonden im Stadtgebiet Berlins systematisch zu erfassen und räumlich differenziert darzustellen. Die Schritte zur Potenzialermittlung sind in Abbildung 16 kurz aufgelistet und werden in diesem Kapitel detailliert erläutert.

Für Berlin eignet sich die Technologie der Erdwärmesonden aus dem Bereich der Oberflächennahen Geothermie bei einer regionalen Analyse am besten, da diese platzsparend, effizient und für größere Gebäude geeignet ist (Siehe Kapitel 2.4.1). Es werden zusätzlich innovative Ansätze betrachtet sowie ein Überblick zum Potenzial von Erdwärmesonden-Systemen gegeben.

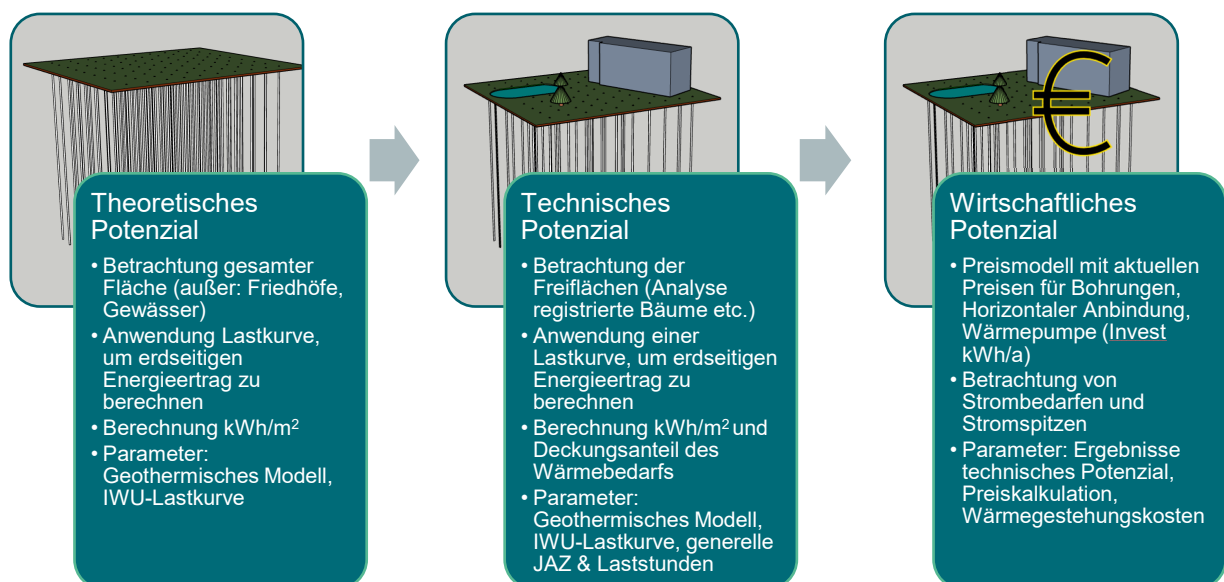


Abbildung 16: Schematische Darstellung der drei Potenzialtypen im Rahmen der Potenzialanalyse – theoretisch, technisch und wirtschaftlich. Die Abbildung zeigt die methodische Abgrenzung und die jeweils berücksichtigten Parameter zur Ermittlung des geothermischen Potenzials. Während das theoretische Potenzial auf der Gesamtfläche basiert, berücksichtigt das technische Potenzial nutzbare Freiflächen unter Ausschluss von Hindernissen wie Bäumen. Das wirtschaftliche Potenzial ergänzt die Analyse um Investitions- und Betriebskosten.

Die nachfolgenden methodischen Schritte beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsphasen für die Potenzialermittlung in Berlin mit dem Fokus auf die Nutzung von Erdwärmesondenanlagen.

### 3.1 Eingangsdaten

Für die Durchführung der Potenzialanalyse für oberflächennahe Geothermie im Stadtgebiet Berlins werden eine Vielzahl raumbezogener, geologischer, energetischer und technischer Datensätze verwendet. Diese bilden die Grundlage für die Modellierung, Bewertung und Visualisierung des geothermischen Potenzials:

Geologische und hydrogeologische Daten

- 3D-Stratigraphiemodell Berlin [14]
- Geologische Schnitte und Karten [27]
- Bohrdaten und Bohrkataloge [28]
- Hydrogeologische Modelle [15]
- Temperaturprofile und geothermischer Gradient [12]
- Tiefenschnitte der Wärmeleitfähigkeit und Temperaturverteilung [11]

Flächen- und Nutzungsdaten

- ISU5-Blockstruktur (Standardblocksystem für Berlin) [18]
- Gebäudegrundrisse und -nutzungen [29]
- Ausschlussgebiete (z. B. Schutzgebiete, Infrastruktur, Baumbestand) [30], [31], [32], [33]

Energetische Daten

- Wärmebedarfsdaten
- Relative Lastkurven
- Verhältnis von Wärme- und Kältebedarf

Weitere Quellen

- Unternehmensinterne Messdaten (TRT, Temperaturprofile)
- Ergebnisse aus Forschungsprojekten (z. B. WärmeGut, GeoPLASMA-CE) [34], [35]
- Veröffentlichte und unveröffentlichte Studien zur Geothermie in Berlin [36], [37], [38], [39]

## Infobox

### Hinweis zur räumlichen Bezugsgröße - ISU5-Blöcke

Die **ISU5-Blöcke** stellen die grundlegende **räumliche Diskretisierungseinheit** der gesamten Potenzialanalyse dar. Sie bilden die kleinste einheitlich bewertete Flächeneinheit und dienen als **maßgebliche Größeneinheit für die Modellierung, Bewertung und Aggregation** aller relevanten Parameter.

Die Eingangsdaten wurden entweder:

- **Direkt blockweise bereitgestellt**, z. B.:
  - Wärmebedarfsdaten (vom Auftraggeber)
  - Gebietstypen (GRZ-Klassen)
- Oder **auf ISU5-Ebene umgerechnet**, z. B.:
  - Geothermische Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Temperatur, Wärmekapazität)
  - Hydrogeologische Kenngrößen (z. B. Flurabstand, Transmissivität, Peclet-Zahl)
  - Fernwärmeversorgungsgebiete
  - Ausschlussflächen (Gebäude, Bäume, Infrastruktur)

Diese Struktur gewährleistet eine konsistente, flächendeckende und vergleichbare Bewertung des geothermischen Potenzials im gesamten Stadtgebiet Berlin.

## 3.2 Analyse der Ausschlussflächen

Ziel der Ausschlussflächenanalyse ist die Identifikation jener Teilflächen innerhalb der ISU5-Blöcke (insgesamt 26 426 Blöcke), die aus technischen oder rechtlichen Gründen nicht für die Errichtung von Erdwärmesonden (EWS) geeignet sind. Diese Analyse bildet die Grundlage für die Ermittlung des technischen Potenzials (= Freiflächenanalyse).

### 3.2.1 Theoretisches Potenzial

Für die Ermittlung des theoretischen Potenzials wurde die volle Fläche aller ISU5-Blöcke berücksichtigt, mit Ausnahme der Blöcke mit den folgenden Gebietsrestriktionszonen (GRZ):

- GRZ 110: Wasserflächen
- GRZ 150: Friedhöfe

→ Anzahl berücksichtigter Blöcke: 25.506

### 3.2.2 Technisches Potenzial

Für die Analyse des technischen Potenzials wurden zusätzlich folgende GRZ-Kategorien ausgeschlossen:

- GRZ 100: Verkehrsflächen
  - GRZ 160: Kleingartenanlagen
  - GRZ 200: Landwirtschaftliche Flächen
- Anzahl berücksichtigter Blöcke: 21.861

Zusätzlich gab es noch Abzugsflächen innerhalb der Blöcke:

- Gebäudegrundflächen inkl. 2 m technischer Puffer (z. B. für Bohrgerätezugang)
- Wasserflächen und Fließgewässer inkl. 2 m technischer Puffer
- Registrierte Bäume (Datenquellen: *Straßenbäume* und *Anlagenbäume* der Stadt Berlin)
  - Baumfläche als Kreis mit dem in der Datenbank angegebenen Kronenradius
  - Falls kein Radius vorhanden: Standardradius von 1 m
- Verkehrsstrassen (Schienenverkehr, Straßenbahn, U-Bahn) inkl. Pufferzonen gemäß:
  - Quelle: Masterarbeit Armin Kick (2025), TU Berlin [38]
  - Beispielhafte Werte (siehe Tabelle 3)

Tabelle 3: Breiten und Pufferzonen von Verkehrsstrassen

Verkehrsstraße	Verkehrsflächenbreite [m]	Pufferzone [m]
<b>S-Bahn, eingleisig</b>	3,5	2
<b>S-Bahn, zweigleisig</b>	7,5	2
<b>Güterverkehr, eingleisig</b>	3,5	2
<b>Güterverkehr, zweigleisig</b>	7,5	2
<b>Eisenbahn, eingleisig</b>	3,5	2
<b>Eisenbahn, zweigleisig</b>	7,5	2
<b>Straßenbahn, eingleisig</b>	2,4	0
<b>Straßenbahn, zweigleisig</b>	5,3	0
<b>U-Bahn, eingleisig</b>	7	1
<b>U-Bahn, zweigleisig</b>	14	1

### 3.2.3 Interessenskonflikte

Auf ausdrücklichen Wunsch des Auftraggebers wurden rechtliche Einschränkungen (wie z. B. Wasserschutzgebiete, Denkmal- und Ensembleschutz etc.) nicht in die Ausschlussflächenanalyse für das technische Potenzial einbezogen.

Diese Aspekte wurden stattdessen als Konfliktpotenziale separat dokumentiert, da sich deren Relevanz und Lokalität zukünftig ändern kann (siehe Tabelle 4). Es wurde eine separate Karte mit diesen Konfliktpotenzialen erstellt (siehe Abbildung 17).

Da es sich insbesondere bei Wasserschutzgebieten um signifikante Einflussfaktoren im Genehmigungsrecht handelt, sind die Aussagen bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt mit zu beachten.

Tabelle 4: Darstellung, Einteilung und Bewertung der Konfliktrisikokategorien in Berlin.

Kategorie	Konflikt	Wertung
<b>Genehmigungsrechtliches Konfliktrisiko</b>	Wasserschutzgebiet	Ausschlussgebiet
	Denkmalschutz	Einzelfallprüfung
	Schutzgebiet	
	Überschwemmungsgebiet	
	Bergbauberechtigung für Erdwärme und Sole	
<b>Hydrogeo-/geologisches Konfliktrisiko</b>	Hydrogeologische Verhältnisse	Einschränkungen
	Geologische Verhältnisse	

In Anlehnung an die Berliner Windpotenzialstudie [40], wurde hier eine ähnliche Vorgehensweise angewandt, um die Konfliktrisikokategorien für die geothermische Nutzung des Untergrundes zu klassifizieren. Die Unterteilung erfolgte in zwei Kategorien: Genehmigungsrechtliches und Hydrogeo-/geologisches Konfliktrisiko. Die einzelnen Konflikte sind dementsprechend aufgeteilt und bewertet wurden. Die Wertung erfolgte nicht wie bei der Windstudie von sehr gering bis sehr hoch, da oftmals eine Detailanalyse nötig ist, um das Ausmaß des Konfliktpotenzials einschätzen zu können. Es wurde daher eine Wertung in folgende drei Gruppen durchgeführt:

- **Ausschlussgebiet:** Installation ist nach den aktuellen Gesetzen nicht möglich/nicht zulassungsfähig
- **Einzelfallprüfung:** Detailanalyse ist erforderlich, um Zulassung zu prüfen und mögliche Auflagen zu bestimmen
- **Einschränkungen:** Detailprüfung ist erforderlich, um natürliche Einschränkungen zu eruieren (z.B. Bohrtiefenbeschränkung) und Zulassung zu prüfen sowie mögliche Auflagen zu bestimmen

Aus dieser Wertungsskala wurde eine Ampelkarte für Berlin erstellt (siehe Abbildung 17), die unbedingt zusätzlich zu den Potenzialkarten betrachtet werden muss, um mögliche Konflikte bei weiterführenden Schritten mit betrachten zu können.

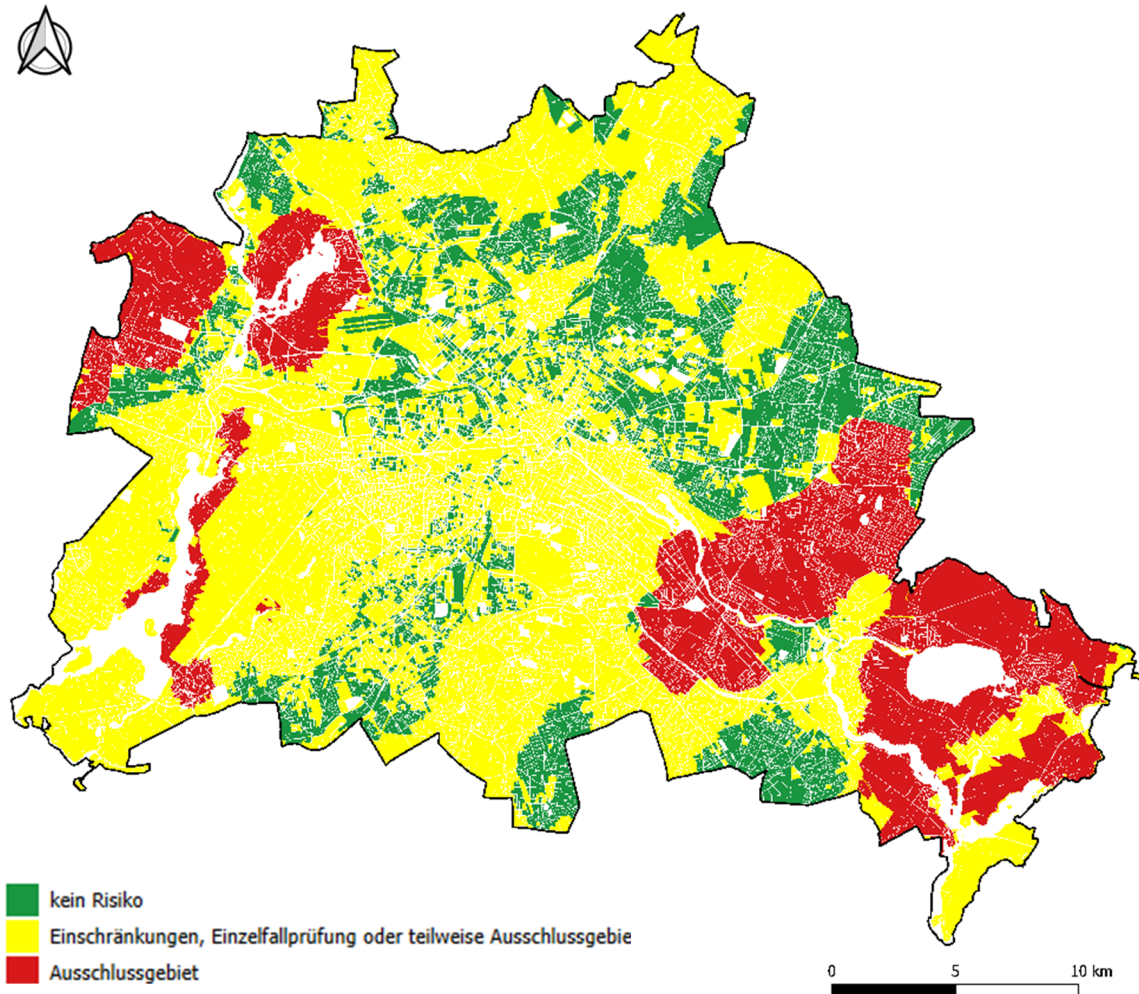


Abbildung 17: Entwickelte Ampelkarte mit Darstellung der Konfliktrisikokategorien für Berlin.

### 3.3 Aufbau des geothermischen Modells

Die Erstellung eines geothermischen Modells für den Raum Berlin ist notwendig, um das thermische Potenzial geschlossener Systeme (Erdwärmesonden) der oberflächennahen Geothermie bewerten zu

max. 400 m Tiefe betrachtet. Die Darstellung erfolgt auf der Ebene der ISU5-Blöcke, die die Stadtstruktur Berlins abbilden.

Die Simulation der Erdwärmesonden wird in drei Szenarien durchgeführt: Zum einen wird die Nutzung der Sonden rein zum Heizen abgebildet und zum anderen eine Nutzung als Thermischer Speicher mit 50%iger und 100%iger Auslastung dargestellt.

Das geothermische Modell soll die thermischen Eigenschaften und Temperaturbedingungen für unterschiedliche Tiefenstufen und auf Blockebene abbilden mit jeweils folgenden Parametern:

- Effektive\* Wärmeleitfähigkeit
- Effektive\* Wärmekapazität
- Effektive\* Temperatur

Der \*effektive Wert ist der Durchschnittswert eines bestimmten Parameters zwischen der Bodenoberfläche und der jeweiligen Tiefenstufe. Die Berechnung für die effektive Wärmeleitfähigkeit und die effektive Wärmekapazität basiert auf dem Durchschnitt der Werte der einzelnen Modellelemente als gewichtetes Mittel unter Einbezug der Schichtmächtigkeiten und Gesteinszusammensetzung. Die effektive Temperatur wird über die Entwicklung der gegebenen Temperatur im Verhältnis zur gesamten Mächtigkeit der Schichten (Tiefe) der gegebenen Ebene berechnet (Riemann-Integral).

Das geothermische Modell für dieses Projekt ist ein 2,5D-Modell der grundlegenden geothermischen Parameter, die zur Berechnung des thermischen Potenzials der einzelnen ISU5-Blöcke benötigt werden (Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Temperatur etc.).

Der in dieser Studie geforderte Detaillierungsgrad für die Bewertung des thermischen Potenzials ist die städtische Struktur (ISU5-Blöcke). Das Modell wird daher horizontal in die entsprechenden ISU5-Blöcke und vertikal in Tiefenstufen von 100, 150, 200, 300 und 400 m diskretisiert. Zusätzlich wird eine Darstellung bzw. Ebene angefertigt mit variabler Mächtigkeit (Tiefe), um die effektiven Werte aller Parameter von der Geländeoberfläche bis zur Oberkante des Rupeltons zu zeigen.

#### 3.3.1 Modell der Wärmeleitfähigkeit - Modell WLF-K

Das Modell zur effektiven Wärmeleitfähigkeit wurde aus einer Kombination des Modells des Geologischen Dienstes und einem konstruierten Modell, bei dem das stratigraphische und thermohydrodynamische Modell von Frick et al. [14] als Grundlage dienen.

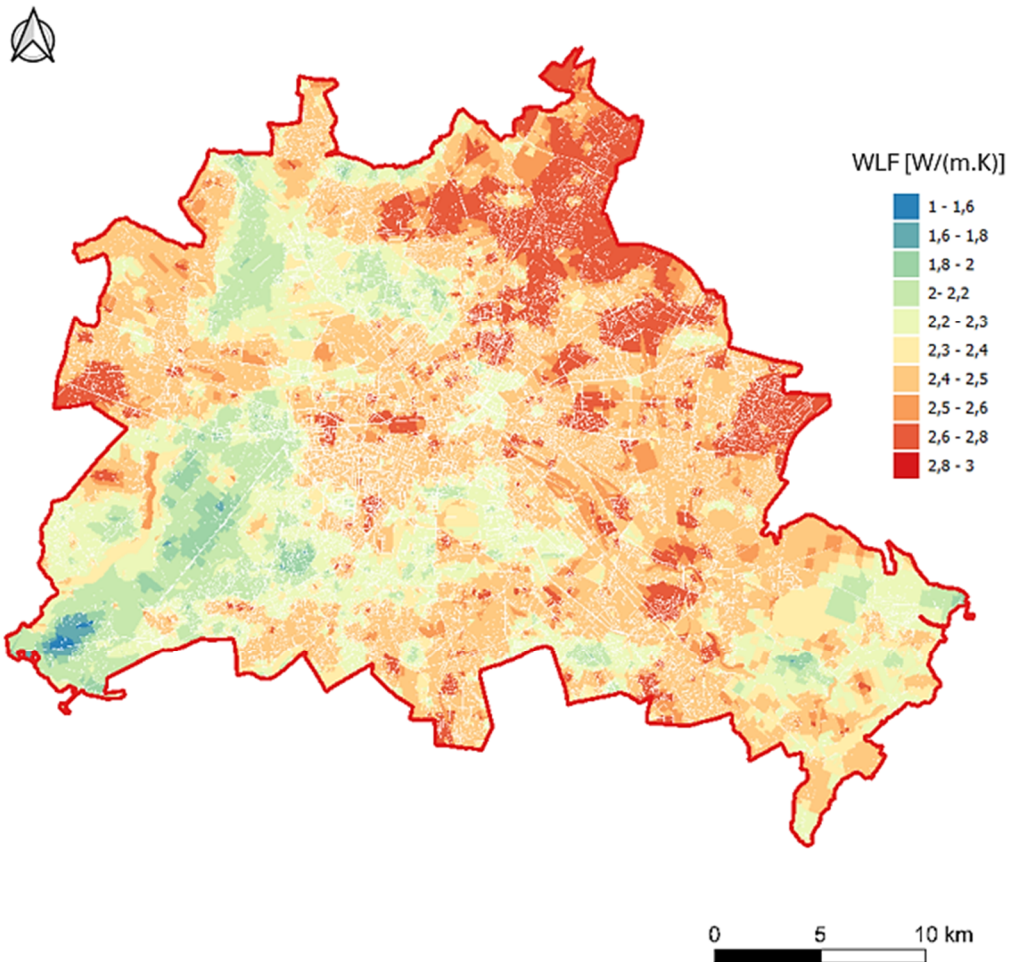


Abbildung 18: Tiefenschnitt der effektiven Wärmeleitfähigkeit nach dem Modell WLF-GD für die 100 m-Ebene

In einem ersten Schritt wurden die Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die durch den Geologischen Dienst [11] erstellt wurden, mit Hilfe einer zonale Analyse auf die ISU5-Blockebene diskretisiert (Modell WLF GD). Die Abbildung 18 zeigt den Tiefenschnitt für die 100 m-Ebene.

Das Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit vom Geologischen Dienst ist angesichts der Solidität der verwendeten Daten die zuverlässigste Informationsquelle bis zu einer Tiefe von 100 m, was mit der wiederholten praktischen Anwendung der Daten korreliert. Es liefert jedoch keine Informationen über tiefere Bereiche, die Gegenstand dieser Studie sind.

Um das thermische Potenzial auch unterhalb der 100-m-Grenze zu bestimmen, ist es notwendig, das Modell auf die Tiefe auszuweiten. Insgesamt sind das stratigraphische und das thermodynamische Modell von Frick et al. [15] eine geeignete Grundlage dafür.

Als nächster Schritt wurde dementsprechend ein Wärmeleitfähigkeitsmodell unter Einbindung des Stratigraphischen Modells und der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeitswerte der einzelnen stratigraphischen Einheiten erstellt (Modell WLF-S).

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wurde nach der folgenden Formel bestimmt:

$$\lambda_{ef} = \frac{\sum \lambda_i M_i}{\sum M_i}$$

$\lambda_{ef}$  ... effektive Wärmeleitfähigkeit der Tiefenstufe

$\lambda_i$  ... Wärmeleitfähigkeit der stratigrafischen Einheit i

$M_i$  ... Mächtigkeit der stratigrafischen Einheit i innerhalb der Tiefenstufe

Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 als Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für die Ebenen 100 m, 150 m, 200 m und 300 m dargestellt.

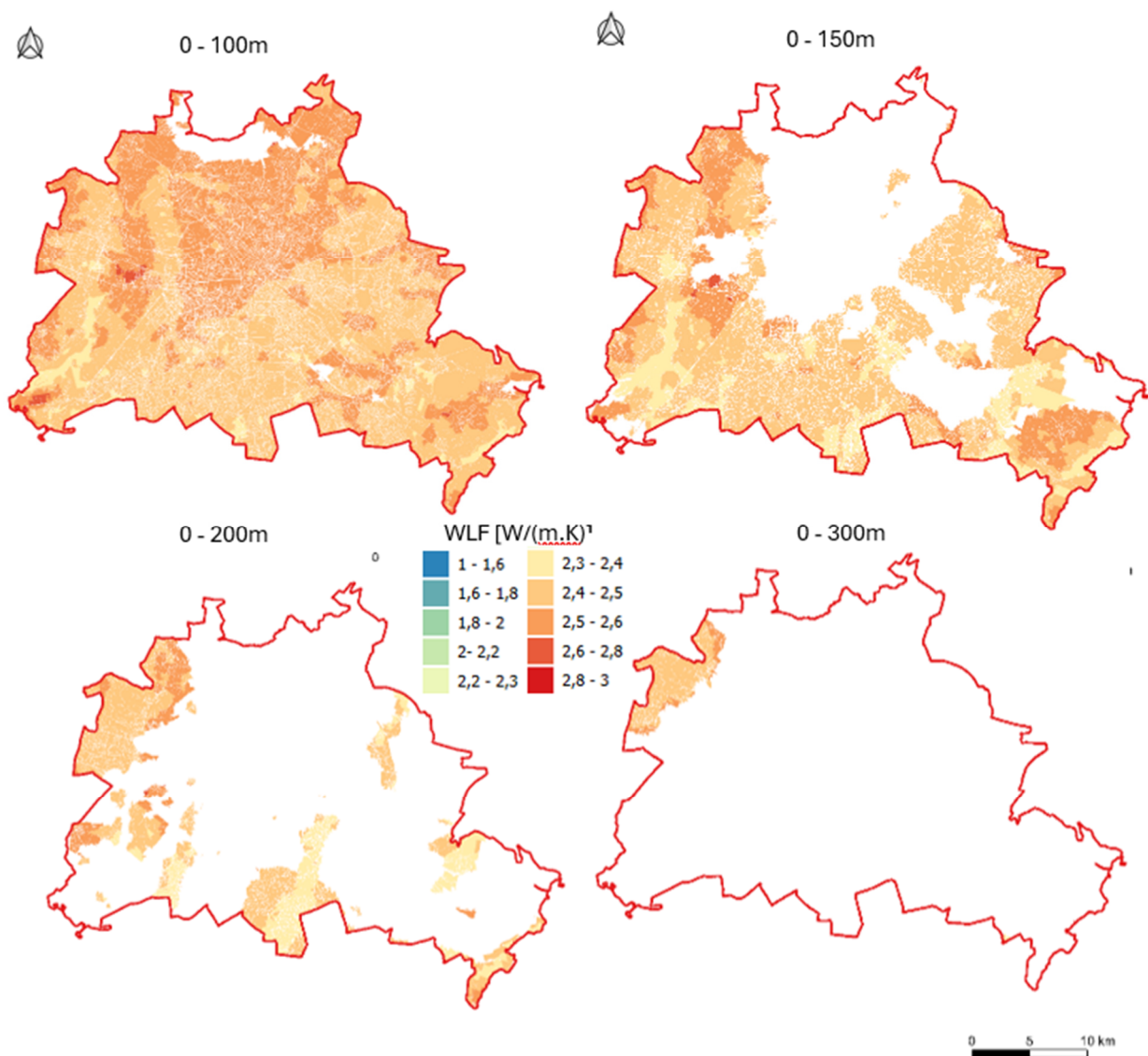


Abbildung 19: Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für die Niveaus 100 m, 150 m, 200 m, 300 m und 400 m nach dem WLF-S-Modell.

Die entsprechenden Flächen sind jeweils dort analysiert, wo Lockergesteinsbereiche oberhalb des Rupeltons in entsprechender Mächtigkeit vorliegen.

Das Modell WLF-S weist im Vergleich zum Modell WLF-GD eine geringere Streuung der Werte auf (Abbildung 20), was auf die Art und Weise zurückzuführen ist, wie es aufgebaut ist.

Die Verwendung von Durchschnittswerten für Gesteinseinheiten auf der Ebene der stratigraphischen Einheiten ermöglicht keine detailliertere Erfassung der lokalen geologischen Bedingungen, die sich erheblich von der typischen lateralen Entwicklung der Einheit unterscheiden.

Dies wird besonders im südwestlichen Teil des Berliner Gebiets deutlich, wo das WLF-GD-Modell deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeitswerte zeigt, die offenbar mit stärker ausgeprägten Braunkohle- oder Braunkohle-Schluffen korrelieren. Vergleichbare Werte (d. h. etwa  $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) können z.B. nicht modelliert werden, wenn die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit höher als 2 ist.

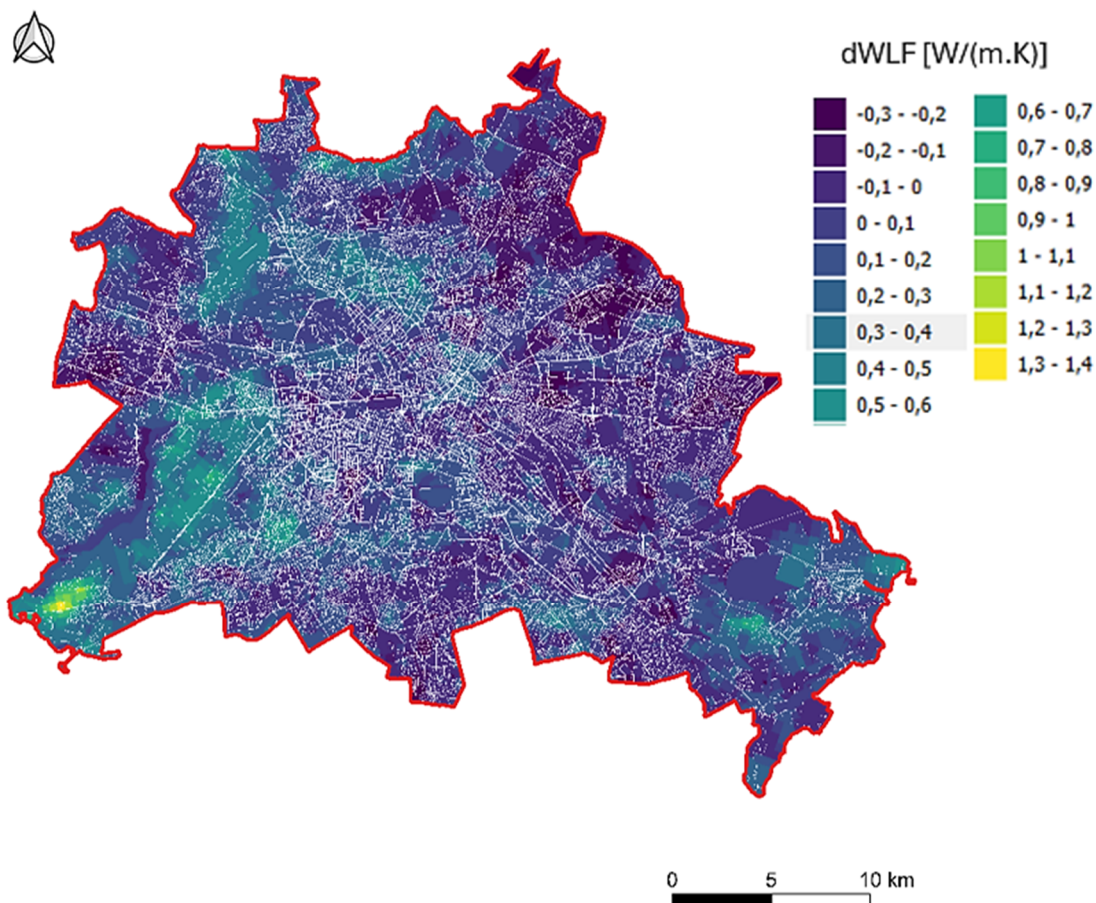


Abbildung 20: Differenz der von den Modellen WLF-GD und WLF-S gelieferten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für eine Tiefenstufe von 100 m.

Der generische Charakter des Modells WLF-S kann korrigiert werden, indem es mit dem Modell WLF-GD kombiniert wird und einen größeren Tiefenbereich ergibt.

Das kombinierte Modell (WLF-K-Modell) wurde wie folgt aufgebaut: Für die oberste Schicht (0-100 m) wurden die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit des WLF-GD Modells im WLF-K Modell verwendet. Für die Schicht unterhalb von 100 m (100 m - gewählte Tiefenstufe) wurden die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Modells WLF-S verwendet.

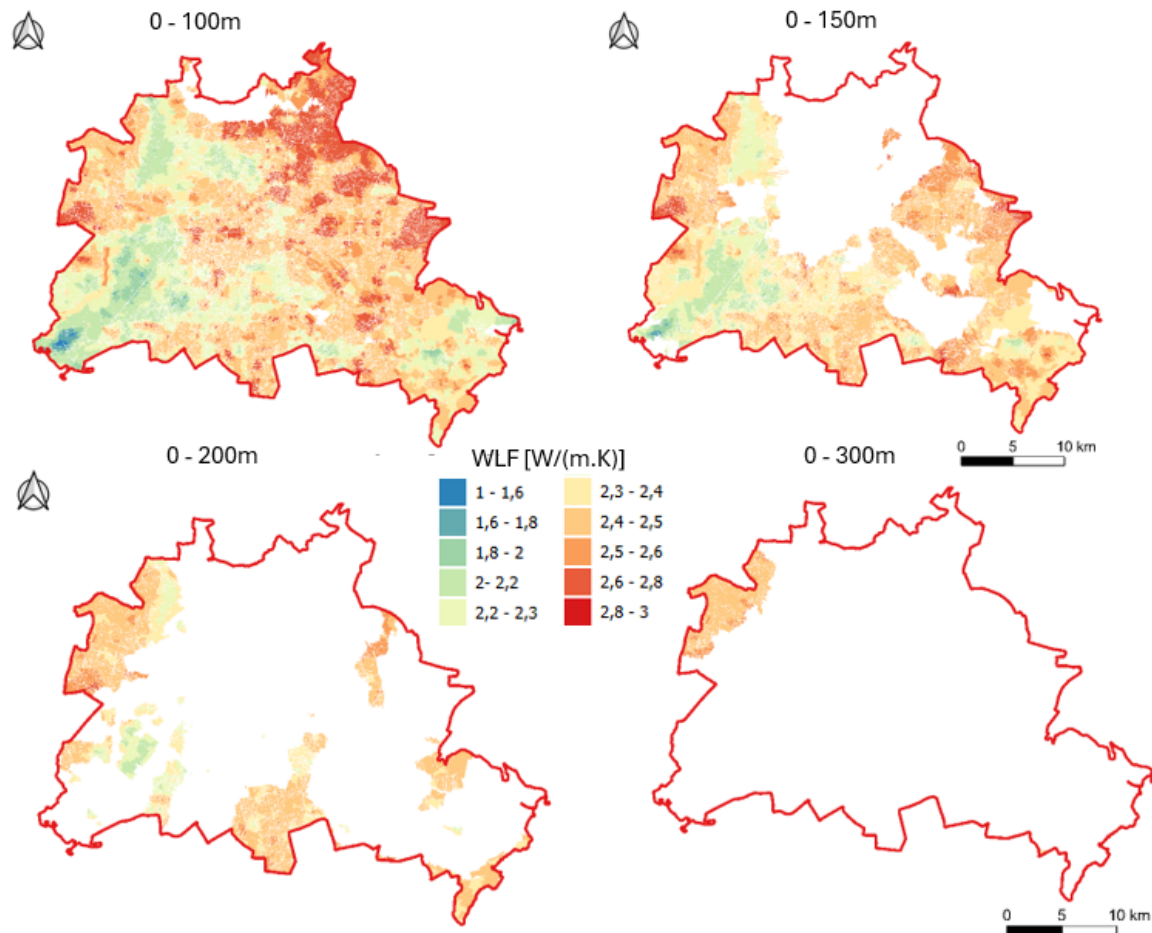


Abbildung 21: Die Tiefenschnitte des WLF-K-Modells

Die effektive Wärmeleitfähigkeit des WLF-K-Modells wurde daher auf der Grundlage folgender Formel berechnet:

$$\lambda_{ef} = 100 \cdot \lambda_{ef\ GD} + \frac{\sum \lambda_i M_i}{\sum M_i}$$

$\lambda_{ef}$  ... effektive Wärmeleitfähigkeit der Tiefenstufe

$\lambda_{ef\ GD}$  ... effektive Wärmeleitfähigkeit laut WLF-GD Modells

$\lambda_i$  ... Wärmeleitfähigkeit der stratigrafischen Einheit i

$M_i$  ... Mächtigkeit der stratigrafischen Einheit i zwischen 100 m und die untere Grenze von die Tiefenstufe

Die Abbildung 21 zeigt die Tiefenschnitte des WLF-K-Modells inklusive eines Schnitts für die Tiefe von 0-100 m für Vergleich mit den anderen Modellen.

Ein Vergleich der einzelnen WLF-Modelle wird in Abbildung 22 gezeigt. Im Falle einer Übereinstimmung zwischen WLF-GD und WLF-S für die Tiefenstufe 100 m ( $\Delta WLF$   $0,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , Abbildung 22, links) zeigen alle Modelle die gleiche Entwicklung. Wenn das WLF-S-Modell in der 100 m-Ebene vom WLF-GD-Modell abweicht (Abbildung 22, mittig und rechts), führt die Korrektur im WLF-K-Modell zu einer glatten Verbindung zu dieser Ebene und das Missverhältnis wird proportional auf tiefere Ebenen übertragen.

Im Falle des größten Teils des Berliner Gebiets (ca. 80 %), wo eine Diskrepanz zwischen den Modellen WLF-S und WLF-GD von bis zu  $0,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  zu beobachten ist, ist die Korrektur recht gering (mittleres Bild). An Stellen mit deutlich reduzierter Wärmeleitfähigkeit gibt es signifikante Korrekturen ( $\Delta WLF$   $1,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , Abbildung 22, rechts). Diese Korrekturen erscheinen jedoch realistisch und ermöglichen eine bessere Annäherung an die tatsächlichen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit.

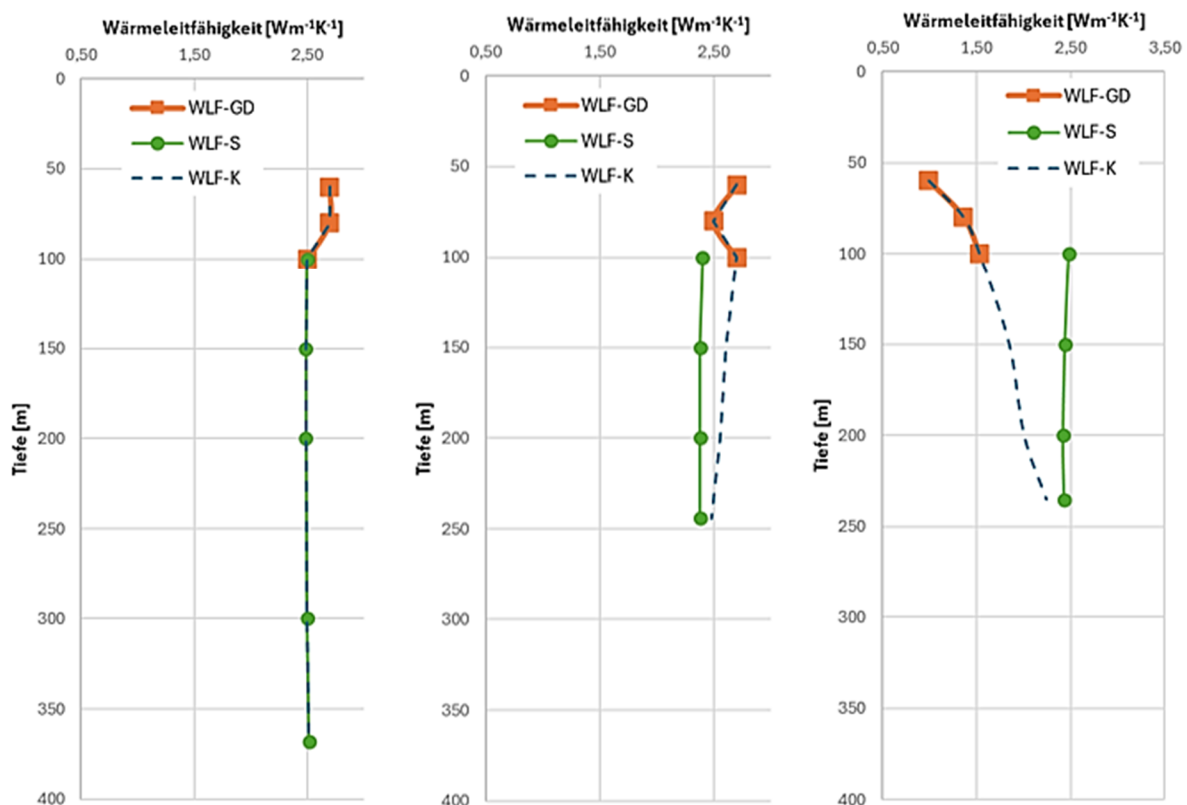


Abbildung 22: Vergleich der einzelnen WLF-Modelle.

### 3.3.2 Modell der Wärmekapazität - Modell WK

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Bestimmung des thermischen Potenzials ist die Wärmekapazität der Gesteinsumgebung. Die Bedeutung der Wärmekapazität nimmt vor allem bei der Wärmespeicherung (Regeneration von geothermischen Anlagen) zu.

Da die räumliche Verteilung der Wärmekapazität im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit im Allgemeinen weniger gut erforscht ist, wurde als Input ein thermohydrodynamisches Modell verwendet, das statistische Werte der volumetrischen Wärmekapazität von Gesteinen im Berliner Raum verwendet [15].

Die Massenwärmekapazität der stratigraphischen Einheiten wurde bestimmt als

$$c_p = \frac{(p - 1)c_s}{\rho_s} + p \cdot c_{pw}$$

wobei

$c_p$  ... Massenwärmekapazität

$c_s$  ... Volumenkapazität des Solids

$c_{pw}$  ... Massenkapazität des Wassers ( $4186 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

$p$  ... Porosität

$\rho_s$  ... Dichte des Solids

Die effektive Wärmekapazität wurde dann in Analogie zur effektiven Wärmeleitfähigkeit wie folgt bestimmt:

$$c_{p\text{ef}} = \frac{\sum c_{pi}M_i}{\sum M_i}$$

wobei

$C_{p\text{ef}}$  ... effektive Wärmekapazität der stratigraphischen Einheit

$c_{pi}$  ... Wärmekapazität der stratigraphischen Einheit  $i$

$M_i$  ... Mächtigkeit der stratigraphischen Einheit  $i$  innerhalb der Tiefenstufe

Die Verteilung der effektiven Wärmekapazität für eine Tiefenstufe von 0-100 m ist in

Abbildung 23 dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Streuung der Werte innerhalb des Modells gering ist. Die Differenz zwischen dem Minimum und dem Maximum beträgt etwa 3,3 %.

Diese Streuung der Werte entspricht auch den Erfahrungen, die die geoENERGIE Konzept GmbH bei der Modellierung der Betriebsbedingungen bestimmter geothermischer Anlagen im Raum Berlin gemacht hat.

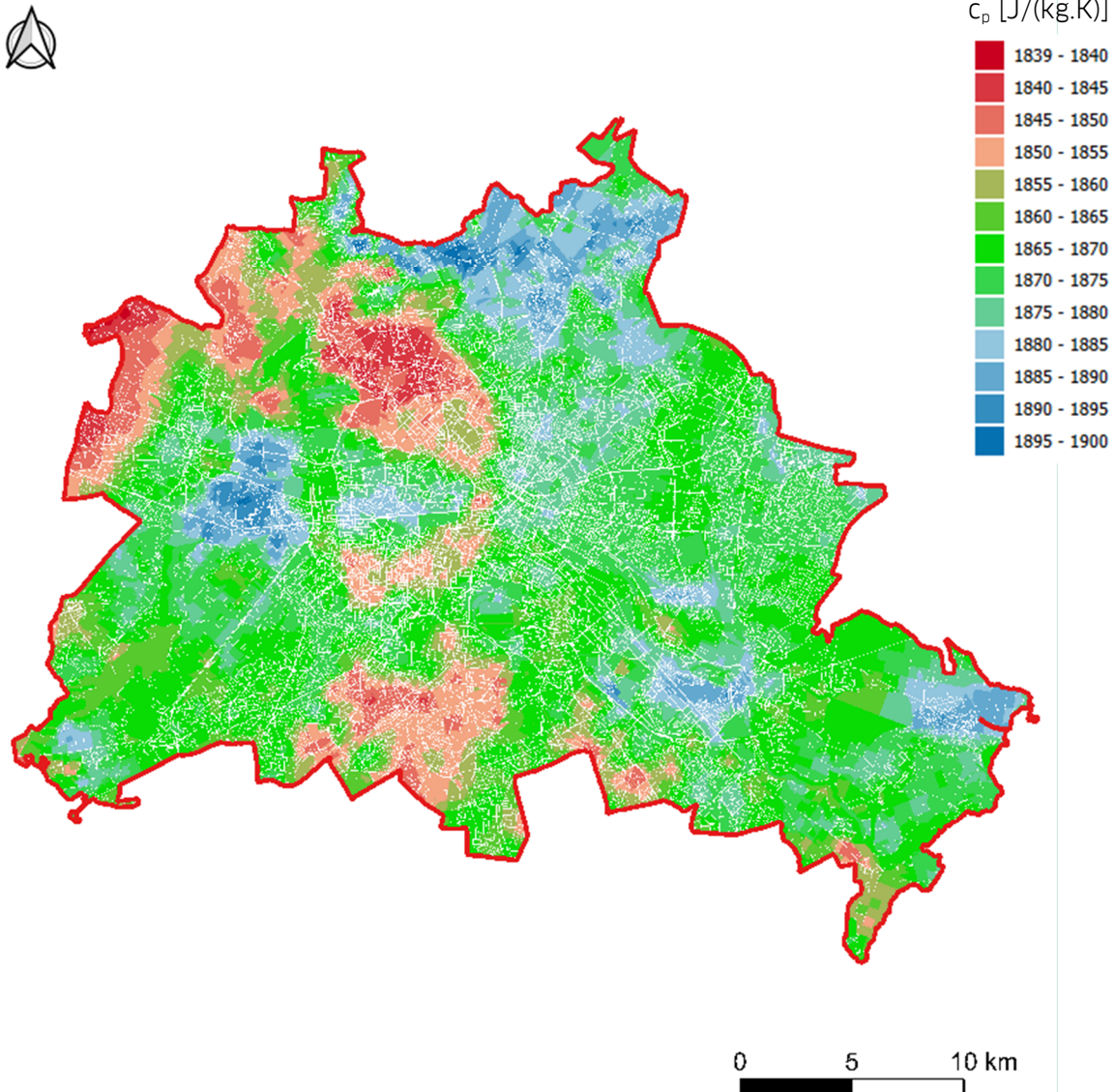


Abbildung 23: Verteilung der effektiven Wärmekapazität für eine Tiefenstufe von 100 m

### 3.3.3 Temperaturmodell - Modell T

Das Temperaturmodell wird auf der Grundlage der Ergebnisse des thermohydrodynamischen Modells (TH Modell) [15]. bestimmt. Die berechneten Werte werden mit dem Temperaturmodell des Geologischen Dienstes [12] verglichen (Abbildung 24), das horizontale Schnitte der effektiven Temperatur bis 100 m Tiefe liefert. Für die Modellierung wird eine Kombination beider Ansätze verwendet: Bis 100 m erfolgt die Festlegung gemäß dem Modell des Geologischen Dienstes. Ab 100 m werden die effektiven Temperaturen aus dem Modell des

Geologischen Dienst als Ausgangspunkt genutzt und die weiteren Tiefenbereiche auf Basis des THM-Modells berechnet.

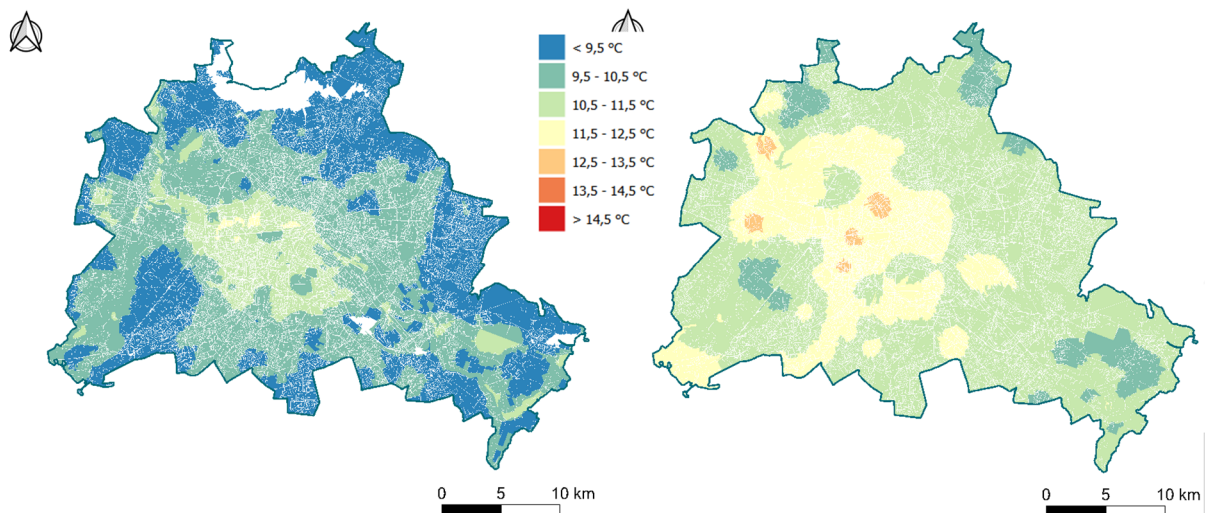


Abbildung 24: Vergleich der effektiven Temperatur des Untergrundes nach dem TH-Modell. [15]. (links) und geologische Dienst (rechts) [12]

### 3.4 Wärmeentnahmehmodell für die Nutzung von Erdwärmesonden

Das Wärmeentnahmehmodell dient der realitätsnahen Abschätzung der nutzbaren thermischen Energie aus Erdwärmesonden (EWS) innerhalb der ISU5-Blöcke. Es berücksichtigt sowohl die geologischen Rahmenbedingungen als auch die geometrische Anordnung der EWS und die saisonale Nutzung der Geothermieanlage.

Die Berechnung der Wärmeentnahme erfolgt auf Basis einer zeitabhängigen Simulation der Fluidtemperatur in den EWS unter Verwendung der g-Funktion. Diese Methode erlaubt die Berücksichtigung thermischer Wechselwirkungen zwischen den Sonden sowie die Abbildung des saisonalen Lastprofils.

Für jeden ISU5-Block werden folgende Parameter berücksichtigt:

- Anzahl und Anordnung der EWS
- Geothermische Eigenschaften des Untergrundes
  - Tiefe der oberen Rupelton-Oberkante
  - Effektive Wärmeleitfähigkeit (Modell WLF-K)
  - Effektive Temperatur (Modell T-K)
  - Effektive Wärmekapazität (Modell WK)

→ Diese Parameter stammen aus dem geothermischen Modell gemäß Kapitel 3.3

- Lastprofil (relative Jahresgangkurve)
  - Drei Varianten wurden simuliert:
    1. Heizfall: reine Wärmeentnahme im Winter
    2. 50 % Regeneration: teilweise Rückführung von Wärme im Sommer
    3. Ausgeglichener Betrieb: vollständige saisonale Regeneration

### 3.4.1 Anordnung der Erdwärmesonden

Die Platzierung der Erdwärmesonden (EWS) innerhalb der ISU5-Blöcke erfolgt mittels eines eigens entwickelten Python-Skripts, das eine quasi-regelmäßige Punktverteilung unter Einhaltung eines Mindestabstands von 8 m sicherstellt. Die Optimierung basiert auf einem iterativen Auswahlverfahren aus einer adaptiv generierten Punktmuster-Matrix.

Dabei wird für jeden Block eine „Punktmuster-Matrix“ erzeugt und Punkte außerhalb des Blockpolygons effizient ausgeschlossen. Es folgt ein iterativer Prozess, der sicherstellt, dass der Mindestabstand von 8 m zwischen allen Punkten eingehalten wird. Der Prozess beginnt an einem Startpunkt und wird beim nächsten gültigen Punkt wiederholt, solange bis keine weiteren Punkte mehr hinzugefügt werden können.

Die Rasterung wird dynamisch in der Schrittweite angepasst basierend auf der Fläche und Form des Polygons, der Komplexität der Geometrie (z. B. Anzahl der Teilflächen bei Multipolygonen) und Verhältnis von Polygonfläche zum Begrenzungsrahmen.

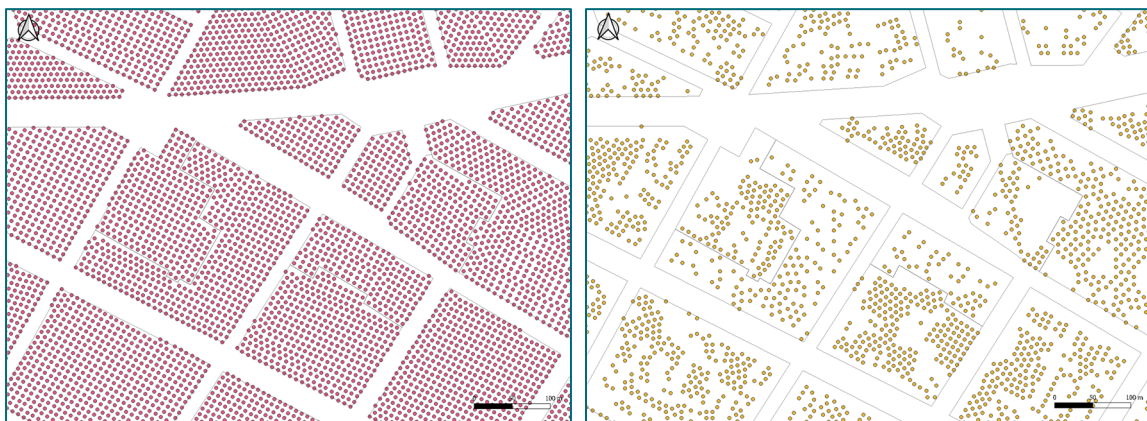


Abbildung 25: Platzierung von Erdwärmesonden im theoretischen Potenzial (links) und im technischen Potenzial (rechts) Die schematische Darstellung zeigt die Verteilung der EWS innerhalb eines ISU5-Blocks. Links: gleichmäßige Belegung der gesamten Blockfläche (theoretisches Potenzial). Rechts: angepasste Platzierung unter Berücksichtigung von Ausschlussflächen (technisches Potenzial).

Diese Methode stellt sicher, dass die resultierenden Punkte innerhalb des Polygons gleichmäßig verteilt sind und sich nicht näher als der definierte Mindestabstand kommen. Die Kombination aus adaptiver Rasterung und iterativer Filterung ermöglicht eine effiziente und robuste Platzierung auch in komplexen Geometrien.

Das Ergebnis ist eine quasi-regelmäßige Verteilung von EWS-Punkten innerhalb der nutzbaren Fläche jedes ISU5-Blocks (Abbildung 25). Die Anzahl der Punkte wurde sowohl für die theoretisch verfügbare Fläche als auch für die technisch nutzbare Fläche berechnet. Die Auswertung erfolgte mit vektorbasierten Analysewerkzeugen in QGIS, wobei die Punktzahl pro Block aggregiert wurde.

Diese Punktverteilung bildet die Grundlage für die thermische Simulation mittels g-Funktion, wie im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3.4.2 Erweiterter Ansätze zur Bohrpunktplatzierung

Zur Bewertung innovativer Bohrkonzeppte wurde ein zusätzlicher Modellansatz implementiert, bei dem schräg angesetzte Erdwärmesonden durch vertikale Bohrungen in einem Abstand von 8 m zu bestehenden Sonden approximiert wurden sowie entlang von Gehwegen linienförmig Bohrpunkte platziert wurden. Die Umsetzung erfolgte in folgenden Schritten:

Es wurde zunächst ein Puffer von 8 m um die bestehenden Punkte für die Positionen der vertikalen EWS gelegt. Für die Bestimmung der potenziellen Bohrpositionen für schräge Sonden wurde diese Pufferzone zu einer Fläche verschmolzen und dessen äußere Grenze zur Platzierung der Schrägen Bohrpunkte verwendet (Abbildung 26, links) (in Variante technisches Potenzial enthalten).

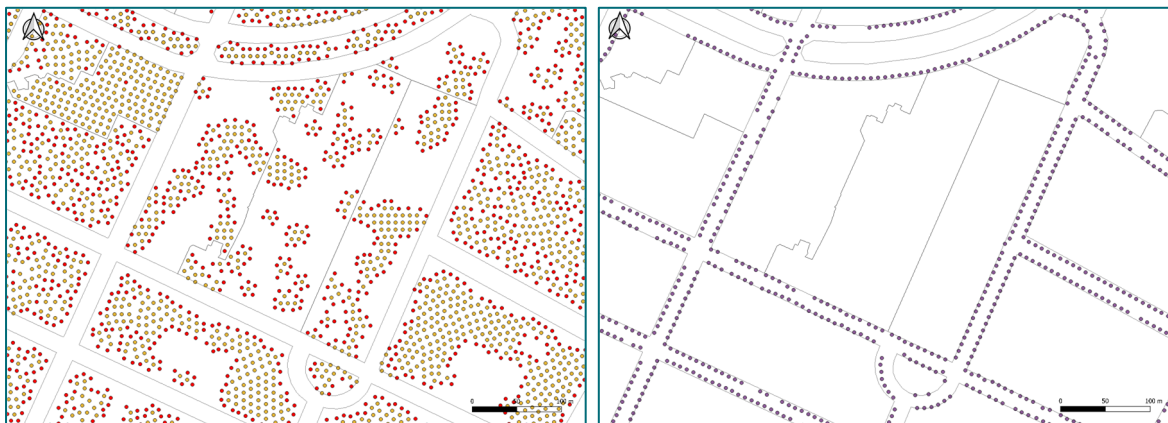


Abbildung 26: Erweiterte Platzierung von Erdwärmesonden – schräge Bohrungen (links) und Gehwegnutzung (rechts)  
 Links: Darstellung der EWS im technischen Potenzial (gelbe Punkte) sowie zusätzlich platzierte schräge Bohrungen (rote Punkte) entlang der Pufferlinien bestehender Sonden. Rechts: Platzierung von EWS entlang öffentlicher Gehwege gemäß den beschriebenen Geodaten und dem Poisson-Disk-Verfahren.

Entlang dieser Linien wurden neue Bohrpunkte mit einem speziell entwickelten Python-Skript platziert, das auf dem „Poisson-Disk-Sampling“ basiert. Dieses Verfahren stellt sicher, dass die Punkte gleichmäßig verteilt sind und einen definierten Mindestabstand zueinander einhalten. Die resultierenden Punkte wurden in einem GeoPackage gespeichert und in die Potenzialanalyse integriert.

Ein weiteres innovatives Einsatzszenario zur Erhöhung des geothermischen Potenzials wurde durch die Einbeziehung von Gehwegen (Straßenbegleitflächen) als potenzielle Bohrflächen umgesetzt (Abbildung 26, rechts).

Diese Flächen bieten insbesondere in dicht bebauten Stadtgebieten eine zusätzliche Möglichkeit zur Erschließung der Wärme im Untergrund. Dabei ist zu berücksichtigen, dass unter Gehwegen vielerorts bereits andere Infrastruktur vorhanden ist. Erdwärmesonden können nur dort eingebracht werden, wo bestehende Leitungen nicht beeinträchtigt werden. Es ist jedoch auch möglich, Sonden unter vorhandener Infrastruktur zu installieren, beispielsweise wenn diese ohnehin erneuert wird.

Als Grundlage dienten die öffentlich zugänglichen Gehwegdaten der Stadt Berlin [41]. Die Daten liegen als Liniengeometrien vor und repräsentieren die Lage und Ausdehnung von Gehwegen im öffentlichen Raum. Zur Platzierung von Erdwärmesonden entlang der Gehweglinien wurde das bereits beschriebene Poisson-Disk-Sampling-Verfahren verwendet.

### 3.4.3 Bestimmung der Erdwärmesonden-Anzahl

Die Anzahl der innerhalb eines ISU5-Blocks potenziell installierbaren Erdwärmesonden wurde je nach Szenario mit unterschiedlichen Methoden bestimmt:

Für die folgenden drei Ansätze wurden die EWS direkt innerhalb der Blockgrenzen platziert:

- Theoretisches Potenzial (volle Blockfläche)
- Technisches Potenzial (nach Ausschlussflächenanalyse)
- Innovative Bohransätze (schräge Bohrungen)

Die Zählung der EWS-Punkte erfolgte mithilfe vektorbasierter Analysetools in QGIS.

Dabei wurden alle Punkte gezählt, deren Geometrie sich vollständig innerhalb der jeweiligen Blockfläche befindet. Die Ergebnisse wurden pro ISU5-Block aggregiert und als Grundlage für die Potenzialermittlung verwendet.

Da sich die Gehwege außerhalb der Blockgrenzen befinden, war eine direkte Zählung innerhalb der Blöcke nicht möglich. Stattdessen wurde ein räumliches Zuordnungsverfahren implementiert, das mit Hilfe eines räumlichen Indexes die Punkte dem jeweils nächstgelegenen Block zuweist.

Durch die Einbeziehung von Gehwegen als Bohrflächen kann das nutzbare Potenzial in vielen innerstädtischen Bereichen deutlich erhöht werden.

### 3.4.4 Abstand zwischen den Erdwärmesonden

Für die Ermittlung der Potenziale wurden je nach Potenzialtyp unterschiedliche Annahmen und Parameter verwendet. Während das theoretische Potenzial auf idealisierten Rahmenbedingungen basiert (z. B. vollständige Flächennutzung, standardisierter Sondenabstand), berücksichtigt das technische Potenzial reale Einschränkungen wie verfügbare Freiflächen oder bestehende Infrastruktur.

Für die Berechnung des theoretischen Potenzials wurde ein fester Rasterabstand von 8 m zwischen den EWS verwendet. Die Sonden wurden regelmäßig über die gesamte Blockfläche verteilt, ohne Berücksichtigung von Ausschlussflächen oder Nutzungskonflikten. Diese Variante stellt eine idealisierte Maximalbelegung dar.

Im Fall des technischen Potenzials wurde die Platzierung der EWS nicht regelmäßig, sondern an die tatsächlich verfügbare freie Fläche innerhalb des Blocks angepasst. Da die nutzbare Fläche durch Ausschlussflächen (z. B. Gebäude, Bäume, Wasserflächen) stark fragmentiert ist, ergibt sich eine unregelmäßige Verteilung der EWS.

Zur Beschreibung der durchschnittlichen Belegungsdichte wurde ein effektiver Abstand berechnet. Dieser ergibt sich aus der Formel:

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{A}{N_{Tech}}}$$

Wobei

$B_{eff}$	Effektiver EWS-Abstand
$A$	Gesamtfläche des Blocks
$N_{Tech}$	EWS-Anzahl für technisches Potenzial (ohne Analyse mit Schrägbohrungen)

$B_{eff}$  Wert stellt eine mittlere Distanz zwischen den EWS dar und erlaubt eine vergleichbare Bewertung der Blockauslastung trotz unregelmäßiger Verteilung. Wert stellt eine mittlere Distanz zwischen den EWS dar und erlaubt eine vergleichbare Bewertung der Blockauslastung trotz unregelmäßiger Verteilung. Der gleiche Ansatz kann auch für die Berechnung bei Schrägbohrungen verwendet werden, indem der schräge Bohrfeld durch einen vertikalen Bohrpunkt in gleicher Tiefe approximiert wird. Für die Berechnung wird die Lage des Bohrlochs in den Koordinaten des Bohrmittelpunktes angesetzt.

Um einen realistischen und technisch sinnvollen Wertebereich sicherzustellen, wurde auf den berechneten Abstand ein Bandfilter von 8 bis 30 m angewendet. Das bedeutet:

- Wenn der berechnete Abstand kleiner als 8 m ist, wird ein Mindestwert von 8 m angesetzt.
- Wenn der berechnete Abstand größer als 30 m ist, wird der Wert auf 30 m begrenzt.

Die Anzahl der platzierbaren Erdwärmesonden sowie die zugehörigen Abstände wurden für alle ISU5-Blöcke im Untersuchungsgebiet berechnet und gemeinsam mit den block-spezifischen thermischen Eigenschaften und der Tiefenlage (siehe Kapitel 3.4.5) für die einzelnen Potenzialvarianten in einer CSV-Datei zusammengefasst. Diese Datei dient als Eingangsdatenbasis für die anschließende Potenzialermittlung.

### 3.4.5 Tiefenstaffelung der Wärmeentnahmeberechnung

Zur realitätsnahen Abbildung technischer und genehmigungsrechtlicher Rahmenbedingungen wurden die Berechnungen der Wärmeentnahme für mehrere fest definierte Tiefenstufen durchgeführt.

Dabei wurden vier standardisierte Tiefen berücksichtigt:

- 100 m: entspricht der aktuellen Zulassungsgrenze für Erdwärmesonden in Berlin
- 150 m
- 200 m
- 300 m

Zusätzlich wurde zur Ermittlung des maximalen geothermischen Potenzials je Block eine weitere Berechnung durchgeführt, bei der die Tiefe der Erdwärmesonden bis zur Oberkante des Rupeltons bzw. bis maximal 400 m angesetzt wurde – in Abhängigkeit von der lokalen geologischen Situation.

Diese Tiefenstaffelung ermöglicht eine differenzierte Bewertung des Potenzials unter Berücksichtigung sowohl technischer Machbarkeit als auch wirtschaftlicher und genehmigungsrechtlicher Aspekte.

### 3.4.6 Relative Lastkurven

Für die thermische Simulation der Erdwärmesondenfelder werden standardisierte monatliche Lastprofile verwendet (Abbildung 27). Diese relativen Lastkurven beschreiben den zeitlichen Verlauf der Wärmeentnahme und -rückführung über ein Jahr hinweg. Sie dienen als Grundlage für die Bewertung der thermischen Belastung des Untergrunds und ermöglichen die Abbildung verschiedener Betriebsszenarien.

Im Rahmen dieser Studie wurden drei typische Lastfälle berücksichtigt:

- Heizfall: Saisonale Wärmeentnahme ohne Regeneration
- Regeneration 50 %: Rückführung von Wärme in den Untergrund im Sommer
- Ausgeglichener Betrieb: Saisonaler Ausgleich zwischen Entnahme und Rückführung

Die Lastkurven sind normiert auf eine jährliche Entzugsleistung und werden bei der Simulation skaliert, um unterschiedliche Leistungsniveaus abzubilden. Die Ermittlung der Lastkurven basiert auf der Ermittlung von Heiz- und Kühlgradtagen. Hierfür wurde das Tool „Gradtagzahlen-Deutschland“ des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) verwendet. [42]

Die Gradtagzahlen werden aus Messdaten von den drei geographisch nächstgelegenen Wetterstationen unter Berücksichtigung von Höhenkorrekturen ermittelt. Als Standort wurde in der vorliegenden Studie Berlin-Mitte mit der Postleitzahl 10178 gewählt. Die drei nächstgelegenen Wetterstationen sind Berlin-Tempelhof, Berlin-Dahlem und Berlin-Marzahn. Heizgradtage dienen dabei als Grundlage für die Berechnung der monatlichen Stundenverteilung. Sie ergeben sich aus der Summe der Differenzen zwischen einer definierten Heizgrenztemperatur und der durchschnittlichen Außentemperatur an allen Heiztagen.

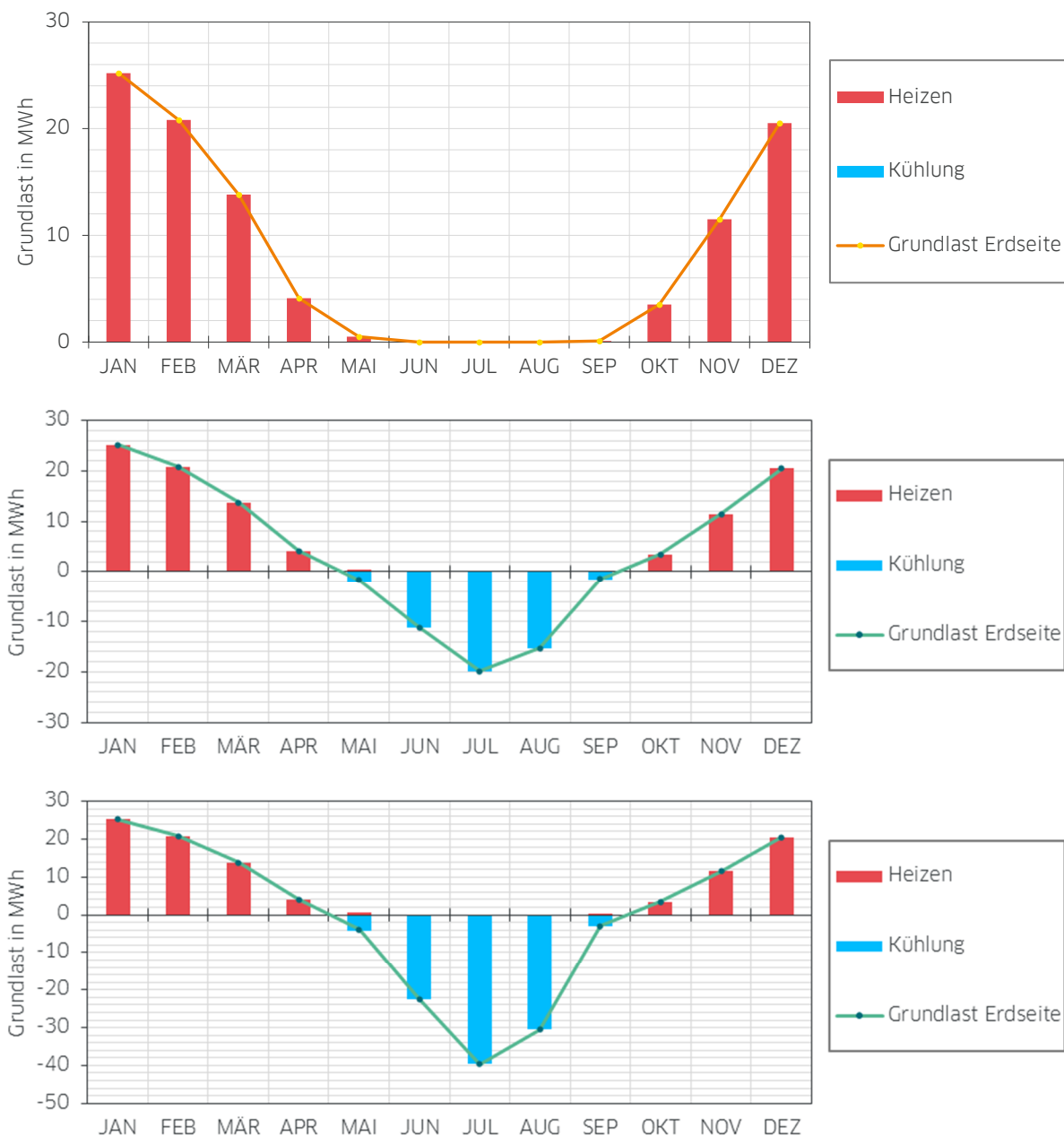


Abbildung 27: Standardisierte Lastprofile zur Bewertung der Wärmeentnahme. Die drei dargestellten Kurven zeigen die monatliche Verteilung der Wärmeentnahme für unterschiedliche Betriebsvarianten: oben Heizfall (reine Entnahme), mittig 50 % Regeneration, unten ausgeglichener Betrieb mit vollständigem saisonalem Ausgleich. Diese Profile wurden zur Berechnung des geothermischen Potenzials verwendet.

### 3.4.7 Randbedingungen der Anlagensimulation

Die anlagentechnischen Randbedingungen definieren die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Komponenten im Sondenfeld. Diese Parameter beeinflussen maßgeblich die Effizienz des Wärmeentzugs und die thermische Stabilität des Systems.

Folgende Konstanten wurden verwendet:

- Rohrsystem: Doppel-U-Rohr mit vier Strängen, Außendurchmesser 32 mm, Wärmeleitfähigkeit 0,42 W/m·K
- Wärmeträgerflüssigkeit: Dichte 1052 kg/m<sup>3</sup>, spezifische Wärmekapazität 3795 J/kg·K, Wärmeleitfähigkeit 0,48 W/m·K
- Verpressmaterial (Grout): Wärmeleitfähigkeit 2,0 W/m·K, Dichte 1500 kg/m<sup>3</sup>
- Volumenstrom: konstant 0,5 l/s pro Sonde

Diese Werte wurden einheitlich für alle Simulationen angesetzt, um eine vergleichbare Bewertung der Potenziale zu gewährleisten.

### 3.4.8 Thermische Randbedingungen

Die thermischen Randbedingungen legen die zulässigen Temperaturgrenzen für den Betrieb der Erdwärmesonden fest. Sie dienen dem Schutz der Anlage sowie der langfristigen thermischen Stabilität des Untergrunds.

Für die Simulation wurden folgende Grenzwerte definiert:

- Maximale mittlere Fluidtemperatur: Umgebungstemperatur des Untergrunds + 15 K
- Minimale mittlere Fluidtemperatur: 1,5 °C

Diese Grenzwerte orientieren sich an den Vorgaben der VDI 4640 und stellen sicher, dass die berechneten Entzugsleistungen auch unter realistischen Betriebsbedingungen dauerhaft umsetzbar sind. Die „mittlere Temperatur“ bezeichnet dabei den arithmetischen Mittelwert der Temperatur am Ein- und Austritt des Fluids bei einer angenommenen Spreizung von 3 K.

### 3.4.9 Bestimmung der Wärmeentnahme

Zur Modellierung der potenziellen Wärmeentnahme pro Erdwärmesonde wurde die Open-Source-Software GHEtool [43] eingesetzt. GHEtool ist ein in Python entwickeltes Werkzeug zur thermischen Simulation und Auslegung von Erdwärmesondenfeldern. Es basiert auf wissenschaftlich anerkannten Methoden, insbesondere dem Konzept der g-Funktionen nach Eskilson. Es nutzt die Python-Bibliothek pygfunction zur Berechnung der thermischen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Sonden.

Das GHEtool ermöglicht sowohl die dimensionierende Auslegung von Sondenfeldern als auch die Bewertung der langfristigen thermischen Stabilität unter realistischen Betriebsbedingungen. Dabei können verschiedene Lastprofile, geologische Parameter und technische Randbedingungen berücksichtigt werden. Insbesondere eignet sich das GHEtool für die automatisierte Analyse großer Flächenkulissen, wie sie im Rahmen dieser Potenzialstudie auf ISU5-Blockebene erforderlich ist.

Zu den zentralen Eingangsparametern zählen:

- Geometrie des Sondenfeldes (Anzahl, Tiefe, effektiver Abstand der Sonden)
- Thermische Eigenschaften des Untergrunds (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität)
- Betriebsparameter (z. B. Heiz-/Kühlprofile, Betriebsstunden, Regenerationsphasen)
- Technische Begrenzungen (z. B. minimale Fluidtemperatur, maximale Entzugsleistung)

Die Ausgaben vom GHEtool umfassen unter anderem:

- Die maximal nachhaltige Entzugsleistung pro Sonde bzw. Sondenfeld
- Den Temperaturverlauf im Untergrund über die Betriebsdauer
- Hinweise auf mögliche thermische Überbeanspruchung oder Unterdimensionierung
- Optimierte Konfigurationen zur Deckung eines gegebenen Lastprofils

Zur effizienten Anwendung vom GHEtool im Rahmen der Potenzialanalyse wurde ein eigener Python-basierter Berechnungsworkflow entwickelt. Ziel war es, die Wärmeentnahme für eine Vielzahl von EWS-Konfigurationen automatisiert und skalierbar zu berechnen. Die Implementierung berücksichtigt sowohl quadratische als auch nicht-quadratische Sondenfelder und unterstützt Interpolationstechniken zur Näherung thermischer Wechselwirkungen.

Folgende Funktionalitäten sind durch Nutzung des Codes möglich:

- Erzeugung von Sondenfeldkonfigurationen (inkl. Tiefe, Abstand, Anzahl)
- Interpolation zwischen zwei g-Funktionen bei nicht-quadratischen Feldern
- Berechnung der jährlichen Wärmeentnahme auf Basis monatlicher Lastprofile
- Anpassung der Entzugsleistung zur Einhaltung thermischer Randbedingungen
- Adaptive Lastsuche zur Bestimmung der maximal möglichen Entzugsleistung

Die Berechnung der maximal möglichen Wärmeentnahme erfolgt in einem mehrstufigen iterativen Verfahren, das auf Effizienz und Genauigkeit ausgelegt ist. Zunächst wird in groben Schritten geprüft, welche Entzugsleistungen noch innerhalb der zulässigen Temperaturgrenzen liegen.

Sobald ein kritischer Bereich identifiziert ist, wird die Suche in kleineren Schritten fortgesetzt, um die Grenze genauer einzugrenzen. Abschließend wird eine binäre Verfeinerung durchgeführt, um den maximal möglichen Wert mit hoher Präzision zu bestimmen.

Bei der geometrischen Modellierung von Sondenfeldern wird ein interpolatives Verfahren eingesetzt, um auch nicht-quadratische Anordnungen realitätsnah abzubilden.

Dieses strukturierte Vorgehen gewährleistet eine robuste und skalierbare Ermittlung der Wärmeentnahme unter Einhaltung technischer und thermischer Randbedingungen. Die Implementierung wurde anhand unternehmensinterner Daten und Simulationen mit dem Tool EED (Earth Energy Designer) [44] validiert.

Aufgrund softwaretechnischer Einschränkungen und auf Basis praktischer Erfahrungen wurde die Anzahl der Sonden bei der Berechnung der g-Funktion auf maximal 1156 begrenzt. Ab dieser Größenordnung kann das Sondenfeld thermisch als quasi-unendlich betrachtet werden, da sich zusätzliche Sonden nur noch marginal auf die g-Funktion auswirken. Diese Begrenzung betrifft ausschließlich die Berechnung der g-Funktion – die tatsächliche Potenzialermittlung erfolgte stets auf Basis der realen Anzahl an Sonden.

### 3.4.10 Thermische Wechselwirkungen

Die thermische Nutzung des Untergrunds sollte nicht isoliert betrachtet werden, da die Entzugsleistung einer Erdwärmesonde wesentlich davon abhängt, ob benachbarte Flächen ebenfalls geothermisch genutzt werden. Um diese Wechselwirkungen zu berücksichtigen, wurden zwei Extremfälle modelliert:

Das **Szenario 1: Einzelblock-Nutzung („isolierter Block“)** stellt die Nutzung einer geothermischen Anlage ohne thermische Beeinflussung von Nachbaranlagen dar:

- Annahme: Der betrachtete ISU5-Block wird allein genutzt, ohne thermische Beeinflussung durch benachbarte Blöcke.
- Vorgehen:
  - Ermittlung der maximal möglichen Anzahl an Erdwärmesonden im Block gemäß der gewählten Belegungsvariante
  - Berechnung des Potenzials auf Basis der vollen Entzugsleistung je Sonde, da keine thermische Überlagerung angenommen wird
- Ergebnis: Dieses Szenario liefert den theoretisch maximalen Potenzialwert für jeden Block.

Das **Szenario 2: Nutzung aller Nachbarblöcke („unendliches Feld“)** zeigt den Fall, bei dem die Wärmeversorgung aller Blöcke über den Untergrund erfolgt:

- Annahme: Alle benachbarten ISU5-Blöcke werden gleichzeitig und vollständig genutzt – der betrachtete Block ist Teil eines großflächigen, homogen genutzten Feldes.
- Vorgehen:
  - Festlegung eines standardisierten Sondenrasters mit einem festen Sondenabstand gemäß der gewählten Potenzialvariante
  - Berechnung der Entzugsleistung einer einzelnen Sonde unter Berücksichtigung der thermischen Wechselwirkungen im Feld (Referenzwert: 1156 Sonden)
  - Hochrechnung des Blockpotenzials anhand der tatsächlich möglichen Sondenanzahl im jeweiligen Block
- Ergebnis: Dieses Szenario liefert einen konservativen Potenzialwert, der thermische Überlagerungseffekte berücksichtigt.

Diese beiden Szenarien bilden die methodischen Extremwerte für die Potenzialermittlung. In der weiteren Analyse werden beide Werte ausgewiesen, um die Spannbreite des nutzbaren geothermischen Potenzials je Block darzustellen. Für aggregierte Auswertungen (z. B. auf Bezirksebene) wird der konservative Wert aus Szenario 2 verwendet. Dabei ist zu beachten, dass der Unterschied zwischen den beiden Szenarien mit zunehmender thermischer Regeneration geringer wird, da die zusätzliche Wärme aus der Regeneration die Überlagerungseffekte teilweise kompensiert.

### Infobox

#### Warum Nachbarschaft zählt

Je mehr Erdwärmesonden in Berlin installiert werden, desto stärker beeinflussen sie sich gegenseitig.

Wenn viele Sonden dicht beieinander liegen, „saugen“ sie sich die Wärme aus dem Boden weg. Das bedeutet:

**Einzelblock-Nutzung:** Wenn ein Block allein genutzt wird, liefert jede Sonde ihre volle Leistung. → Maximalwert

**Unendliches Feld:** Wenn alle Nachbarblöcke gleichzeitig genutzt werden, sinkt die Leistung pro Sonde deutlich. → Konservativer Wert

### Kernbotschaft

#### Warum Nachbarschaft zählt

Die thermische Nutzung des Untergrunds ist kein isoliertes System. Für realistische Potenzialabschätzungen müssen Wechselwirkungen berücksichtigt werden – sonst wird die Wärme, die tatsächlich verfügbar ist, überschätzt.

### 3.5 Wärmebedarf und Deckungsanteil

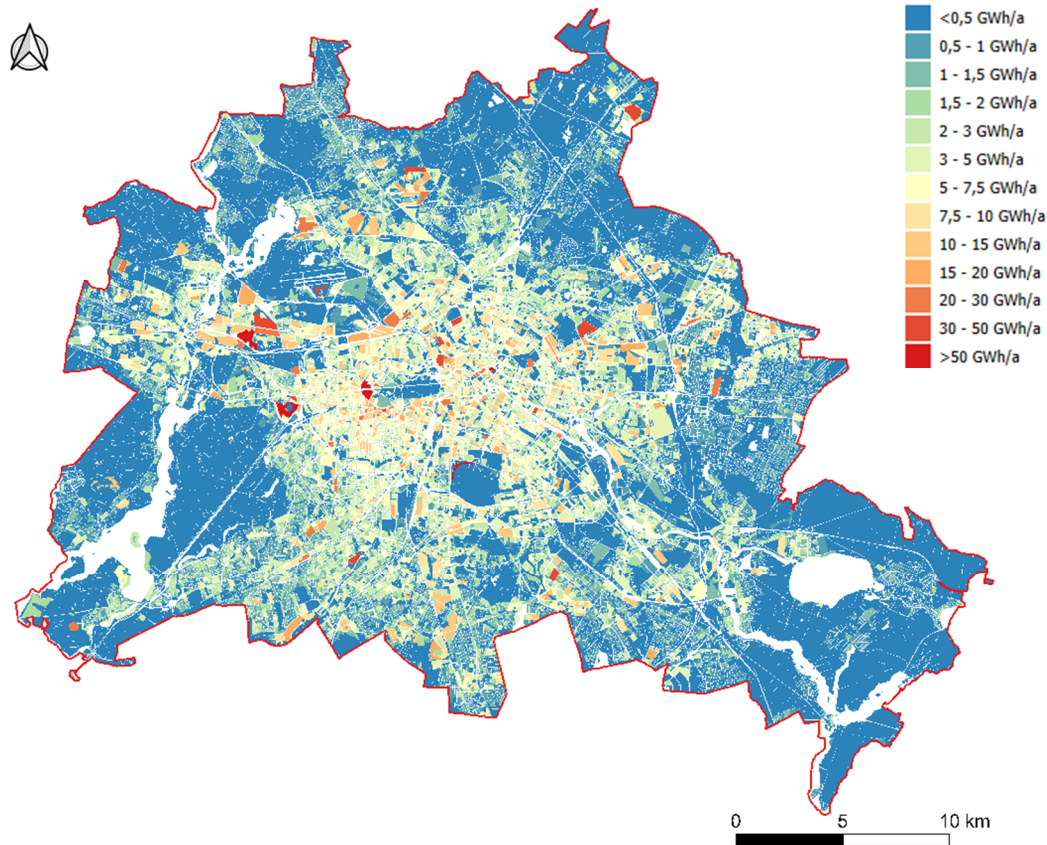


Abbildung 28: Wärmebedarf im Stadtgebiet Berlin auf ISU5-Blockebene. Dargestellt ist der gebäudeseitige Wärmebedarf je ISU5-Block gemäß den vom Auftraggeber bereitgestellten Eingangsdaten. Die Werte dienen als Grundlage für die Berechnung des geothermischen Deckungsanteils.

Die Grundlage für die Bewertung des Deckungsanteils durch oberflächennahe Geothermie bildet der gebäudeseitige Wärmebedarf, der vom Auftraggeber blockweise bereitgestellt wurde (Abbildung 29).

Zusätzlich wurden Geodaten zur Fernwärmeversorgung in Berlin [45] bereitgestellt. Diese bestanden aus Polygonen, die den Verlauf bestehender Fernwärmetrassen inklusive eines 250 m-Puffers abbilden (Abbildung 29) und somit den vermuteten Versorgungsbereich darstellen. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde vereinbart, dass innerhalb dieses Bereichs ein pauschaler Deckungsanteil von 50 % durch Fernwärme angenommen wird.

In diesen Bereichen ist eine vollständige Versorgung mittels Geothermieanlage nicht zielführend. Der Wärmebedarf, der im Fernwärmeversorgungsgebiet liegt, wird daher im Rahmen der weiteren Potenzialberechnung entsprechend um 50 % verringert. In den weiteren Betrachtungen wird immer der reduzierte Wärmebedarf für die Berechnungen verwendet.

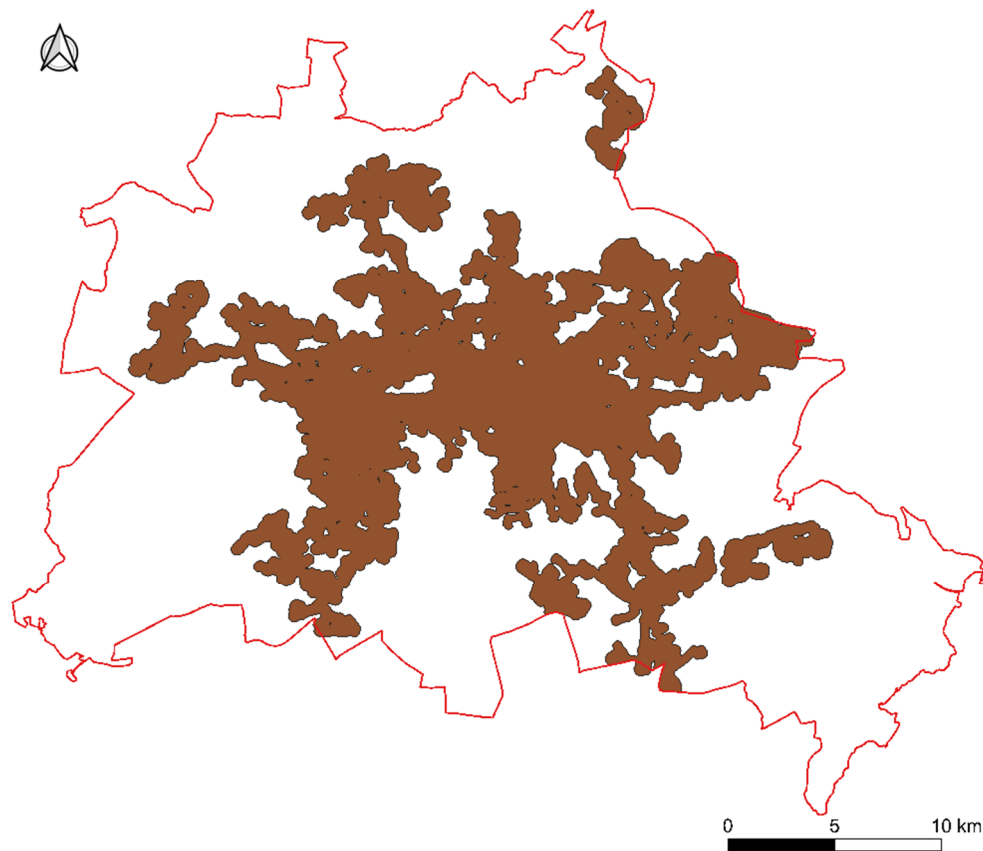


Abbildung 29: Fernwärmeversorgungsbereiche im Stadtgebiet Berlin. [45] Dargestellt sind die bestehenden Fernwärmemetrasen (braun) inklusive eines 250 m-Puffers. Die Fläche repräsentiert die angenommene Zone mit potenzieller Verfügbarkeit von Fernwärme und dient als Grundlage für die Abschätzung des geothermischen Deckungsanteils.

Zur Ermittlung des reduzierten Wärmebedarfs wurde für jeden ISU5-Block der Flächenanteil innerhalb des Fernwärmeversorgungsbereichs bestimmt. Der daraus abgeleitete Fernwärme-Deckungsanteil (Abbildung 30) wurde wie folgt berechnet:

$$D_{FW} = \frac{A_{FW}}{A_{Block}} \cdot 0,5$$

Wobei

- $D_{FW}$  Fernwärme-Deckungsanteil
- $A_{FW}$  Fläche des ISU5-Blocks innerhalb des Fernwärmeversorgungsbereichs (v m<sup>2</sup>)
- $A_{Block}$  Gesamtfläche des ISU5-Blocks (v m<sup>2</sup>)
- 0,5 pauschaler Deckungsfaktor (50 %)

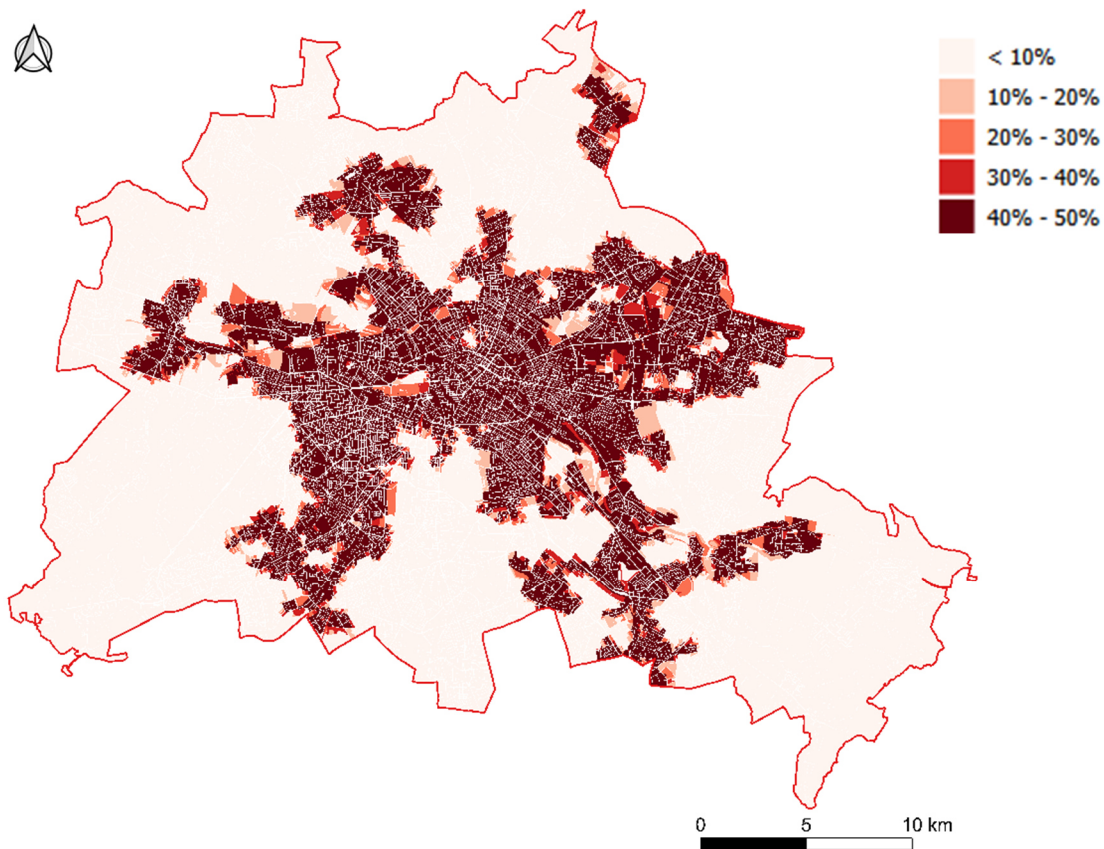


Abbildung 30: Anteil der Fernwärmeversorgung je ISU5-Block im Stadtgebiet Berlin. Die Abbildung zeigt den geschätzten Versorgungsanteil mit Fernwärme pro Block. Grundlage ist die Annahme, dass innerhalb des 250 m-Puffers um bestehende Fernwärmetrassen ein pauschaler Deckungsanteil von 50 % besteht. Der Blockanteil innerhalb dieser Zone wurde mit dem Faktor 0,5 gewichtet.

Der reduzierte Wärmebedarf ergibt sich dann als:

$$Q_{\text{Bedarf,R}} = Q_{\text{Bedarf}}(1 - D_{\text{FW}})$$

Wobei

$Q_{\text{Bedarf,R}}$  reduzierte Wärmebedarf des Blocks

$Q_{\text{Bedarf}}$  Wärmebedarf des Blocks

$D_{\text{FW}}$  Fernwärme-Deckungsanteil

Dieser reduzierte Bedarf (Abbildung 31) wurde anschließend als Referenzgröße für die Berechnung des geothermischen Deckungsanteils verwendet.

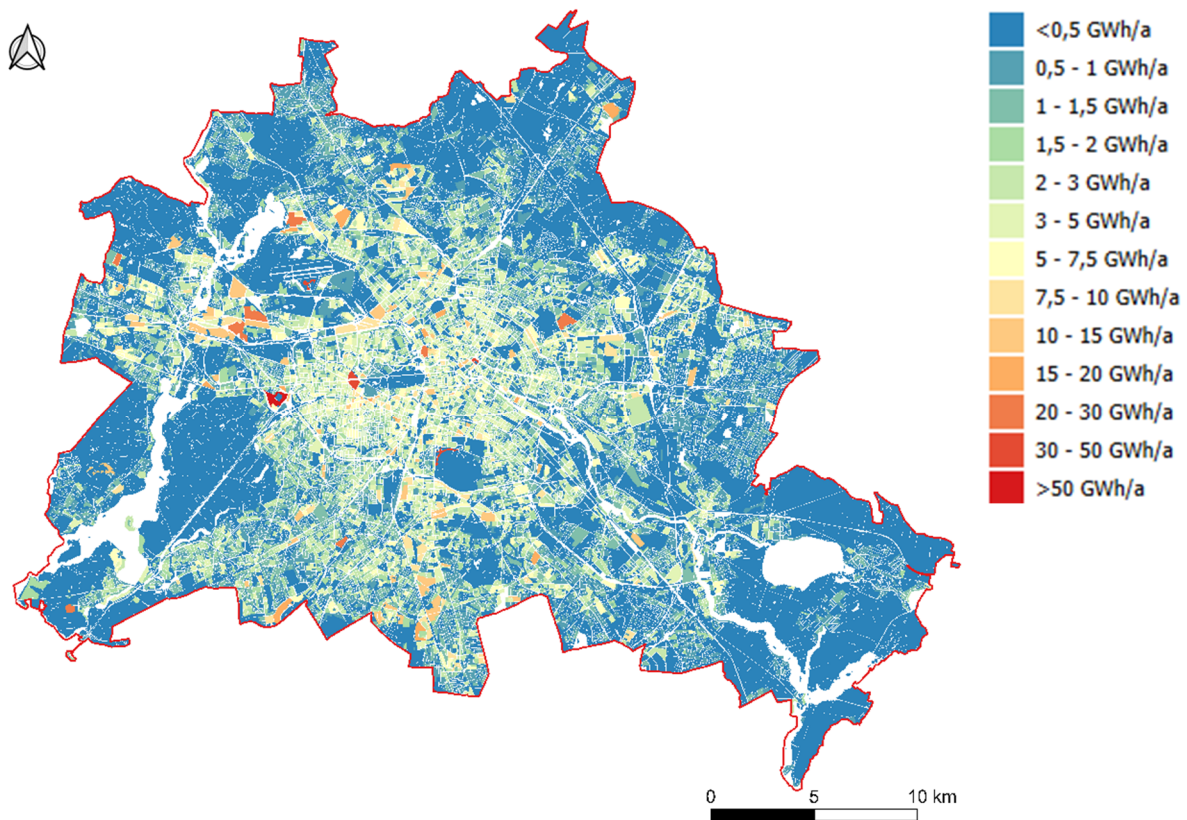


Abbildung 31: Reduzierter Wärmebedarf je ISU5-Block im Stadtgebiet Berlin. Die Darstellung zeigt den gebäudeseitigen Wärmebedarf nach Abzug des pauschal angenommenen Fernwärmeanteils gemäß dem beschriebenen Verfahren. Grundlage ist die Flächenüberlagerung mit dem Fernwärmeversorgungsbereich und ein pauschaler Deckungsfaktor von 50 %.

Der Deckungsanteil wurde für jede betrachtete Tiefenstufe (100 m, 150 m, 200 m, 300 m sowie maximal bis zur Oberkante des Rupeltons bzw. 400 m) separat berechnet. Der Deckungsanteil gibt an, wie viel vom Berliner Wärmebedarf durch die Nutzung geothermischer Energie abgedeckt werden kann. Dabei wurde der maximal technisch nutzbare geothermische Wärmegehalt (unter Berücksichtigung der Jahresarbeitszahl - JAZ) ins Verhältnis zum reduzierten Wärmebedarf gesetzt:

$$D = \frac{Q_{GEO,tech} \frac{JAZ-1}{JAZ}}{Q_{Bedarf}}$$

Wobei

$D$  Deckungsanteil der oberflächennahen Geothermie am Wärmebedarf des Blocks

$Q_{GEO,tech}$  technisches geothermisches Potenzial des Blocks

$JAZ$  Durchschnittliche Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen des Blocks

$Q_{Bedarf}$  Wärmebedarf des Blocks

Für die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials wurden die Kennwerte Jahresarbeitszahl (JAZ) und Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) als zentrale Effizienzindikatoren herangezogen. Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden diese Werte projektweit pauschal auf JAZ = 4 und SEER = 6 festgelegt.

- JAZ beschreibt die Effizienz der Wärmepumpe im Heizbetrieb über ein Jahr und beeinflusst maßgeblich den Strombedarf für die Wärmebereitstellung.
- SEER gibt die saisonale Effizienz im Kühlbetrieb an und bestimmt den elektrischen Energieeinsatz für die Regeneration oder Kältebereitstellung.

Diese Annahmen dienen als Grundlage für die Berechnung der elektrischen Wärmepumpenleistung, einer konkreten Zielvorgabe der Studie, sowie zur Ermittlung des ökonomischen Potenzials. In den bereitgestellten Excel-Berechnungstools besteht die Möglichkeit, JAZ und SEER auf Ebene einzelner ISU5-Blöcke anzupassen. Dadurch können blockindividuelle Effizienzwerte berücksichtigt und sowohl die Berechnung der elektrischen Anschlussleistung der Wärmepumpe als auch die Wirtschaftlichkeitsanalyse präzisiert werden.

#### Jahresarbeitszahl und Seasonal Energy Efficiency Ratio

Infobox

**Jahresarbeitszahl (JAZ)** beschreibt das Verhältnis der über ein Jahr abgegebenen Nutzwärme zur dafür eingesetzten elektrischen Energie – sie zeigt die Effizienz einer Wärmepumpe im Jahresverlauf.

**Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)** ist ein saisonaler Effizienzkennwert für Kälteanlagen und Klimageräte, der das Verhältnis der über die Kühlperiode abgegebenen Kälteleistung zur aufgenommenen elektrischen Energie angibt.

### 3.6 Strombedarfsanalyse

Zur Dimensionierung der elektrischen Anschlussleistung des Wärmepumpensystems wird die Berechnung auf Basis der erdseitigen Jahresenergiemengen durchgeführt. Die bekannten Größen sind:

- Entnommene Wärmemenge aus dem Erdreich
- Eingebrachte Wärmemenge (Kälte) in das Erdreich
- Betriebsstunden für Heizen und für Kühlen
- Jahresarbeitszahl (JAZ) für Heizen
- SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) für Kühlen

Die elektrische Leistung wird für die maximal technisch verfügbare geothermische Energiemenge berechnet und nicht für die Energiemenge, die für die Abdeckung des Wärmebedarfs benötigt wird.

Diese Vorgehensweise ist darin begründet, dass ebenfalls Potenziale für Wärmenetze ermittelt werden sollen. Blöcke, die einen Deckungsanteil von über 100 % aufweisen, können z. B. Nachbarblöcke mitversorgen, dessen Deckungsanteil unter 100 % liegt. Insgesamt wird dadurch die Stromlast deutlich konservativer dargestellt, was bei weiterführenden Analysen unbedingt mit beachtet werden muss.

Die elektrische Leistung des Verdichters ergibt sich aus dem Verhältnis der erdseitigen Energiemenge zur Differenz zwischen Gesamtleistung und Erdanteil. Für Heizen gilt:

$$P_H = \frac{Q_{E,W}}{(JAZ - 1)t_H}$$

Analog für Kühlen gilt:

$$P_K = \frac{Q_{E,K}}{(SEER + 1)t_K}$$

wobei

$P_H$  Stromleistung Heizen

$P_K$  Stromleistung Kühlen

$Q_{W,E}$  extrahierte Wärmemenge, erdseitig

$Q_{K,E}$  gespeicherte Wärmemenge, erdseitig

JAZ Jahresarbeitszahl (4)

SEER jahreszeitlich bedingter Energieeffizienzgrad (6)

$t_H$  Arbeitsstunden Heizen (1800 h)

$t_K$  Arbeitsstunden Kühlen (800 h)

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschreibt das Verhältnis von nutzbarer Wärmemenge zur aufgenommenen elektrischen Energie. Da die erdseitige Wärmemenge nur einen Teil der gebäudeseitig nutzbaren Wärmemenge ausmacht, muss der Anteil der elektrischen Energie über den Faktor JAZ-1 aus der nutzbaren Wärmemenge herausgerechnet werden. Über die angesetzten Arbeitsstunden werden die Energiemengen in Leistung umgerechnet werden.

Analog wird im Kühlbetrieb die gebäudeseitig nutzbare Kühlmenge plus die elektrische Energie erdseitig eingespeichert, was über den Faktor SEER+1 geschieht.

Die erforderliche Anschlussleistung des Wärmepumpensystems ergibt sich aus dem größeren der beiden Werte  $P_H$  und  $P_K$ . Dabei handelt es sich ausschließlich um die Wärmeerzeugungskapazität der Erdwärmesondenanlage. Liegt der Deckungsanteil unter 1, muss die verbleibende Leistung durch eine zusätzliche Anlage bereitgestellt werden, die jedoch nicht Bestandteil dieser Berechnung ist.

### 3.7 Ansatz für das wirtschaftliche Potenzial

Das wirtschaftliche Potenzial der oberflächennahen Geothermie wird anhand der Kennzahl Levelized Cost of Heat (LCoH) ermittelt. Diese Kennzahl gibt die über die gesamte Lebensdauer auf die Wärmemenge bezogenen Gesamtkosten bzw. den daraus entstehenden positiven (Leistung) oder negativen (Kosten) Kapitalwert an. Sie berücksichtigt Folgendes:

- Investitionskosten (Bohrungen, horizontale Anbindung, Wärmepumpe, Rückkühler)
- Reinvestitionen (z. B. Wärmepumpe)
- Laufende Betriebskosten (Wartung, Strom)
- Zeitliche Wertveränderung des Geldes (Diskontierung)

Die Berechnung basiert auf dem Konzept der Lebenszykluskostenrechnung. Investitionskosten werden zu Beginn und in regelmäßigen Abständen (Reinvestitionen) berücksichtigt, während Betriebskosten jährlich anfallen. Alle Kosten und Erträge (Ein- und Auszahlungen) werden auf den heutigen Wert diskontiert, um die zeitliche Wertveränderung des Geldes zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine faire und vergleichbare Bewertung über den gesamten Betrachtungszeitraum. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass unterschiedliche Methoden der Wärmebereitstellung (z. B. Erdwärme, Luftwärme, Fernwärme) direkt miteinander verglichen werden können. Die Kennzahl LCoH erlaubt eine objektive Bewertung der Betriebswirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung  $r$  der Zahlungsströme und der Kapitalkosten und ist damit ein zentrales Instrument für die strategische Wärmeplanung.

Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$LCoH = \frac{I_B + I_{HA} + I_{WP} + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{T}{n} \rfloor} \frac{I_{WP}}{(1+r)^{k-n}} + \sum_{t=1}^T \frac{M+F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{Q}{(1+r)^t}} = WGK$$

wobei

$I_B$	Investitionskosten für Bohrungen
$I_{HA}$	Kosten für horizontale Anbindung
$I_{WP}$	Kosten für Wärmepumpe und Rückkühlung
$M$	jährliche Wartungskosten
$F$	jährliche Stromkosten
$Q$	jährlich gelieferte Wärmemenge
$r$	Diskontsatz
$T$	Lebensdauer der Gesamtanlage
$n$	Lebensdauer der Wärmepumpe

Für die Berechnung werden drei Gruppen von Eingangsgrößen berücksichtigt. Technische Parameter umfassen die Anzahl und Länge der Erdwärmesonden, die installierte Leistung der Wärmepumpe, die Jahresarbeitszahl (JAZ) sowie die geplanten Betriebsstunden. Kostenparameter beinhalten die Bohrkosten pro Meter, die Kosten für die horizontale Anbindung, die Investitionen in Wärmepumpe und Rückkühler sowie Ansätze für Wartung und Strompreise. Ergänzend werden zeitliche Parameter wie die Lebensdauer der Gesamtanlage und der Wärmepumpe sowie der anzuwendende Diskontsatz definiert.

Die in dieser Studie verwendeten Eingabewerte basieren auf einer Kombination aus Literaturrecherche und internen Unternehmensrichtlinien. Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

Tabelle 5: Übersicht der in der Studie verwendeten Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Parametergruppe	Parameter	Wert
<b>Technische</b>	Lebensdauer Gesamtanlage (T)	50 Jahre
	Lebensdauer Wärmepumpe (n)	15 Jahre
<b>Kosten</b>	Bohrkosten	65 €/m
	Horizontale Anbindung	90 €/m bis 200 m, 120 €/m >200 m
	Wärmepumpe	1 000 €/kW
	Rückkühler	130 €/kW
	Wartung	0,5 % der Investitionskosten/Jahr
	Strompreis Winter	0,25 €/kWh
	Strompreis Sommer	0,15 €/kWh
<b>Finanziell</b>	Diskontsatz (r)	5 %

Diese Werte sind im Excel-Arbeitsblatt „ZF\_TechP\_Ergebnisse-v2.xlsx“ hinterlegt, das als Anhang zur Studie bereitgestellt wird. Dort können Anwender die ökonomischen Parameter anpassen und eigene Berechnungen durchführen:

- Blatt „Preismodell“: Eingabe der Kostenparameter (Bohrungen, WP, Strom, Wartung, Diskontsatz)
- Berechnung: Automatische Ermittlung von LC<sub>0</sub>H (WGK) pro Block und Szenario
- Variantenblätter: Ergebnisse für unterschiedliche Tiefen (Rupeltonoberkante Tiefe, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m) und Szenarien (Heizfall, Regeneration, ausgeglichener Betrieb).

Die ökonomischen Parameter sind frei anpassbar, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

### Hinweis zur Berechnung des wirtschaftlichen Potenzials

#### Infobox

Bei der Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials wurde eine bewusst konservative Vorgehensweise gewählt, um die Ergebnisse robust und vergleichbar zu halten. Konkret wurde für ISU5-Blöcke mit einem Deckungsanteil von weniger als 125 % der Wärmebedarfsdeckung der thermische Entzug unter Berücksichtigung nachbarschaftlicher Beeinflussung angesetzt. In diesen Blöcken ist aufgrund der höheren Auslastung und geringeren räumlichen Flexibilität davon auszugehen, dass sich wechselseitige thermische Effekte zwischen benachbarten Erdwärmesonden stärker ausprägen und den erzielbaren Entzugswert begrenzen.

Für Blöcke mit einem Deckungsanteil von mehr als 125 % wurde hingegen angenommen, dass die Platzierung der Erdwärmesonden so optimiert werden kann, dass nachbarschaftliche Beeinflussungen weitgehend vermieden oder deutlich reduziert werden. In solchen Fällen wurde das wirtschaftliche Potenzial daher auf Basis des thermischen Entzugs ohne nachbarschaftliche Beeinflussung berechnet. Diese Annahme ist realistisch, weil in diesen Blöcken ausreichend freie Fläche zur Verfügung steht, um größere Sondenabstände oder alternative Anordnungen (z. B. Randzonen- oder Clusterlayouts) umzusetzen.

Dieses Vorgehen führt insgesamt zu konservativ ermittelten LCoH-Werten, die als obere Abschätzung der blockbezogenen Wirtschaftlichkeit zu verstehen sind.

Auf Projektebene – mit optimierter Platzierung, bedarfsgeführter Dimensionierung und potenzieller Regeneration – sind daher typischerweise geringere Wärmegestehungskosten erreichbar.

### 3.8 Einfluss der Grundwasserströmung auf die Potenziale

Die Strömung des Grundwassers kann die thermischen Verhältnisse im Untergrund beeinflussen und somit auch die Effizienz von Erdwärmesondenanlagen verändern. In der Praxis kann dies sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Reduktion der nutzbaren Entzugsleistung führen – abhängig von Richtung, Geschwindigkeit und Temperatur des Grundwasserstroms.

Im Rahmen dieser Potenzialstudie erfolgt die Bewertung auf der Ebene von ISU5-Blöcken im gesamten Stadtgebiet Berlin. In diesem Maßstab ist der Einfluss der Grundwasserströmung auf das summarische geothermische Potenzial als gering einzustufen aus folgenden Gründen:

- Energieerhaltung gilt: Wärmeverluste eines Blocks durch Grundwasserabfluss entsprechen potenziellen Wärmegewinnen in benachbarten Blöcken durch Grundwasserzufluss.
- Bilanzielle Betrachtung: Bei der Bewertung thermischer Wechselwirkungen zwischen benachbarten ISU5-Blöcken (vgl. Kapitel 3.4.10) werden diese Effekte implizit berücksichtigt.

- TRT-Messungen als Referenz: In der Praxis werden thermische Eigenschaften des Untergrunds häufig über Thermal Response Tests (TRT) ermittelt. Diese Tests integrieren den Einfluss der Grundwasserströmung in die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit. Besonders bei höheren Fließgeschwindigkeiten zeigt sich dies in signifikant erhöhten Werten.

Der Einfluss der Grundwasserströmung wurde in der Potenzialberechnung nicht explizit modelliert, sondern über eine qualitative Bewertung mittels Péclet-Zahl [46] berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wurde eine ampelartige Klassifizierung erstellt, die Gebiete mit potenziell relevanter Grundwasserströmung identifiziert. Diese dient als Hinweiskarte für die Projektplanung, nicht jedoch als Eingangsgröße für die Potenzialberechnung.

Die Peclet-Zahl wurde nach der folgenden Formel berechnet:

$$PEC = \frac{v_{gw} \cdot \rho \cdot c_p \cdot L}{\lambda}$$

wobei

$v_{gw}$  ... Grundwassergeschwindigkeit

$\rho$  ... Grundwasserdichte

$c_p$  ... spezifische Wärmekapazität der Wasser

$\lambda$  ... Wärmeleitfähigkeit

$L$  ... charakteristische Länge (Sondenabstand)

Die Geschwindigkeit des Grundwassers wurde für jeden ISU5-Block anhand der Werte der effektiven hydraulischen Durchlässigkeit, die im stratigraphischen Modell definiert sind,

und des hydraulischen Gradienten aus den Daten des Grundwasserspiegels (Stand 2020) [47], bestimmt:

$$v_{gw} = \frac{K_f \cdot L}{n}$$

wobei

$K_f$  ... Durchlässigkeit

$L$  ... Hydraulischer Gradient

$n$  ... Porosität

Zur qualitativen Bewertung des Einflusses der Grundwasserströmung wurde eine Ampelkarte erstellt, die auf der dimensionslosen Péclet-Zahl basiert (Abbildung 32).

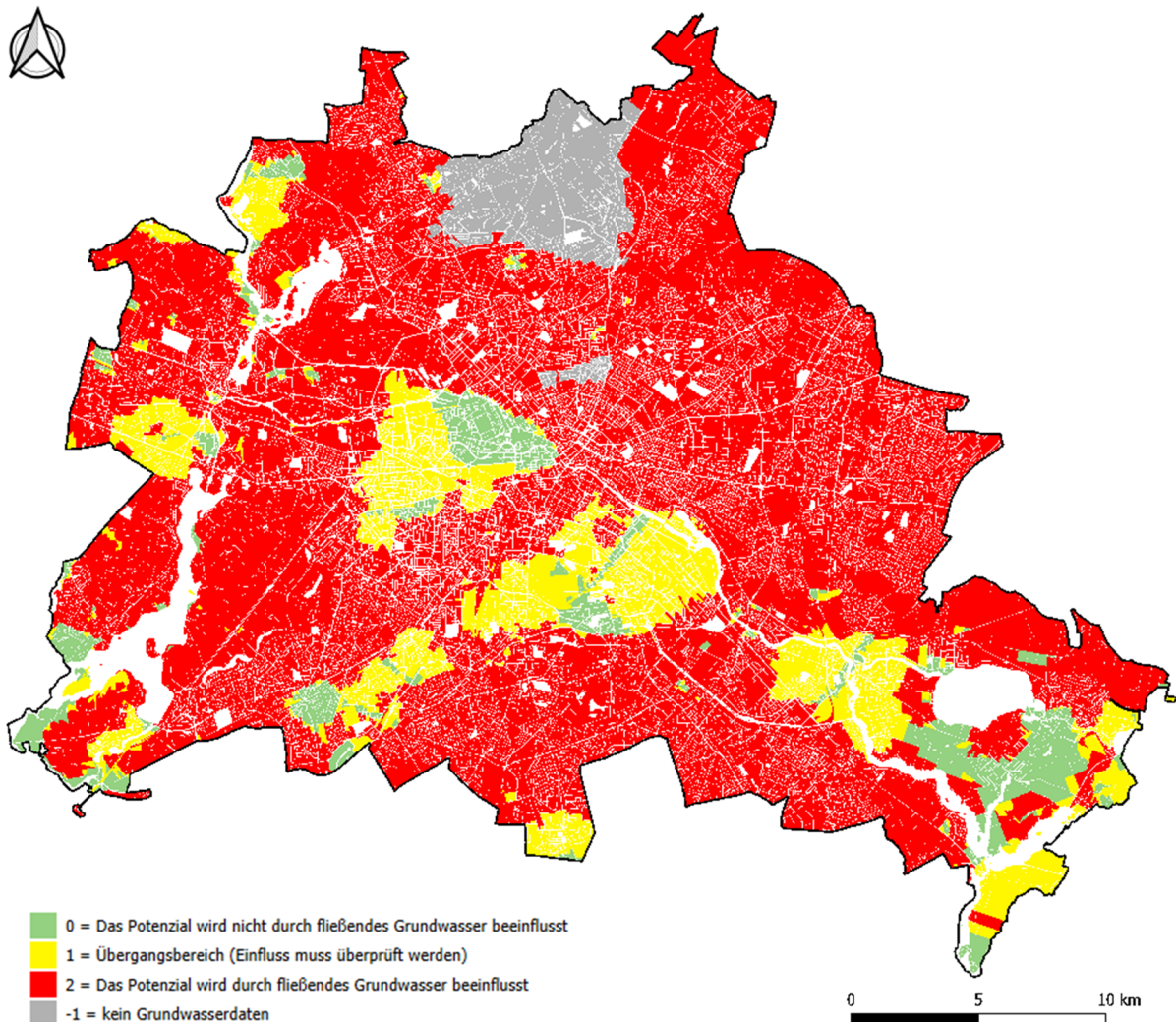


Abbildung 32: Ampelkarte zur Bewertung des Einflusses der Grundwasserströmung auf das geothermische Potenzial. Einstufung auf Basis der Péclet-Zahl: grün ( $P \leq 1$ ) - kein Einfluss, gelb ( $1 < P \leq 5$ ) - Übergangsbereich, rot ( $P > 5$ ) - signifikanter Einfluss.

Die Einteilung erfolgte in Anlehnung an hydrogeologische Fachpraxis sowie auf Grundlage der Projekterfahrung der geoENERGIE Konzept GmbH in Berlin (inkl. realisierter Anlagen, TRT-Messungen und FEFLOW-Modellierungen):

- Péclet-Zahl  $\leq 1$  → *Kein relevanter Einfluss der Grundwasserströmung*  
→ Keine Berücksichtigung erforderlich
- Péclet-Zahl 1-5  
→ *Übergangsbereich*  
→ Standortbezogene Bewertung empfohlen

- Pécelet-Zahl  $\geq 5$

→ *Signifikanter Einfluss der Grundwasserströmung*

→ Bei Projektplanung ist mit erweiterten Anforderungen der Unteren Wasserbehörde zu rechnen (z. B. numerische Modellierung, Monitoringpflichten).

Die räumliche Verteilung dieser Einstufung ist in Abbildung 32 dargestellt.

Für die Projektpraxis kann folgende Empfehlung gegeben werden:

In Gebieten mit hoher Pécelet-Zahl oder bekannten hydrogeologischen Besonderheiten wird empfohlen, im Rahmen konkreter Projekte eine detaillierte Analyse der Grundwasserverhältnisse durchzuführen. Dies kann z. B. durch standortspezifische TRT-Messungen, numerische 3D-Simulationen oder konservative Auslegungsansätze erfolgen. Zudem ist in solchen Fällen ein besonderer Schutz des thermischen Potenzials benachbarter Grundstücke sicherzustellen.

### 3.9 Methodik für Erdwärmebrunnen (offene Systeme)

Die Abschätzung des geothermischen Potenzials erfolgt blockweise auf Basis der ISU5-Diskretisierung. Ziel ist die Ermittlung einer Potenzialabschätzung für die Nutzung in offenen geothermischen Systemen. Die Methodik basiert auf hydraulischen und thermischen Parametern sowie vereinfachten geometrischen Annahmen.

Es handelt sich um ein rahmenhaftes Bewertungsverfahren, das auf mittleren Modellwerten beruht. Es werden ausschließlich die Möglichkeiten zur Wasserentnahme betrachtet – eine Bewertung der Wiedereinleitung (Versickerung) erfolgt nicht. Bestehende Brunnenanlagen oder technische Objekte wurden nicht berücksichtigt.

Für die grobe Potenzialabschätzung wurde das Grundwasser im oberen Untergrund (Quartär) betrachtet und definiert als das Wasser oberhalb der Oberkante des Holstein-Horizonts im stratigraphischen Modell nach Frick.

Die Bewertung basiert auf zwei Hauptparametern:

- Grundwassermächtigkeit: Differenz zwischen der Oberkante des Holstein-Horizonts und dem Grundwasserspiegel
- Flurabstand: Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel

Das verwendete stratigraphische Modell ist konzeptionell und basiert auf mittleren Werten für die gesamten stratigraphischen Einheiten. Lokale geologische Besonderheiten werden nicht berücksichtigt – siehe Diskussion zur Aussagekraft des Modells im Rahmen der Erstellung des geothermischen Modells.

Als perspektivisch günstig wurden jene ISU5-Blöcke eingestuft, in denen folgende Gegebenheiten bestehen:

- Grundwasserspiegel liegt weniger als 20 m unter Gelände

- Grundwassermächtigkeit ist überdurchschnittlich hoch

### 3.9.1 Grundwasserbeschaffenheitsbewertung

Die Wasserchemie beeinflusst maßgeblich den Betrieb des Grundwasserkreislaufs in offenen Systemen. Die Qualität des Wassers bestimmt die Effizienz und Lebensdauer der Anlage, da ungeeignete chemische Zusammensetzungen Korrosion oder Ablagerungen, in der Ober- tageanlage aber auch in den Brunnen, verursachen können. Für einen nachhaltigen Betrieb ist insbesondere die Ausfällung von Eisen und Mangan zu verhindern. Dies lässt sich durch eine erzwungene Fällung im Grundwasserleiter oder aber einen Sauerstoffausschluss im Gesamtsystem (Brunnen + obertägiger Grundwasserkreislauf) realisieren. [48]

Es besteht grundsätzlich die Gefahr der Eisenausfällung, wenn die folgenden kritischen Werte insgesamt erreicht sind:

- pH <7,5
- O<sub>2</sub> <20%; <2 mg/l
- Fe<sup>2+</sup> >0,2 mg/l

Es besteht grundsätzlich die Gefahr der Manganausfällung, wenn die folgenden kritischen Werte insgesamt erreicht sind:

- O<sub>2</sub> <20%; <2 mg/l
- Mn<sup>2+</sup> >0,1 mg/l

Die Eingangsdaten stammen aus dem Berliner Geoportal [49], wobei die Maximalwerte der letzten zwei Jahre verwendet wurden. Die Messpunkte wurden – sofern verfügbar – den entsprechenden Grundwasserleitern zugeordnet.

### 3.9.2 Abschätzung der thermische Leistung

Für jeden ISU5-Block wird der maximale Einflussbereich des Absenktrichters berechnet. Es wird analysiert, welcher maximale Absenktrichter in einem Block entstehen darf.

Die maximal zulässige Absenkung der Grundwasseroberfläche wird gemäß folgender empirischer Formel [50] berechnet:

$$\Delta s = \frac{R}{3000 \cdot \sqrt{K_f}}$$

Wobei

- |            |                                 |
|------------|---------------------------------|
| $R$        | Reichweite der Absenkung [m]    |
| $\Delta s$ | maximal zulässige Absenkung [m] |
| $K_f$      | Filtrationskoeffizient [m/s]    |

Die Absenkung  $\Delta s_{\max}$  wird so gewählt, dass sie entweder durch die Reichweite des Blocks begrenzt ist oder durch die wassergesättigte Mächtigkeit des Quartärs – je nachdem, welcher Wert kleiner ist. Eine Korrektur der Absenkung in Abhängigkeit von der Filterlänge wurde nicht vorgenommen.

Die Förderrate  $q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] wird auf Basis der Transmissivität und der Reichweite des Absenktrichters [51], [52] berechnet:

$$q = \frac{2\pi T \Delta s}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

wobei

$T$  Transmissivität [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] =  $K_f \cdot$  wassergesättigte Mächtigkeit

$R$  Radius des Brunnens [ $\text{m}$ ] (typisch: 0,2 m)

Die thermische Leistung  $P$  [ $\text{kW}$ ] ergibt sich aus dem Produkt der Förderrate, der Temperaturdifferenz und den physikalischen Eigenschaften des Wassers:

$$P = q \Delta T c_p \rho$$

wobei

$\Delta T$  Temperaturdifferenz [ $\text{K}$ ] = mittlere Grundwassertemperatur – minimale Rückführungstemperatur

$c_p$  spezifische Wärmekapazität von Wasser (4,18  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

$\rho$  Dichte von Wasser (998  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Die mittlere Grundwassertemperatur wird blockweise aus geologischen Tiefendaten (20–100 m) abgeleitet. Als minimale Rückführungstemperatur wird ein konservativer Wert von 5 °C verwendet, basierend auf technischen und genehmigungsrechtlichen Vorgaben.

Die angewandte Methode stellt eine vereinfachte Abschätzung dar und unterliegt mehreren Einschränkungen. Es wurden keine Korrekturen hinsichtlich der Länge der Filterstrecken oder hydraulischer Verluste vorgenommen.

Ebenso wurde auf eine Simulation des thermischen Langzeitverhaltens verzichtet. Bestehende Brunnenanlagen oder technische Objekte im Untersuchungsgebiet wurden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Analyse dienen ausschließlich einer groben Potenzialabschätzung und ersetzen keine standortspezifische Planung oder Detailuntersuchung.

## 4 Ergebnisse der Potenzialermittlung

### 4.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial beschreibt die maximal nutzbare erdseitige Wärmeenergie pro ISU5-Block unter idealisierten Rahmenbedingungen. Es setzt voraus, dass die gesamte Blockfläche belegbar ist und ein standardisiertes Lastprofil angewendet wird. Nur Blöcke, die vollständig als Gewässer oder Friedhofareale gekennzeichnet sind, werden bei der Analyse nicht betrachtet und gelten hier als Ausschlussflächen. Damit stellt das theoretische Potenzial einen Maximalwert dar und dient als Referenz für die Wirkung technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Einschränkungen in den Kapiteln 4.2 und 4.3.

Die Ergebnisse des theoretischen Potenzials sind in der Tabelle „ZF\_TheorP\_Ergebnisse.xlsx“ und der räumlichen Datenbank „Potenzial-Obeflaechenaeh-Geothermie.gpkg“ in der Tabelle „theoretisches\_potenzial“ zusammengefasst.

Das theoretische Potenzial steigt mit der nutzbaren Bohrlochtiefe (von 100 m → 150 m → 200 m → 300 m → RT). Das liegt vor allem daran, dass die Erdwärmesonden, die als Wärmetauscher fungieren, länger werden (größere Wärmetauscherfläche → höhere Dauerentnahme von Energie an der Sonde, Abbildung 33). Dieses Prinzip überwiegt sogar den unterirdischen städtischen Wärmeinseleffekt, der in Berlin der ersten ca. 80 m deutlich aufheizt.



Abbildung 33: Theoretisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin, links) und für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder 400m, rechts), Heizfall.

Die Temperatur nimmt mit zunehmender Tiefe grundsätzlich zu, jedoch nicht linear. Dies liegt daran, dass die g-Funktion, die den thermischen Antwortfaktor des Erdreichs beschreibt, nicht proportional mit der Tiefe skaliert.

Geologische und thermodynamische Eigenschaften des Gesteins sowie das Vorhandensein von Grundwasser beeinflussen zusätzlich den Temperaturgradienten. Der stetige Anstieg bleibt jedoch erhalten.

Das theoretische Potenzial steigt mit zunehmender Regeneration des Untergrunds: Ausgeglichener Betrieb > 50 % Regeneration > Heizfall (Abbildung 34). Der Grund dafür ist die saisonale Wärmerückführung, die das Quelleniveau stabilisiert und die Einhaltung der thermischen Grenztemperaturen über den Bemessungszeitraum erleichtert. Dadurch kann je Sonde (und damit je Block) eine höhere Jahresentzugsarbeit angesetzt werden. Die drei standardisierten Lastprofile und ihre Nutzung in der Simulation sind in der Berichts-Methodik ausgewiesen und Excel-Blatt „Szenarien“ abgebildet.

Die Blockwerte des theoretischen Potenzials spiegeln die räumliche Variabilität der geothermischen Parameter wider (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Temperatur). In Bereichen mit reduzierter effektiver Wärmeleitfähigkeit (z. B. im südwestlichen Stadtgebiet) sind die Entzugswerte je Meter eher geringer als in Bereichen mit höheren Leitfähigkeiten.

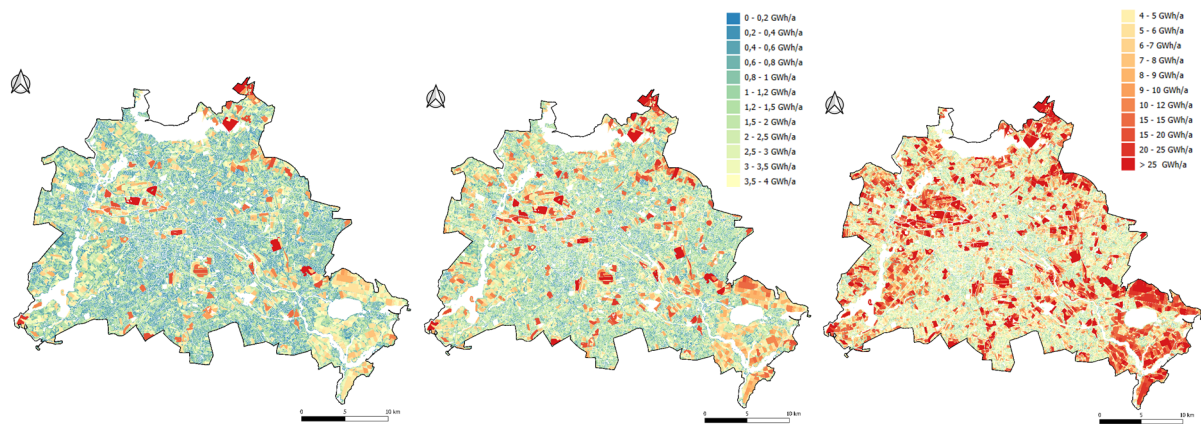


Abbildung 34: Theoretisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), ausgeglichener Betrieb (rechts).

Die Einzelblock-Variante liefert erwartungsgemäß höhere theoretische Potenziale als die Nachbarschaft-Variante, da in letzterer die thermische Überlagerung durch angrenzende Felder berücksichtigt wird (konservativer Grenzfall). Beide Ergebnisse werden ausgewiesen, um Planungsbandbreiten und systemische Wechselwirkungen transparent zu machen. Der Unterschied zwischen beiden Varianten nimmt mit steigendem Regenerationsgrad tendenziell ab, da die thermische Belastung des Untergrunds durch die zusätzliche Wärmeinjektion im Sommer reduziert wird. Das hier ausgewiesene Potenzial ist idealisiert. Es ignoriert technische, naturschutzfachliche, rechtliche und städtebauliche Restriktionen (z. B. Gebäude, Bäume, Leitungen, Schutzgebiete) ebenso wie logistische Aspekte der Bohrbarkeit. Die daraus resultierende Lücke zum technischen Potenzial wird in Kapitel 4.2 quantifiziert.

## 4.2 Technisches Potenzial

Das technische Potenzial beschreibt die maximal nutzbare erdseitige Wärmeenergie pro ISU5-Block unter möglichst realistischen, baulich-räumlichen Randbedingungen. Im Unterschied zum theoretischen Potenzial wird die belegbare Fläche eines Blocks auf die tatsächlich verfügbare Freifläche eingeschränkt und es werden Mindestabstände zwischen den Sonden eingehalten. Grundlage ist die in den Geodaten geführte Freifläche je Block sowie die darauf aufbauende Sondenbelegung mit einem Mindestabstand von 8 m. Die Ergebnisse des technischen Potenzials sind in der Tabelle „ZF\_TechP\_Ergebnisse\_v2.xlsx“ und der räumlichen Datenbank „Potenzial-Obeflaechenaeh-Geothermie.gpkg“ in der Tabelle „technisches\_potenzial“ zusammengefasst.

Die Szenarien und Varianten sind genauso aufgebaut wie beim theoretischen Potenzial mit den Regenerationsgraden (Heizung, 50 % Regeneration und ausgeglichener Betrieb), den Varianten „Einzelblock“ und „Nachbarschaft“ und für alle genannten Tiefenstufen.

Hinweis: Das Exceldateien enthalten zusätzlich Hilfsgrößen für energiewirtschaftliche Folgekennzahlen (z. B. JAZ, SEER, FWH\_Deckung zur Fernwärmeabdeckung und die Größe des Wärmebedarfs mit FW-Korrektur). Diese werden für das technische Potenzial nicht restriktiv eingesetzt, sondern dienen der Deckungs- bzw. Vergleichsbetrachtung in den nachfolgenden Kapiteln.

Die Freiflächenverfügbarkeit ist der dominierende Treiber der Sondenanzahl pro Block (Stadtstruktur 2023: Freifläche [m<sup>2</sup>]). Blöcke mit geringer Freifläche oder starker Fragmentierung ermöglichen weniger Sonden und erzielen trotz günstiger Untergrundparameter ein reduziertes Potenzial; umgekehrt können freiflächenreiche Blöcke mehr Sonden aufnehmen. Als Ergebnis ist das technische Potenzial entsprechend kleiner gegenüber dem theoretischen Potenzial aufgrund der reduzierten Fläche und damit veränderten Geometrie (siehe Abbildung 35).

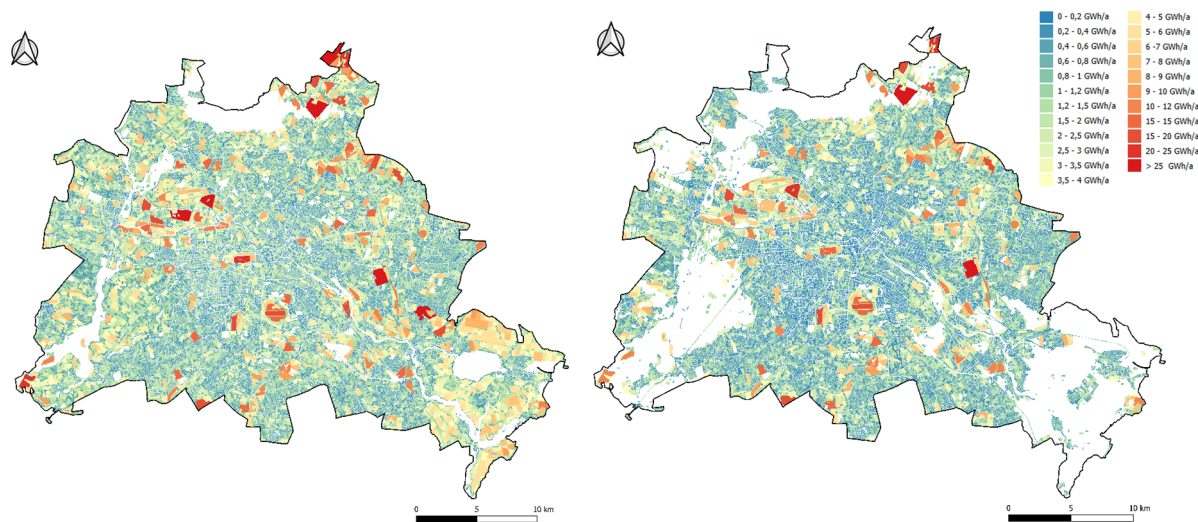


Abbildung 35: Theoretisches (links) und technisches (rechts) Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m, Heizfall.

Analog zum theoretischen Potenzial steigen die blockbezogenen technischen Potenziale mit zunehmender nutzbarer Bohrlochtiefe (100 → 150 → 200 → 300 → RT). Der nicht lineare Zusammenhang des Temperaturgradienten und Erdwärmestroms, macht sich vor allem bei größeren Feldern mit geothermischen Sonden bemerkbar. Der grundlegende Aufwärtstrend bleibt jedoch erhalten. Die geologische Rahmensetzung (u. a. Tiefe der Rupeltonoberkante) beeinflusst außerdem die maximal wirtschaftlich sinnvolle Tiefe.

Es gilt wieder: Ausgewogener Betrieb > 50 % Regeneration > Heizung (Abbildung 36). Mit steigendem Regenerationsanteil stabilisiert sich die Quelle, was die Einhaltung der vorgeschriebenen Temperaturgrenzwerte erleichtert.

Die Einzelblock-Variante zeigt genauso wie beim theoretischen Potenzial höhere technische Potenziale als die Nachbarschaft-Variante, welche beim technischen Potenzial ebenfalls einen konservativen Grenzfall darstellt. Die Ausweisung beider Fälle gibt einen Überblick zum Ausmaß der thermischen Wechselwirkungen im Untergrund.

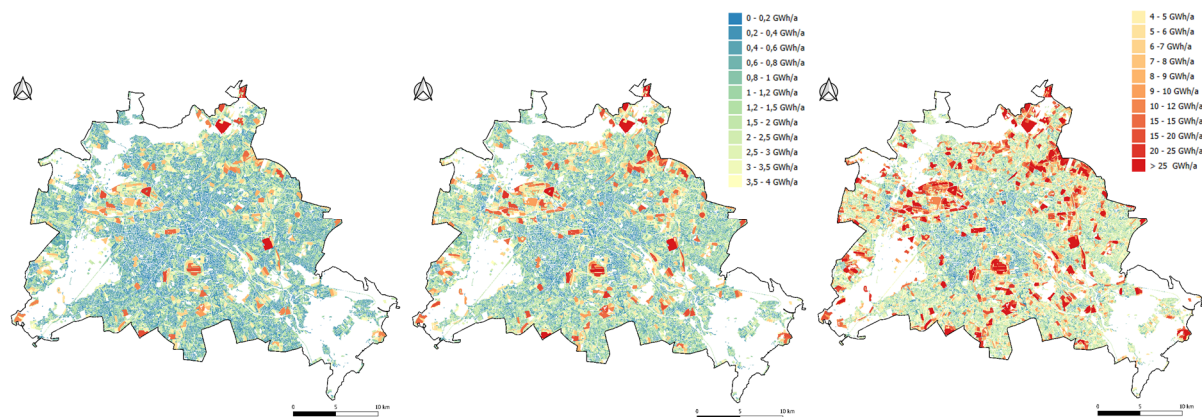


Abbildung 36: Technisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

Neben dem technischen Potenzial für klassische vertikale Erdwärmesonden wurde auch die Variante „Technisches Potenzial mit innovativen Ansätzen“ (Abbildung 37) ausgearbeitet – (siehe Excel-Arbeitsblatt „ZF\_TechP\_InA\_Ergebnisse.xlsx“ sowie Tabelle „technisches\_potenzial\_innovative\_ansaetze“ der räumlichen Datenbank „Potenzial-Obeflaechenaeh-Geothermie.gpkg“).

Diese berücksichtigt neben der vertikalen Anordnung auch schräge Sonden. Die kombinierte Größe wird als „EWS\_TechP + InA“ bezeichnet. Diese Option erhöht die Anzahl der Sonden pro Block dort, wo die reine Nutzung freier Flächen begrenzt ist, und eröffnet weitere Projektmöglichkeiten für dicht bebaute städtische Räume.

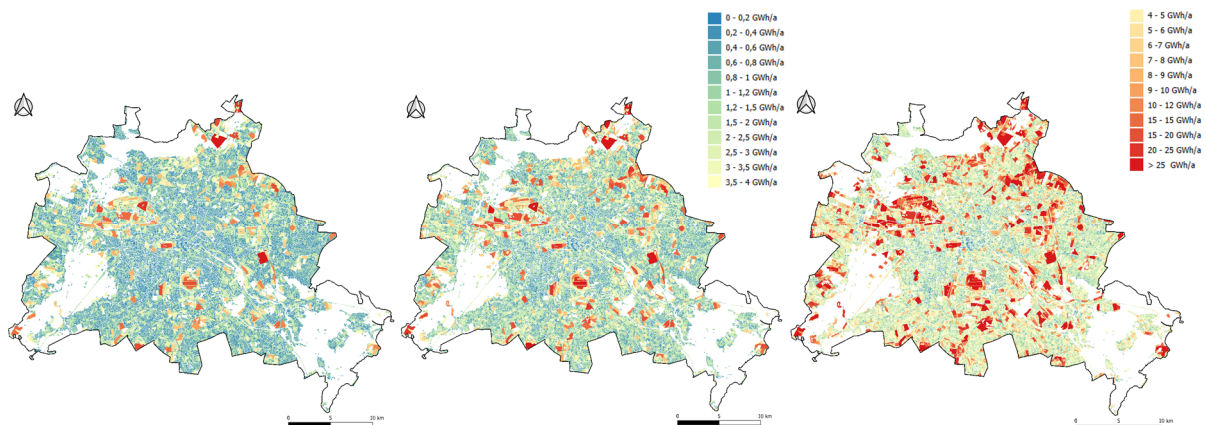


Abbildung 37: Technisches Potenzial mit innovativen Ansätzen des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50% (mittel), Ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

Das hier angegebene technische Potenzial berücksichtigt bauliche und räumliche Einschränkungen wie Bebauung, Verkehrsinfrastruktur, Vegetation (in der Berliner Datenbank registrierte Bäume und als Wald oder Baumschule gekennzeichnete Flächen) sowie bauliche und logistische Einschränkungen (Entfernung zu Gebäuden für Bohrungen) in den Details zur

Potenzialbewertung. Für die Umsetzung eines konkreten Projekts müssen die hier angegebenen Daten auf Projektebene präzisiert werden.

Das technische Potenzial berücksichtigt keine Genehmigungsbedingungen, die sich im Laufe der Zeit ändern können. Der aktuelle Stand der Genehmigungsbedingungen wird in den Kapiteln 2.6.3 und 3.2.3 betrachtet und sollte unbedingt bei zukünftigen Schritten miteinbezogen werden.

### 4.3 Deckungsanteil

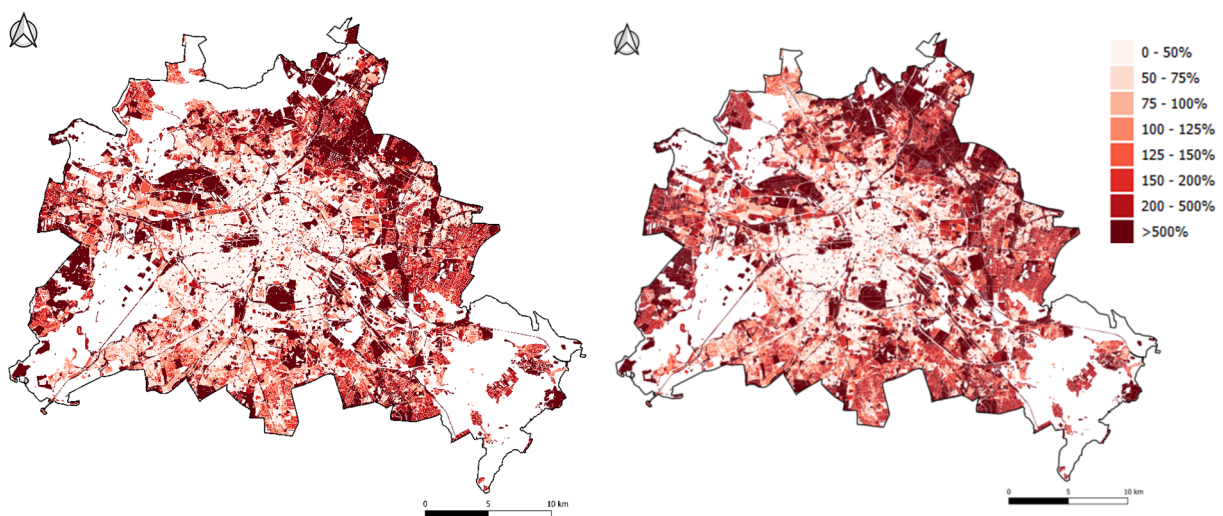


Abbildung 38: Deckungsanteil des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin, links) und für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m, rechts), Heizfall, Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

Der Deckungsanteil beschreibt das Verhältnis zwischen dem technischen Potenzial eines ISU5-Blocks und dessen Wärmebedarf.

Er ist eine zentrale Kenngröße für die Bewertung der Eignung oberflächennaher Geothermie im urbanen Kontext.

Mit zunehmender Bohrtiefe steigt der Deckungsanteil in aller Regel an, wobei der Übergang von 100 m auf die maximal zulässige Tiefe (Rupeltonoberkante bzw. 400 m) besonders deutlich ausfällt. Gleichzeitig treten ab einer gewissen Tiefe abnehmende Grenzerträge auf, da thermische Interferenzen zwischen Sonden und die flächenbedingt begrenzbare Sondendichte zu einer Sättigung der zusätzlich erschließbaren Leistung führen. In der räumlichen Darstellung von Abbildung 38 wird diese Tiefenabhängigkeit sichtbar: Gebiete mit ausreichendem „Tiefenspielraum“ profitieren überdurchschnittlich, während Blöcke, in denen die zulässige Tiefe früh erreicht wird oder die Freiflächen knapp sind, einen moderateren Zuwachs verzeichnen.

Ein zweiter, besonders wirksamer Hebel ist die Regeneration des Untergrunds. Wie Abbildung 39 für eine Tiefe von 100 m zeigt, erhöht sich der Deckungsanteil von der reinen Heizfall-Betrachtung über das Szenario Regeneration 50 % bis hin zum ausgeglichenen Betrieb spürbar. Aktive Regeneration – etwa durch sommerliche Kühlung oder die Einspeisung erneuerbarer Überschüsse – stabilisiert das Temperaturfeld, mindert Leistungsabfälle über die Heizperiode und hebt dadurch das nutzbare, technisch abrufbare Wärmeevolumen. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn die Tiefe gering ist oder Flächenrestriktionen eine Ausweitung des Sondenfeldes begrenzen. In solchen Konstellationen lässt sich ein Teil der „fehlenden Tiefe“ durch intelligente Betriebsstrategien kompensieren.

Zwischen Bedarfshöhe und Deckungsanteil besteht eine negative Korrelation: Steigt der Bedarf – bei ansonsten gleichen Randbedingungen –, sinkt der Deckungsanteil. Umgekehrt führen kleine Bedarfe oft zu hohen Deckungsanteilen. Für planerische Entscheidungen ist der Deckungsanteil daher stets gemeinsam mit der absoluten Jahreswärme zu lesen. Ein Sonderfall ergibt sich in Zonen mit hoher Fernwärmeabdeckung. In diesen Bereichen entsteht ein hoher Deckungsanteil, da ein Teil des Wärmebedarfs über die Fernwärmeversorgung bereitgestellt wird bei gleichbleibendem geothermischem Angebot. Dortige hohe Deckungsanteile sind deshalb sorgfältig hinsichtlich ihrer absoluten Relevanz zu interpretieren.

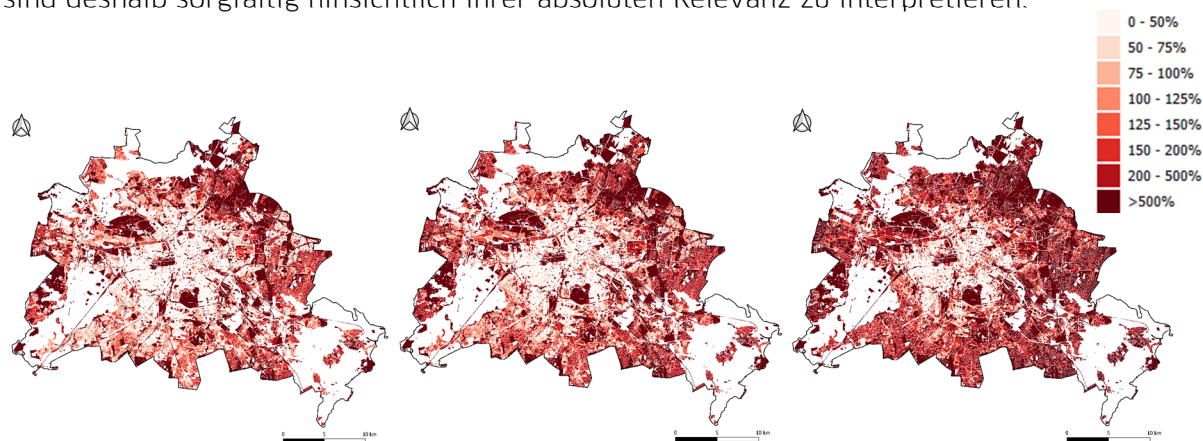


Abbildung 39: Technisches Potenzial des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglichenen Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

Neben Tiefe und Regeneration bestimmt die Flächenverfügbarkeit maßgeblich die Entwicklung des Deckungsanteils. Größere Freiflächen erlauben mehr Sonden bei regelkonformen Mindestabständen und erhöhen so die entziehbaren Wärmemengen bis zu einem gewissen Punkt (siehe auch 3.4.9). Im Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung zeigen sich zudem räumliche Glättungseffekte: In dichter belegten Clustern werden lokale Spitzen im Deckungsanteil gedämpft, während andere Blöcke durch die Wirkung der saisonalen Lastprofile vom Zustrom regenerativer Energie im Untergrund profitieren und dadurch höhere Werte erreichen können.

Der Deckungsanteil steigt vor allem mit zunehmender Tiefe und aktiver Regeneration und profitiert von ausreichend Freifläche sowie einer günstigen Nachbarschaftskonstellation. Höhere Bedarfe reduzieren den Wert, wobei die Erhöhung der Fernwärme-Deckung ihn dagegen

rechnerisch erhöhen kann, ohne die absoluten MWh/a zu vergrößern. Für die Priorisierung im Projektkontext sind deshalb Deckungsanteil und absolute Jahreswärme stets gemeinsam zu bewerten.

## Geothermisches Gesamtpotenzial & Bedarfsdeckung in Berlin

Infobox

Die Tabelle zeigt das geothermische Potenzial in Raum Berlin für zwei relevante Tiefenbereich, 100 m und Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m (RT) unter drei Betriebsmodi: Heizfall, Regeneration 50 % und ausgeglichener Betrieb.

	Heizfall	Regeneration 50%	Ausgeglichener Betrieb*
100m	13 483 GWh/a	20 649 GWh/a	44 351 GWh/a
RT	18 595 GWh/a	29 709 GWh/a	75 960 GWh/a

### Wenn das geothermische Potenzial mit dem Wärmebedarf in Berlin verglichen wird.

- Gesamtwärmebedarf: 31 440 GWh/a
- Reduzierter Wärmebedarf (durch Fernwärme): 20 203 GWh/a

### Interpretation und Kernaussagen:

- **100 m Potenzial:**
  - Bereits im Heizfall können **13 483 GWh/a** bereitgestellt werden – das entspricht **43 % des Gesamtbedarfs** bzw. **67 % des reduzierten Bedarfs**.
  - Bei teilweiser Regeneration steigt das Potenzial auf **20 649 GWh/a (66 % / 102 %)**.
  - *Im ausgeglichenen Betrieb erreicht die 100m-Variante sogar 44 351 GWh/a, was 141 % des Gesamtbedarfs und 220 % des reduzierten Bedarfs bedeutet.\**
- **Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m (RT):**
  - Heizfall: **18 595 GWh/a (59 % / 92 %)**.
  - Regeneration 50 %: **29 709 GWh/a (95 % / 147 %)**.
  - *Ausgeglichener Betrieb: 75 960 GWh/a, was 242 % des Gesamtbedarfs und 376 % des reduzierten Bedarfs deckt.\**

### Schlussfolgerung:

Selbst bei konservativen Annahmen (Heizfall) kann die oberflächennahe Geothermie in Berlin einen erheblichen Anteil des Wärmebedarfs decken. Bei optimierten Betriebsstrategien (Regeneration, ausgeglichener Betrieb) übersteigt das Potenzial den Bedarf deutlich – sowohl für die gesamte Stadt als auch unter Berücksichtigung der Fernwärmeversorgung.

*Hinweis: Für einen vollständig ausgeglichenen Betrieb im gesamten Gebiet Berlins muss in den Sommermonaten möglicherweise nicht genügend Wärme zur Regeneration vorhanden sein.*

#### 4.4 Potenzialbewertung zu Nahwärmenetzen

Um das Potenzial von Nahwärmenetzen in Berlin zu bewerten, wurde der Wärmebedarf und die Abdeckungsrate von der ISU5-Block-Ebene in Ebenen mit größeren räumlichen Einheiten überführt, den LOR-Gebieten (PLR; BZR, PGR). Diese Analyse (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41) zeigt, in welchen LOR-Gebieten der gesamte Wärmebedarf gedeckt werden kann für die Identifikation eines möglichen Netzgebietes.

LOR-Gebiete mit einem hohen Deckungsanteil liegen eher außerhalb des Zentrums von Berlin. Mit steigendem Anteil der Regeneration und der Tiefe der geothermischen Sonden steigt auch der Deckungsanteil innerhalb des ISU5-Blocks bzw. der LOR-Gebiete. Die in den Randgebieten der Stadt liegenden ISU5-Blöcke mit einem geringeren Wärmebedarf zeigen ein bedeutsames Potenzial für die äußeren LOR-Gebiete. Die Nutzung von kalten Netzen kann ebenfalls im Stadtzentrum in Betracht gezogen werden, obwohl der Deckungsgrad insgesamt geringer ausfällt, gibt es auch hier ISU5-Blöcke mit großem Potenzial für die Netznutzung.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse sind in Form einer räumlichen Datenbank als Anhang zu diesem Bericht enthalten. Die Tabellen „PLR“, „BGR“ und „PGR“ fassen das gesamte technische Potenzial der entsprechenden LOR-Gebiete für eine Tiefe von 100 m und RT (Szenario mit nachbarschaftlichen Einfluss) zusammen. Die Tabellen „Vorzugsblöcke“ zeigen dann die ISU5-Blöcke, die in Gebieten mit einer Abdeckung von  $\geq 100\%$  vorkommen und selbst eine Abdeckung von weniger als 100 % haben.

#### Wo kalte Nahwärmenetze besonders sinnvoll sind

#### Kernbotschaft

Im Zuge der Verknüpfung von nahegelegenen ISU5-Blöcken innerhalb eines LOR-Gebietes eröffnet sich eine übergreifende Betrachtung. Blöcke mit geringem geothermischem Potenzial oder hohem Bedarf können so von angrenzenden Blöcken mit hohem Potenzial profitieren. Diese Blöcke müssen jedoch auf die gemeinsame Wärmequelle zurückgreifen können. So zeigt die Analyse der LOR-Gebiete jene Regionen, welche für die Nutzung von kalten Nahwärmenetzen besonders geeignet sind.

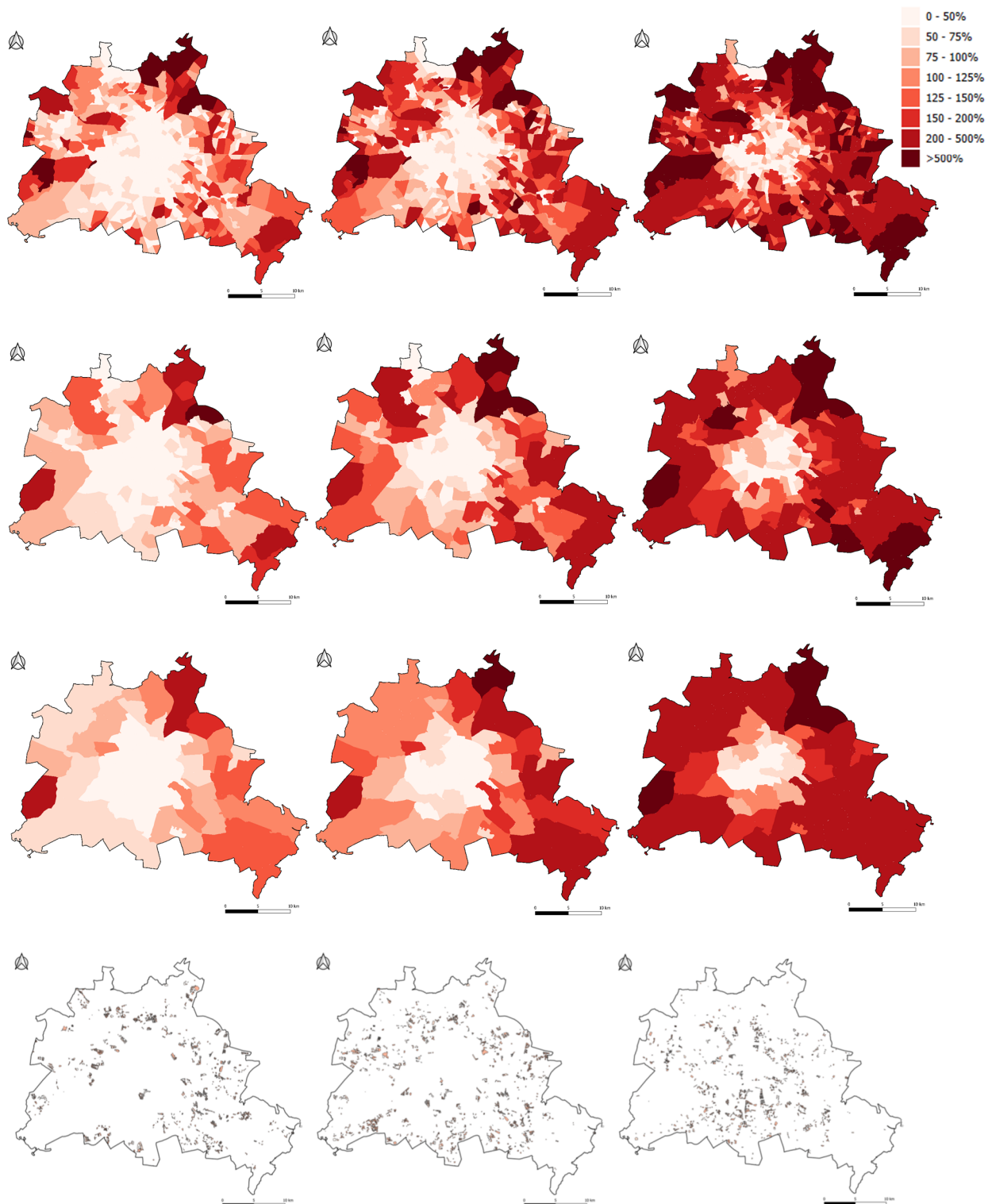


Abbildung 40: Technisches Potenzial für eine Tiefe von 100 m des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe, ISU5-Blöcke mit großem Potenzial für die Netznutzung-vierte Reihe) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

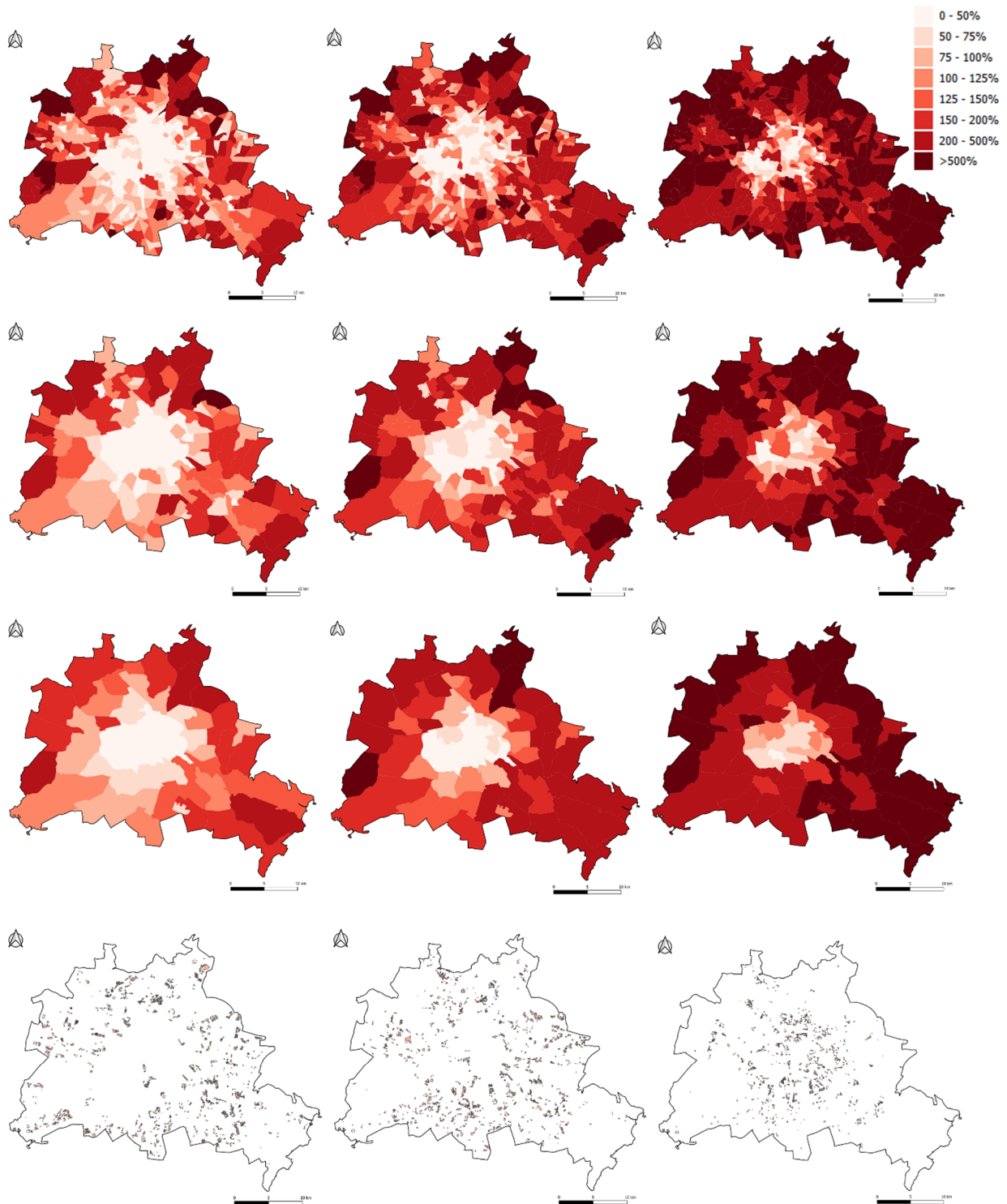


Abbildung 41: Technisches Potenzial für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m) des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe, ISU5-Blöcke mit großem Potenzial für die Netznutzung-vierte Reihe) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), Ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

## Analyse „Kalte Nahwärmenetze“ am Beispiel PLR Gebiet 10100316 Beispiel

Die Analyse zeigt, wie sich lokale Unterschiede im geothermischen Potenzial innerhalb einer funktionalen Einheit ausgleichen lassen. Grundlage ist die Idee, dass Blöcke mit geringerem Potenzial, in denen der Wärmebedarf nicht vollständig durch Geothermie abgedeckt werden kann, durch die Nutzung von Überschüssen benachbarter Blöcke mit versorgt werden können. Auf diese Weise entsteht ein kaltes Nahwärmenetz, das Wärme auf niedrigem Temperaturniveau verteilt und eine effiziente Nutzung lokaler Ressourcen ermöglicht. Die Stadt ist in ISU5-Blöcke unterteilt, die drei Ebenen von LOR-Gebieten zugeordnet sind. Für jeden Block wurde das Verhältnis von geothermischem Potenzial zu Wärmebedarf berechnet, um Blöcke mit Defizit und Überschuss zu identifizieren und räumlich zu analysieren.

Das Beispiel des PLR-Bereichs 10100316 verdeutlicht diesen Ansatz. Das Gebiet kann aktuell 284% seines Wärmebedarfs aus der verfügbaren geothermischen Energie im dortigen Untergrund decken (EWS Tiefe 100m, rein Heizfall). Innerhalb dieses PLR-Bereichs existieren mehrere ISU5-Blöcke, die ihre Wärme nicht vollständig aus eigener bzw. am Standort verfügbaren Untergrundwärme decken können. Zudem gibt es noch andere Blöcke, deren Potenzial den Eigenbedarf übersteigen. Die Verknüpfung dieser Blöcke über ein kaltes Nahwärmenetz eröffnet die Möglichkeit, lokale Ressourcen optimal zu nutzen, externe Energiezufuhr zu reduzieren und die Versorgungssicherheit zu stärken. Dieses Konzept ist besonders relevant für urbane Quartiere mit heterogener Nutzungsstruktur und variierendem Wärmebedarf.



### 4.5 Stromleistungsanalyse

Die folgenden Ausführungen fassen die Ergebnisse der Stromanalyse zusammen. Die Methodik zur Herleitung (bezugnehmend auf erdseitige Jahresarbeit, JAZ/SEER, Betriebsstunden sowie thermische Randbedingungen) ist bereits in Kapitel 3.6 dargestellt und wird hier nicht erneut erläutert. Grundlage der Auswertung sind die in „ZF\_TechP\_Ergebnisse-v2.xlsx“ hinterlegten Varianten und die im Bericht gezeigten Karten auf ISU5-Block- und LOR-Ebene.

#### 4.5.1 Blockebene

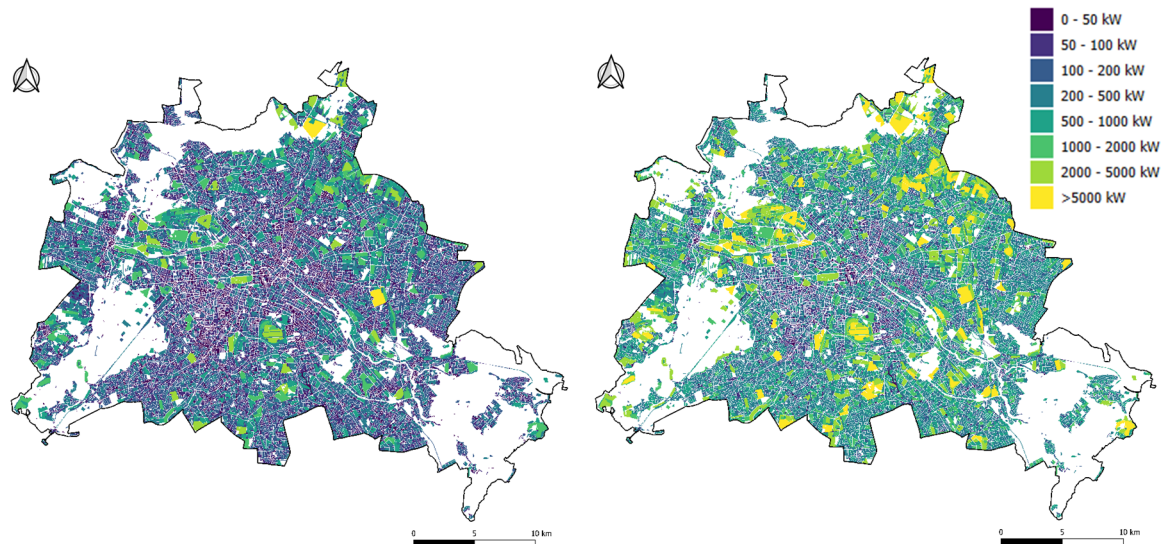


Abbildung 42: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung, Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglichenen Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts).

Im Gesamtbild zeigt sich eine klare Kopplung zwischen technischem Potenzial und elektrischer Leistung der erdgebundenen Wärmepumpen. Wo aufgrund von Freiflächen, Mindestabständen und (gegebenenfalls) innovativen Belegungsansätzen eine höhere EWS-Dichte realisiert werden kann, steigt die absolute erdseitige Jahresarbeit – und damit, bei fixierten Effizienzparametern (JAZ/SEER) und Betriebsstunden, auch die benötigte elektrische Leistung der Verdichter. Die räumlichen Muster der Stromleistung-Karten decken sich deshalb erwartungsgemäß mit den Potenzial-Hotspots: Blöcke, auf denen vielen Sonden installiert werden können, bündeln auch höhere elektrische Leistungen, während stark fragmentierte oder flächenarme Blöcke geringere absolute Anschlusswerte aufweisen (Abbildung 42).

Tiefere Bohrungen (RT, bis max. 400 m) können aus dem Untergrund mehr Wärme bereitstellen (Abbildung 43), weshalb der Stromverbrauch und die maximale Anschlussleistung (kW<sub>el</sub>) hier höher sind als bei flacheren Bohrungen. Dies ist in allen Stadtbereichen erkennbar und wird bei großen Feldern und im ausgeglichenem Betrieb noch größer.

Die Betriebsvarianten zeigen die erwarteten Verschiebungen zwischen Winter und Sommer. Im Heizfall konzentriert sich die elektrische Last auf die kalte Jahreszeit. Bei einer Regeneration von 50% und insbesondere bei der ausgeglichenen Betriebsvariante verlagern sich merkliche Teile der elektrischen Arbeit in den Sommer, weil in diesen Fällen Rückkühlung bzw. Kältebereitstellung aktiv werden (Abbildung 44). In den Karten wird daher der Heizfall als Best-Case für die Netzspitze und der Ausgeglichenen Betrieb als Worst-Case für die Netzspitze ausgewiesen. Diese Kennzeichnung spiegelt nicht die Wirtschaftlichkeit, sondern ausschließlich die elektrische Spitzenlast-Perspektive wider.

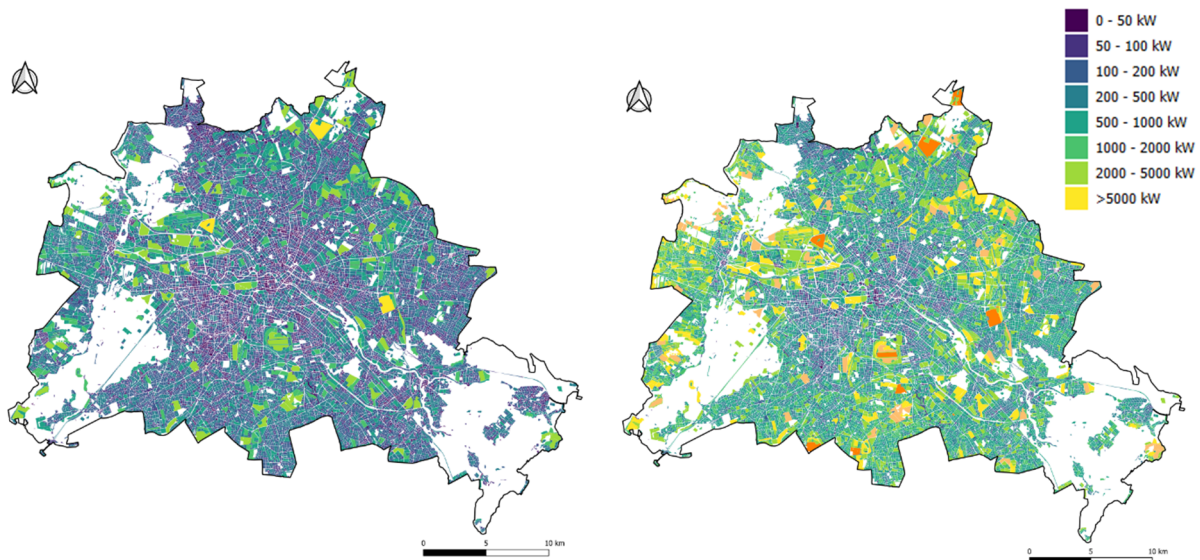


Abbildung 43: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkanten-tiefe oder max. 400 m), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung, Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglichener Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts).

Der Nachbarschaftseinfluss – also die konservative Annahme einer gleichzeitigen Nutzung benachbarter ISU5-Blöcke – führt durch thermische Überlagerung zu reduzierten zulässigen Entzügen je Sonde. In der Leistungsdarstellung äußert sich das in leicht erhöhten Anschlusswerten gegenüber dem Einzelblock-Szenario, da dieselbe gebäudeseitige Wärmemenge (bzw. das gleiche Betriebsziel) unter geringfügig ungünstigeren Quellbedingungen erreicht werden muss. Für die planungsrelevante Netz- und Genehmigungssicht ist diese Nachbarschaftsvariante die maßgebliche Bezugsgröße, weil Belastungsspitzen nicht unterschätzt werden.

Markant ist außerdem der Einfluss der „Fernwärme-Korrektur“ auf die absoluten Stromleistungen. Innerhalb des 250 m-Puffers wird der korrigierte Wärmebedarf pro Block pauschal reduziert, was die elektrische Anschlussleistung in diesen Bereichen spürbar glättet. Daraus folgt auch eine wichtige Lesehilfe für die Karten: Hohe geothermische Deckungsanteile in Fernwärmezonen können rechnerisch auftreten, ohne dass die absoluten Jahresmengen oder Spitzenleistungen hoch sind. Für Netzanschlüsse und Trafodimensionierung zählt letztlich die absolute kW-Spitze, nicht der prozentuale Deckungsanteil.

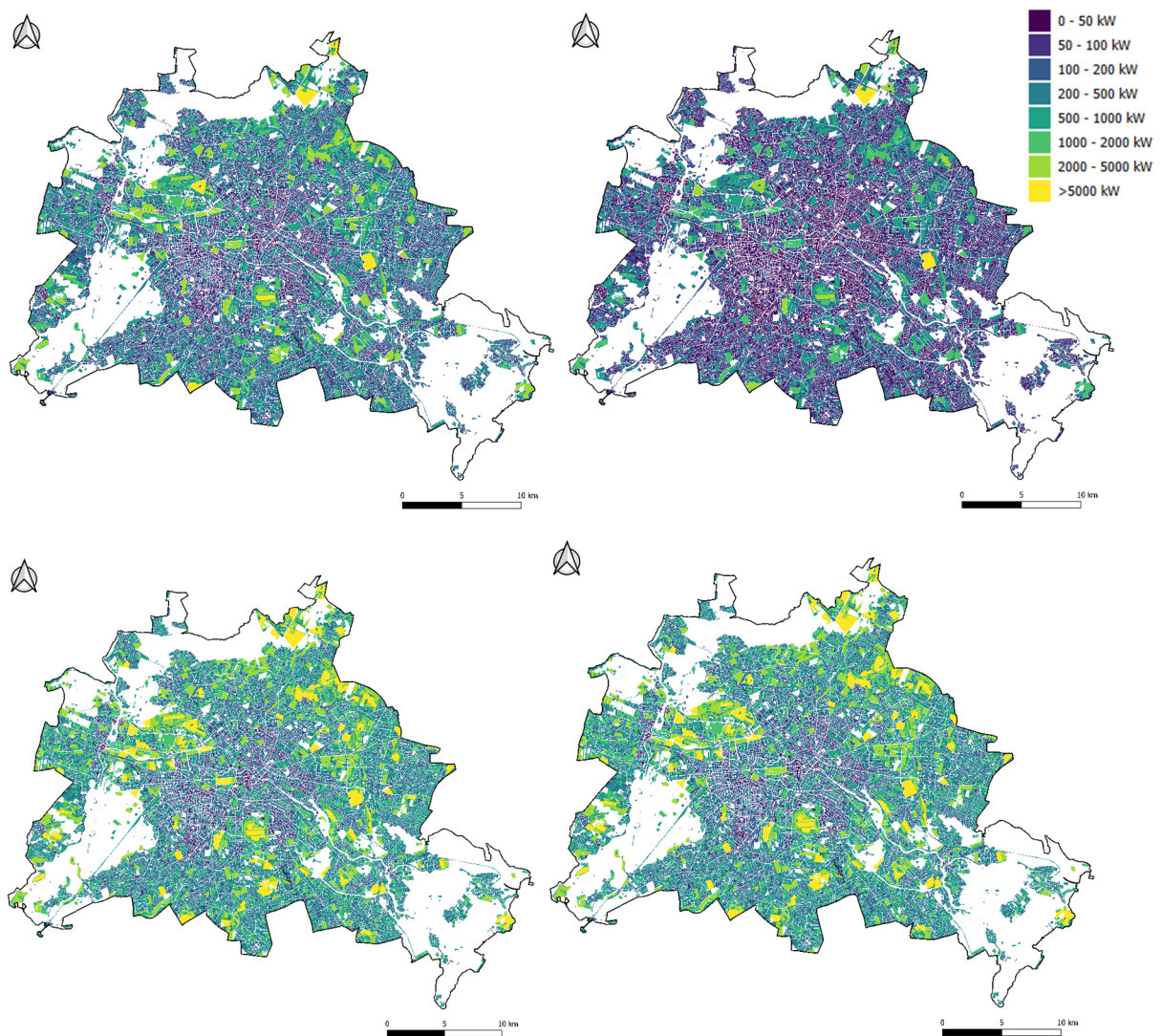


Abbildung 44: Stromleistung des Technisches Potenzials des ISU5-Blocks für eine Tiefe von 100 m. Vergleich der elektrischen Leistung beim Heizen im Winter (linke Seite) und Kühlen im Sommer (rechte Seite) bei 50 % Regeneration (obere Zeile) und ausgeglichenem Betrieb (untere Zeile).

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Freiflächenverfügbarkeit, Erdwärmesonden-Anzahl und -tiefe bestimmen die absoluten Hotspots für elektrische Leistungsspitzen, wenn von einer konstanten JAZ/SEER ausgegangen wird. Die ausgeglichene Betriebsweise verschiebt elektrische Arbeit und teilweise Anschlusspitzen in den Sommer und die Nachbarschaftsvariante bildet die konservative maßgebliche Grundlage für die Netzsicht. Die Fernwärme-Korrektur dämpft die absoluten Lasten/Spitzen innerhalb der betroffenen Einflussbereiche. Die in den Karten sichtbaren Muster sind konsistent mit der technischen Potenziallogik und liefern eine belastbare Basis, um Netzanschlüsse, Betriebskonzepte und Prioritäten in der Umsetzung gezielt abzuleiten.

#### 4.5.2 Gebietsebene

Skaleneffekte prägen die Ergebnisse aus Kapitel 4.5.1 zusätzlich. Mit wachsender Sondenfeldgröße (mehr Sonden je Block bzw. LOR) und größerer Sondentiefe steigen die absoluten Anschlusswerte für die elektrische Leistung. In Summe ergibt sich das typische Kartenbild, bei dem große, gut belegbare Blöcke hohe absolute Anschlussleistungen aufweisen.

Die Zusammenfassung der elektrischen Leistung im LOR-Gebiet (Abbildung 45, Abbildung 46) hilft dabei, den maximalen Einfluss von Erdwärmepumpen auf das Stromnetz zu bewerten. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Werte den Zustand bei voller Ausnutzung des technischen Potenzials des Blocks bzw. des LOR-Bereichs widerspiegeln und nicht nur die Deckung des Wärmeverbrauchs.

Die Ergebnisse, die in diesem Kapitel gezeigt werden, sind im Anhang dieses Berichts als räumliche Datenbank „Stromleistung.gpkg“ zu finden. Die Tabellen „PLR“, „BGR“ und „PGR“ zeigen die Gesamtwerte der jeweiligen LOR-Bereiche für eine Tiefe von 100 m und der Rupeltonoberkante (Szenario mit Nachbarschaftseinfluss) für den Heizfall, 50 % Regeneration und im ausgeglichenen Betrieb. Die Stromleistungen der einzelnen ISU5-Blöcke, die als Grundlage für die Berechnung dienen, sind in der Excel-Datei „ZF\_TechP\_Ergebnisse-v2.xlsx“ enthalten.

#### Sommerlasten als Chance – aus Sicht des Stromnetzes

#### Kernbotschaft

Eine netzdienliche Betriebsweise großer Erdwärmesondenfelder kann elektrische Arbeit in den Sommer verlagern. Dadurch entstehen mehr Betriebsstunden, während die Spitzenlast häufig geringer ausfällt. Im Winter senkt die durch Regeneration erhöhte Quelltemperatur die Lastspitzen und verbessert die Effizienz.

Im Sommer bedeutet Regeneration zusätzliche Arbeit, jedoch bei moderater Leistung. Besonders effizient ist die passive Kühlung, die kaum elektrische Zusatzlast verursacht und gleichzeitig den Untergrund regeneriert. Werden PV-Überschüsse oder Kältebedarfe genutzt, entsteht eine echte Opportunität. Entscheidend ist, dass dadurch andere, weniger effiziente Quellen verdrängt werden. Im Winter führt das höhere Temperaturniveau zu besseren COP-Werten und geringeren Spitzen, auch wenn die Priorität für den Netzausbau weiterhin bei der winterlichen Last liegt.

Für die Planung bedeutet das: Strategien sollten Sommerarbeit gezielt einbinden und Winterspitzen dämpfen. Die Dimensionierung muss nicht nur die Höhe, sondern auch den Zeitpunkt der Spitzenlast berücksichtigen. Regeneration kann fehlende Bohrmeter teilweise kompensieren, während zusätzliche Bohrmeter den Bedarf an aktiver Regeneration reduzieren können. Die Kopplung mit PV, Fernkälte oder Abwärme schafft zusätzliche Synergien und erhöht die Systemstabilität. Fazit: Sommerlasten können das Netz gleichmäßiger auslasten und Winterspitzen reduzieren, wenn Opportunitäten wie PV-Überschüsse und Kältebedarf konsequent genutzt werden.

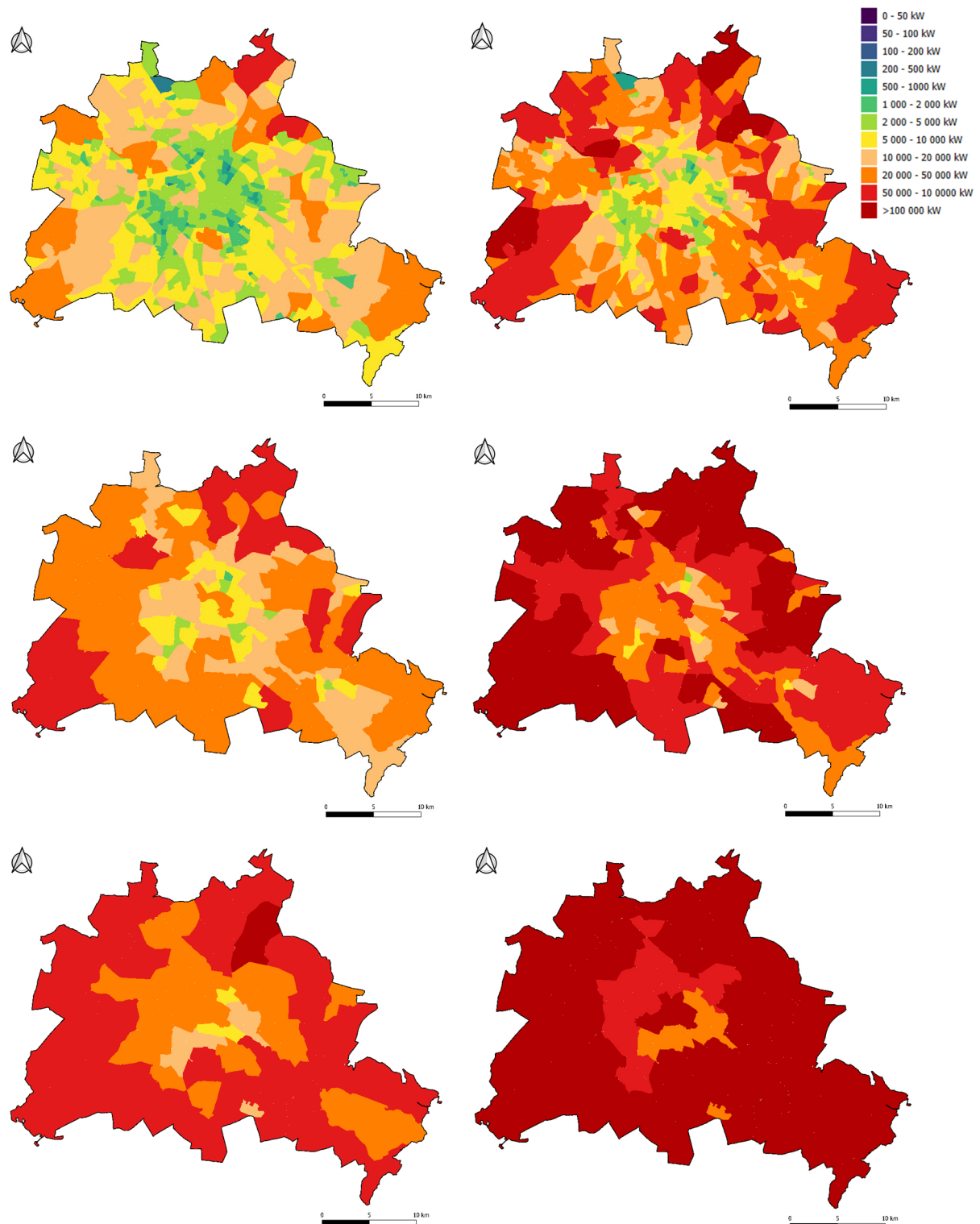


Abbildung 45: Stromleistung des Technisches Potenzials des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe) für eine Tiefe von 100 m (aktueller Stand der Genehmigungspraxis in Berlin), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglichener Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts).

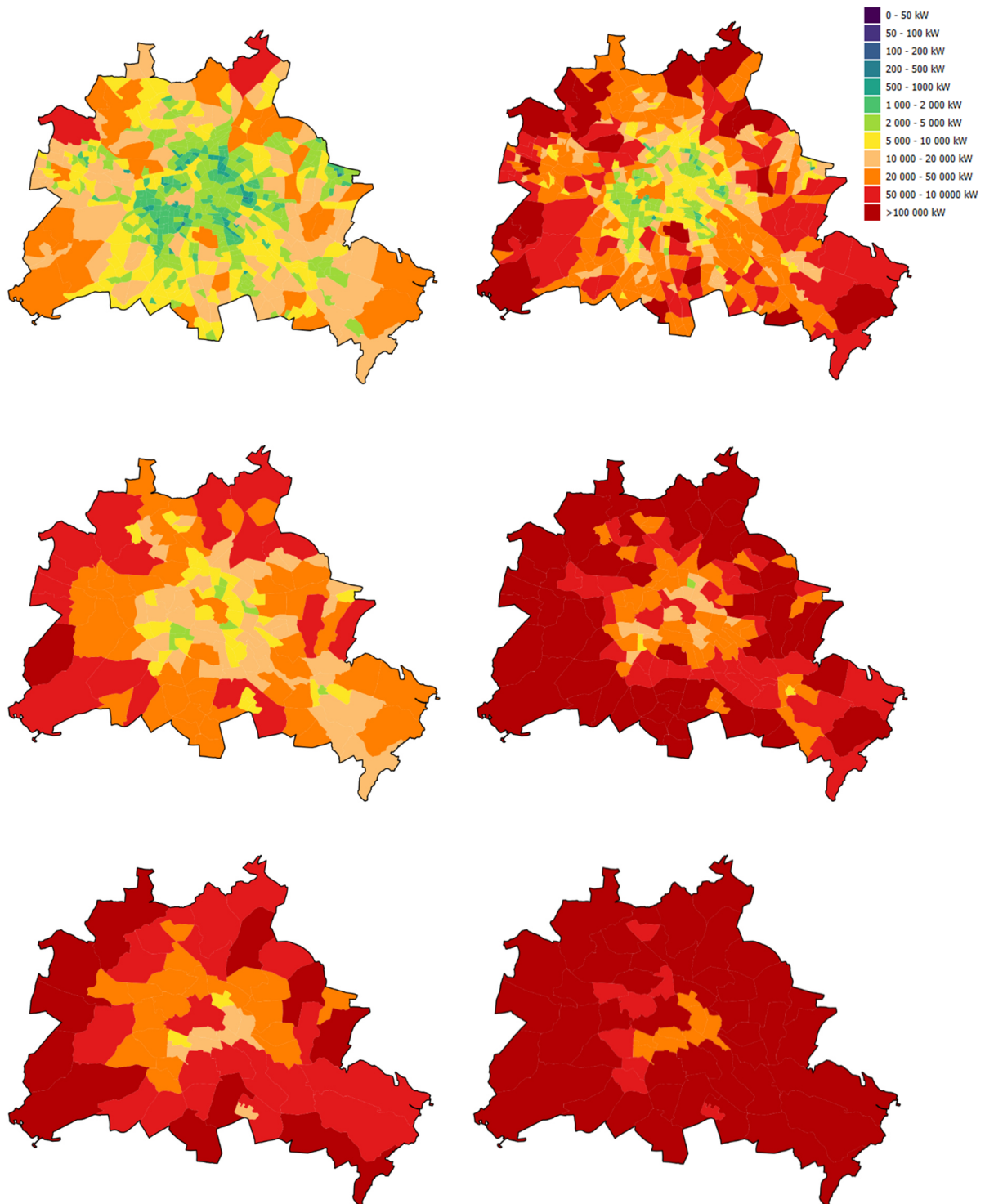


Abbildung 46: Stromleistung des Technisches Potentials des LOR Gebiets (PLR-erste Reihe, BZR-zweite Reihe, PGR-dritte Reihe) für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung. Heizfall-„Best-Case“ für Stromspitzen (links), Ausgeglichener Betrieb-„Worst-Case“ für Stromspitzen (rechts).

## 4.6 Wirtschaftliches Potenzial

Die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials erfolgte auf Basis der Kennzahl LCoH (Levelized Cost of Heat), die die Wärmegestehungskosten in €/kWh angibt. Die Berechnung berücksichtigt Investitions- und Betriebskosten über die Lebensdauer der Anlage. Die Ergebnisse wurden für verschiedene Tiefenstufen, Regenerationsgrade und Blockgrößen ausgewertet. Die Analyse des wirtschaftlichen Potenzials befindet sich in der Datei „ZF\_TechP\_Ergebnisse-v2.xlsx“, in der es möglich ist, aktiv mit den wirtschaftlichen Eingabeparametern zu arbeiten. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse für die folgenden Eingabeparameter vorgestellt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Eingangsparameter, die für die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials verwendet wurden

<b>Investitionskosten</b>		
<b>Bohrkosten (I<sub>B</sub>)</b>		
Lockergestein	65	Euro pro Meter
<b>Horizontale Anbindung (I<sub>HA</sub>)</b>		
bis 200m	90	Euro pro Meter
ab 200 m	120	Euro pro Meter
<b>EWS Abstand</b>		
Minimal	8	m
Maximal	11	m
<b>Wärmepumpe (I<sub>WP</sub>)</b>		
Wärmepumpe	1000	Euro pro kW
Rückkühler	130	Euro pro kW
<b>Betriebskosten</b>		
<b>Wartungskosten (M)</b>		
Pauschal	0,5	% Investitionskosten pro Jahr
<b>Stromkosten (F)</b>		
Winter	0,25	Euro pro kWh
Sommer	0,15	Euro pro kWh
<b>Zeitwerte</b>		
Lebenszyklus der Anlage (T)	50	Jahren
Lebenszyklus der Wärmepumpe (n)	15	Jahren
Diskontsatz	5	%

Die Ergebnisse zeigen, wie sich die Wärmegestehungskosten entwickeln, wenn das technische Potenzial eines Blocks vollständig ausgeschöpft wird. Dies bedeutet, dass die ausgewiesenen LCoH-Werte nicht direkt dem Wert entsprechen, der bei einer rein bedarfsorientierten Auslegung zu erwarten wäre. Auf Projektebene können daher in der Regel niedrigere LCoH-Werte erzielt werden. Besonders in den äußeren ISU5-Blöcken, die über große Freiflächen verfügen, ist dieser Effekt deutlich.

Erstens zeigt sich über alle betrachteten Varianten hinweg, dass die ausgewiesenen LCoH-Werte den Fall abbilden, in dem das technische Potenzial der ISU5-Blöcke vollständig genutzt wird.

Dieser Befund ist für die Einordnung wesentlich, weil er erklärt, warum insbesondere in den äußeren, freiflächenreichen Blöcken relativ ungünstige Werte auftreten, während auf Projektebene – bei bedarfsgeführter Dimensionierung, Clustering von Teilflächen oder Netzlösungen – in der Regel niedrigere LCoH erreichbar sind. Die in den Karten dargestellten Muster sind deshalb als obere Abschätzung für die blockbezogene Vollauslastung zu lesen und nicht als Grenzwerte für standortscharfe Auslegungen. Die vorhandenen Abbildungen (Abbildung 47, Abbildung 48) machen diesen Zusammenhang visuell deutlich und zeigen zugleich, wo die räumlichen Spielräume am größten sind.

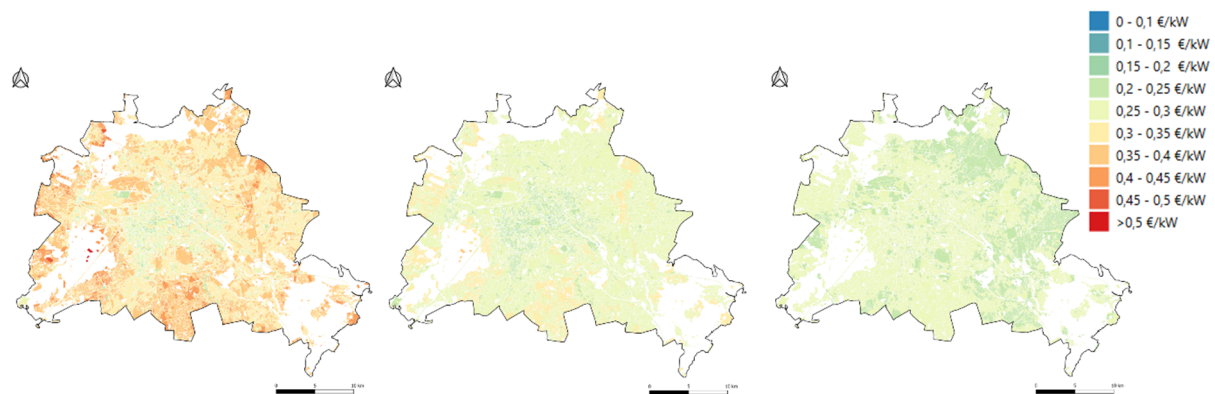


Abbildung 47: Wirtschaftliche Potenzial der ISU5-Blöcke (in Euro pro kWh Produktion) für eine Tiefe von 100 m für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (Mitte), ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

Die Betriebsweise wirkt systematisch auf die Kosten. Die ausgeglichene Betriebsweise (saisonale vollständige Regeneration) weist die niedrigsten LCoH auf. Die Variante mit 50 % Regeneration bildet die mittlere Kostenschicht und der reine Heizfall erreicht die höchsten Kosten. (Abbildung 47, Abbildung 48).

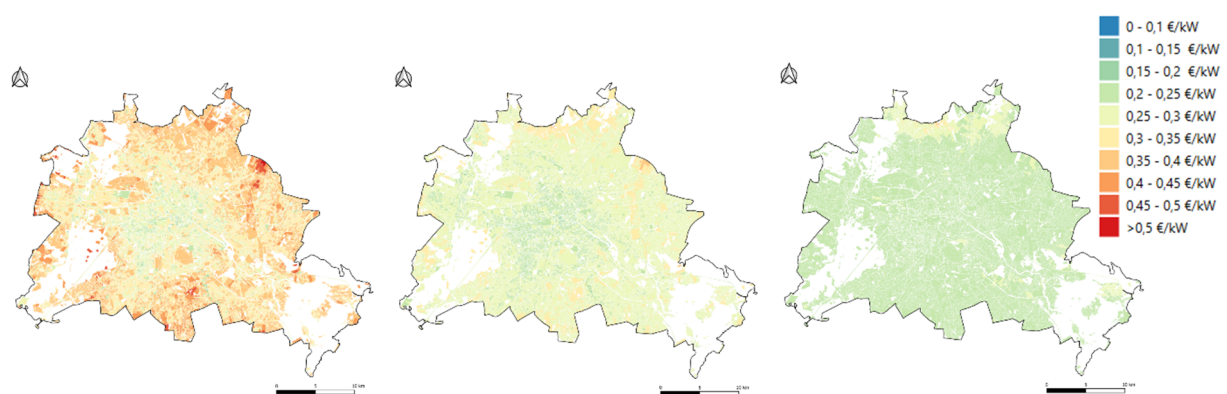


Abbildung 48: Wirtschaftliches Potenzial der ISU5-Blöcke (in Euro pro kWh Produktion) für die maximal mögliche Tiefe (Rupeltonoberkantentiefe oder max. 400 m) für unterschiedliche Regenerationsgrade: Heizfall (links), Regeneration 50 % (mittel), ausgeglichener Betrieb (rechts), Szenario mit nachbarschaftlicher Beeinflussung.

## Kernbotschaft

### Optimierungsstrategie:

#### Thermische Regeneration bei nicht optimalen Standortbedingungen

Fehlende Verfügbarkeit von technischem Erschließungspotenzial kann durch einen erhöhten Regenerationsgrad ausgeglichen werden. So kann ein höherer Regenerationsgrad (z. B. durch sommerliche Kühlung oder Einspeisung erneuerbarer Überschüsse) als Maßnahme bei unzureichend umsetzbaren Bohrm Metern infolge begrenzter Tiefe oder fehlender Flächen teilweise kompensieren. Umgekehrt kann die Erhöhung von Gesamtbohrm Metern den Bedarf an aktiver Regeneration reduzieren. Durch einen Eintrag von Wärme in den Untergrund agiert das System als ein thermischer Speicher.

#### Planerische Konsequenz

Die Erkenntnis, dass Gesamtlänge der Sonden und Regenerationsgrad sich gegenseitig ausgleichen können, eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade in der Planung:

**Standortabhängige Optimierung:** Bei begrenzter Tiefe oder eingeschränkter Fläche kann durch gezielte Regeneration (z. B. sommerliche Kühlung, Einspeisung von PV-Überschüssen) ein vergleichbarer Deckungsanteil erreicht werden wie bei größeren Sondenfeldern.

**Kosten-Nutzen-Abwägung:** Eine größere Gesamtlänge bedeutet höhere Investitionskosten, während Regeneration eher betriebliche Maßnahmen erfordert. Je nach Energiepreisen, Lastprofil und Investitionsrahmen kann die wirtschaftlich günstigere Variante gewählt werden.

**Flexibilität im Genehmigungsprozess:** In Gebieten mit restriktiven Tiefenlimits, geologischen Risiken oder hoher Dichte an Erdwärmeanlagen bietet thermische Regeneration eine Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit zu steigern und Konkurrenzen in der Erdwärmennutzung zu vermeiden.

Mit zunehmender Bohrtiefe steigen die Kosten für LCoH leicht an (Tabelle 7 und Abbildung 47, Abbildung 48). Dieser Effekt kommt durch die steigenden Investitionskosten, die sich stark auf LCoH auswirken und nicht vollständig durch zukünftige Wärmeentnahme ausgeglichen werden. Der größte Kostenanstieg tritt normalerweise beim Übergang von 100 m auf 150 m und 200 m auf. Bei den günstigsten Blöcken und mit steigendem Anteil der Regeneration macht sich der Anstieg der Investitionskosten weniger oder fast gar nicht bemerkbar.

Das liegt an der höheren Effizienz des Systems bzw. der höheren Entzugsleistung aufgrund günstigerer geologischer und vor allem örtlicher räumlicher Bedingungen. Bei dieser Bewertung ist zu berücksichtigen, dass das gesamte technische Potenzial des Blocks betrachtet wird.

Blöcke mit einem hohen Anteil an freier Fläche und dem Potenzial für die Platzierung einer großen Anzahl von geothermischen Sonden weisen Werte auf, die höher sind als bei einer Bewertung auf konkreter Projektebene.

Im Gegensatz zu den allgemeinen Erfahrungen zeigt sich, dass im Berliner Umfeld der Anstieg der Investitionskosten infolge tieferer Bohrungen nicht ausreichend durch den Zuwachs an Potenzial (Wärmeentnahme) kompensiert wird. Dies kann insbesondere durch eine ausgeprägte Temperaturinversion in den ersten 80-100 m verursacht sein.

Diese Temperaturinversion, die durch den langfristigen Effekt des sogenannten Urban Heat Island-Phänomens hervorgerufen wird, erhöht die Untergrundtemperatur um 2-3 K auf bis zu 12-15 °C und damit auch das daraus abgeleitete thermische Potenzial. In tieferen Bereichen, in denen die Temperaturen laut dem verwendeten TH-Modell auf 8-9 °C absinken, steigt das Potenzial nichtlinear an und kompensiert die erhöhten Kosten für größere Tiefen der Anlagen nicht vollständig.

*Tabelle 7: CoH-Statistik (€/kWh) nach Betriebsvariante und Tiefe – Technisches Potenzial. Min, Median, Mittelwert und Maximalwert des wirtschaftlichen Potenzials (LCoH) über alle ISU5-Blöcke für die Betriebsvarianten Heizfall, Regeneration 50 % und ausgeglichener Betrieb in den Tiefen 100 m, 150 m, 200 m, 300 m sowie RT (bis Oberkante Rupelton bzw. max. 400 m)*

Tiefe	Betriebsweise	Min	Mittelwert	Max
100 m	Heizfall	0,17	0,32	0,52
	50% Regeneration	0,18	0,27	0,39
	Ausgeglichene Betrieb	0,23	0,25	0,29
150 m	Heizfall	0,17	0,33	0,50
	50% Regeneration	0,18	0,27	0,37
	Ausgeglichene Betrieb	0,23	0,24	0,27
200 m	Heizfall	0,17	0,34	0,50
	50% Regeneration	0,18	0,27	0,36
	Ausgeglichene Betrieb	0,23	0,24	0,26
300 m	Heizfall	0,17	0,32	0,48
	50% Regeneration	0,18	0,26	0,35
	Ausgeglichene Betrieb	0,22	0,23	0,26
Rupeltonoberkante oder 400m	Heizfall	0,13	0,31	0,51
	50% Regeneration	0,14	0,26	0,43
	Ausgeglichene Betrieb	0,18	0,24	0,43

Die berechneten Wärmegestehungskosten (WGK) liegen im Mittel zwischen 23 und 34 ct/kWh über alle betrachteten Varianten.

Verglichen mit typischen WGK ausgewählter Alternativen – wie Gasthermen, Fernwärme oder Luft-Wärmepumpen – erscheint die Oberflächennahe Geothermie langfristig wettbewerbsfähig, insbesondere bei Nutzung ausgeglichener Betriebsweisen und Regenerationseffekte.

Diese Einschätzung berücksichtigt die aktuellen Strompreisannahmen und Investitionskosten. Bei zukünftigen Entwicklungen (z. B. sinkende Stromkosten durch erneuerbare Energien) kann sich die Wirtschaftlichkeit weiter verbessern.

### **Thermische Regeneration und Speicherung als**

### **Kernbotschaft**

#### **Nutzungsstrategien statt Zusatzoption**

In dicht bebauten urbanen Räumen ist thermische Regeneration – sei es durch sommerliche Kühlung oder die Nutzung von Abwärme – nicht ausschließlich als Komfortmaßnahme zu betrachten, sondern kann eine planerische Notwendigkeit werden.

Begrenzte Bohrtiefe oder fehlende Freiflächen lassen sich nicht allein durch zusätzliche Sondenmeter kompensieren. Hier übernimmt die Regeneration eine zentrale Rolle, um die Leistungsfähigkeit des Systems langfristig zu sichern. Während der Ansatz der zur Optimierung von Anlagen (siehe Kernbotschaft „Optimierungsstrategie“) die Austauschbeziehung zwischen Bohrmeter und Regenerationsgrad beschreibt, geht dieser Gedanke einen Schritt weiter:

In bestimmten Standortkonstellationen und insbesondere für große Erdwärmesysteme ist aktive Regeneration nicht nur eine Option, sondern kann Voraussetzung für die Umsetzbarkeit sein. Ihre Einbindung in die Systemarchitektur eröffnet zudem neue Synergien – etwa durch die Nutzung von PV-Überschüssen, Fernkälte oder industrieller Abwärme. Dies steigert die Effizienz und erhöht die Systemstabilität. Fördermechanismen könnten gezielt Anreize schaffen, um zusätzliche Komponenten (z. B. für Kühlung) wirtschaftlich abzusichern und das geothermische Potenzial in urbanen Räumen voll auszuschöpfen.

Gerade in diesen Gebieten besteht derzeit noch Unklarheit über die Umsetzbarkeit von Erdwärmeanlagen, weshalb diese Botschaft eine der zentralen Aussagen für die Planung ist.

## Beispiel

### Wirtschaftlichkeit - Beispielblock 4040

Block 4040 liegt im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets und weist eine überwiegend dichte Bebauung mit begrenzten Freiflächen auf.

Die Analyse des technischen Potenzials zeigt, dass der Deckungsanteil stark von der Betriebsweise abhängt:

	Heizfall	Regeneration 50%	Ausgeglichene Betrieb
100m	133%	206%	431%
150m	157%	254%	638%
200m	191%	313%	847%
300m	277%	462%	1277%



Damit wird deutlich, dass Regeneration nicht nur die Effizienz steigert, sondern auch die nutzbare Wärmemenge vervielfacht. Besonders der ausgeglichene Betrieb ermöglicht eine nahezu vollständige Deckung des Wärmebedarfs und eröffnet Spielräume für Quartierslösungen.

Die Wärmegestehungskosten liegen im Heizfall zwischen 0,22 €/kWh (100 m) und 0,28 €/kWh (300 m). Mit 50 % Regeneration sinken die Werte auf 0,17–0,20 €/kWh. Beim ausgeglichenen Betrieb liegen die Werte für die LCoH unabhängig von der Tiefe bei etwa 0,17 €/kWh.

	Heizfall	Regeneration 50%	Ausgeglichene Betrieb
100m	0,32 €/kWh	0,27 €/kWh	0,26 €/kWh
150m	0,33 €/kWh	0,27 €/kWh	0,24 €/kWh
200m	0,32 €/kWh	0,26 €/kWh	0,24 €/kWh
300m	0,30 €/kWh	0,25 €/kWh	0,23 €/kWh

#### Interpretation:

- Regeneration reduziert die Kosten um bis zu 25 %.
- Tieferes Bohren erhöht die Investitionskosten, die durch zusätzliche Wärmeentnahme nur teilweise kompensiert werden.
- Der größte Kostenvorteil entsteht durch die Betriebsstrategie, nicht durch die Tiefe.

**Fazit:** Für Block 4040 ist eine regenerative Betriebsweise der Schlüssel zur Wirtschaftlichkeit. In Kombination mit dem hohen Deckungsanteil macht dies die oberflächennahe Geothermie zu einer wettbewerbsfähigen Option gegenüber konventionellen Heizsystemen.

Bei der Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials spielt die Verfügbarkeit freier Flächen bzw. die standortspezifischen räumlichen Bedingungen der einzelnen Blöcke eine bedeutende Rolle.

Stadtblöcke im Zentrum Berlins, die aufgrund größerer effektiver Sondenabstände eine relativ höhere Entzugsleistung aufweisen, erscheinen als kostengünstigere Alternative. Diese Einschätzung gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Deckungsrate ausreichend ist und der Einsatz geothermischer Technologien technisch umsetzbar ist. In solchen Fällen stellt die Nutzung der oberflächennahen Geothermie zur Wärmeversorgung – möglichst unter Einbeziehung einer passiven oder aktiven Regeneration basierend auf dem Kühlbedarf der Gebäude – eine wirtschaftlich sinnvolle Option dar.

In den äußeren Stadtblöcken, die über große freie Flächen verfügen, bietet sich hingegen – über kleinere lokale Projekte hinaus, die vergleichbare Parameter wie die Projekte im Stadtzentrum aufweisen – der Einsatz von Nahwärmenetzen oder kalten Netzen mit hohem Anteil an aktiver (künstlicher) Regeneration an, basierend auf der Nutzung von Abwärme oder sommerlichen Energieüberschüssen. Der Betrieb großer Felder geothermischer Sonden im ausgeglichenen Betrieb erscheint somit nicht nur wirtschaftlich realisierbar, sondern kann auch zur Stabilisierung des Stromnetzes in den Winter- und Sommermonaten beitragen. Darüber hinaus kann eine netzdienliche Betriebsweise die elektrische Leistungsaufnahme glätten und so saisonale Lastspitzen reduzieren – ein zusätzlicher Systemnutzen, der bei der Planung berücksichtigt werden sollte.

### Ökonomisches Potenzial im Stadtzentrum

### Kernbotschaft

Stadtblöcke im Zentrum Berlins besitzen wenig verfügbare und kleinere Flächen für eine geothermische Erschließung als Blöcke in den Außenbereichen der Stadt. Daraus ergeben sich größere Abstände zwischen kleineren Erdwärmesondenfeldern, was deren gegenseitige Beeinflussung reduziert. Größere Abstände und eine geringere SONDENDICHTE können demnach positive Effekte auf die Leistungsfähigkeit der Felder und damit deren wirtschaftliches Potenzial haben. Diese Einschätzung gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass der Deckungsanteil ausreichend für eine Erschließung der Wärmequelle ist.

In solchen Fällen stellt die Nutzung der oberflächennahen Geothermie zur Wärmeversorgung – möglichst unter Einbeziehung einer passiven oder aktiven Regeneration basierend auf dem Kühlbedarf der Gebäude – eine wirtschaftlich sinnvolle Option dar.

Gerade in diesen Gebieten besteht derzeit noch Unklarheit über die Umsetzbarkeit von Erdwärmeanlagen, weshalb diese Botschaft eine der zentralen Aussagen für die Planung ist.

## 4.7 Grundwasserpotenzial

Die grobe Bewertung des geothermischen Potenzials von Grundwasser in Berlin basiert auf einer Kombination aus hydrogeologischen Parametern und wasserchemischen Risikofaktoren. Die Analyse erfolgte auf Ebene der ISU5-Blöcke und berücksichtigt sowohl die geometrischen Eigenschaften des Quartär-Grundwasserleiters als auch die chemische Beschaffenheit des Wassers.

Die Auswahl des Quartär-Grundwasserleiters erfolgte auf Basis der Kenntnisse über das hydrogeologische Umfeld Berlins, früheren Untersuchungen (sowohl Geländearbeiten als auch Modellierungen) sowie des stratigraphischen Modells. Die quartären Einheiten (Holozän, Saale) weisen im Modell durchschnittlich höhere Durchlässigkeiten auf als die tiefer liegenden Schichten. Das verwendete Modell bildet jedoch weder die lokale Variabilität der Einheiten noch deren vertikale Gliederung in stärker und schwächer durchlässige Bereiche ab. Es eignet sich daher nur für eine grobe Analyse und nicht für detaillierte hydrogeologische Bewertungen.

*Tabelle 8: Modellhafte Porositäten und Durchlässigkeiten der stratigraphischen Einheiten. Die quartären Einheiten (Holozän, Saale) weisen im Modell durchschnittlich höhere Durchlässigkeiten auf als die tiefer liegenden Schichten. [15]*

Einheit	Porosität	K <sub>xy</sub> [m/s]
1_Holocene	0,32	0,00142
2_Saalian	0,314	0,000404

### 4.7.1 Geometrische Parameter: Flurabstand und Grundwassermächtigkeit

Zwei zentrale Parameter wurden zur Charakterisierung des Potenzials herangezogen: der Flurabstand (Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel) und die Grundwassermächtigkeit (Differenz zwischen Oberkante des Holstein-Horizonts und dem Grundwasserspiegel).

Diese Parameter wurden aus einem konzeptionellen stratigraphischen Modell abgeleitet, das mittlere Werte für stratigraphische Einheiten verwendet. Lokale geologische Besonderheiten werden dabei nicht erfasst, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt (siehe Diskussion in Kapitel 3.9).

Die Auswertung zeigt, dass hohe Potenziale insbesondere in jenen ISU5-Blöcken auftreten, in denen der Flurabstand unter 20 m liegt und gleichzeitig eine hohe Grundwassermächtigkeit vorliegt. Diese Kombination deutet auf eine gute thermische Nutzbarkeit hin, da sowohl die Erreichbarkeit des Grundwassers als auch das verfügbare Volumen günstig sind. In den Karten (Abbildung 49 und Abbildung 50) sind diese Bereiche deutlich erkennbar. Sie konzentrieren sich vor allem auf die nördlichen und nordöstlichen Stadtgebiete sowie auf einzelne Zonen im Süden Berlins.

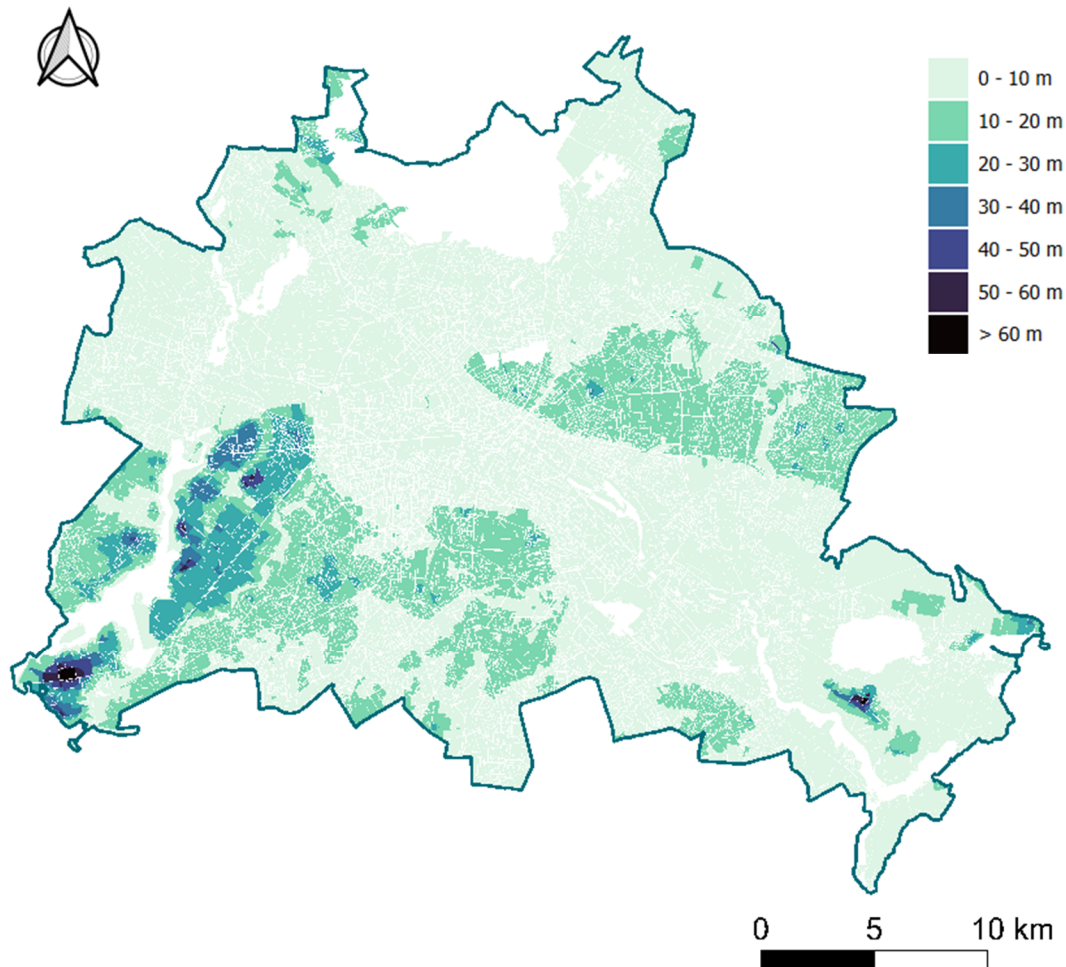


Abbildung 49: Flurabstand des Grundwassers in Berlin. Räumliche Verteilung des Flurabstands (Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel) im Quartär. Geringe Flurabstände (< 20 m) markieren Bereiche mit günstigen Voraussetzungen für die thermische Nutzung des Grundwassers.

Die Peclet-Zahl, dargestellt in Abbildung 32, liefert zusätzliche Hinweise auf die thermische Austauschdynamik im Untergrund. Sie beschreibt das Verhältnis von konvektivem zu diffusivem Wärmetransport und ist ein Maß für die Effizienz der thermischen Nutzung. Hohe Peclet-Zahlen deuten auf eine starke Konvektion hin, was insbesondere für offene Systeme mit Grundwasserentnahme relevant ist.

Ein Vergleich der Potenzialkarten mit der Peclet-Zahl zeigt, dass viele der als günstig eingestuften Blöcke auch hohe Peclet-Zahlen aufweisen. Dies bestätigt die Eignung dieser Bereiche für thermische Nutzung. In einigen Fällen jedoch – insbesondere in südlichen Stadtteilen – treten hohe Peclet-Zahlen in Kombination mit ungünstiger Wasserchemie auf, was die technische Umsetzbarkeit einschränken kann.

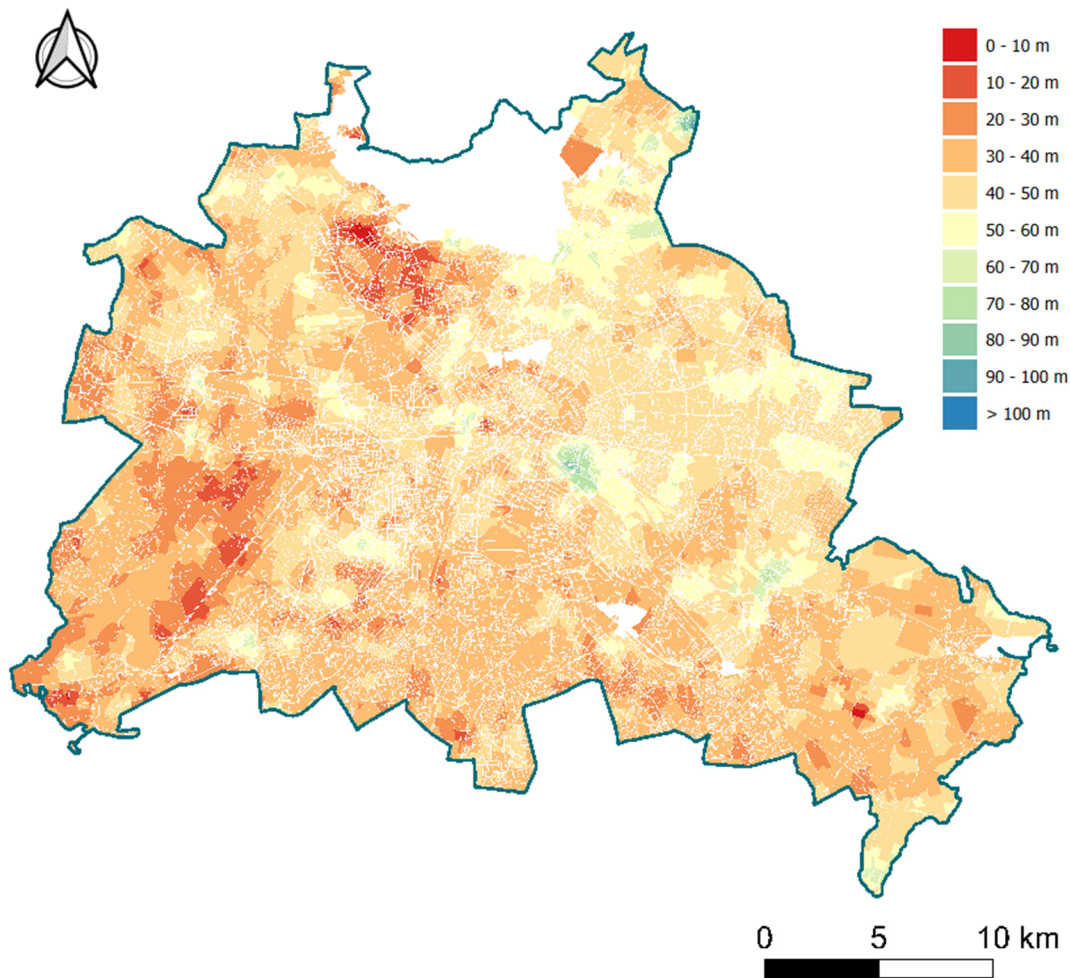


Abbildung 50: Grundwassermächtigkeit im Quartär. Darstellung der Grundwassermächtigkeit (Differenz zwischen Oberkante Holstein-Horizont und Grundwasserspiegel) in den ISU5-Blöcken. Hohe Mächtigkeiten deuten auf ein größeres nutzbares Volumen und damit auf ein höheres geothermisches Potenzial hin.

#### 4.7.2 Chemische Risiken: Eisen- und Manganausfällung

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Bewertung betrifft die Wasserchemie, insbesondere das Risiko der Ausfällung von Eisen und Mangan. Die Bewertung erfolgte nach der Methodik des Forschungsprojekts „GeoPLASMA-CE“, wobei kritische Schwellenwerte für pH, gelösten Sauerstoff,  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$  berücksichtigt wurden. Die Eingangsdaten stammen aus dem Berliner Geoportal (IDA-System) und umfassen die Maximalwerte der letzten zwei Jahre.

Die Ergebnisse zeigen, dass in mehreren ISU5-Blöcken die Bedingungen für eine Eisenausfällung erfüllt sind – insbesondere bei niedrigem pH-Wert ( $< 7,5$ ), geringem Sauerstoffgehalt ( $< 2 \text{ mg/l}$ ) und erhöhtem  $\text{Fe}^{2+}$ -Gehalt ( $> 0,2 \text{ mg/l}$ ). Das Risiko für Manganausfällung ist ebenfalls gegeben, vor allem in Bereichen mit stark reduziertem Sauerstoffgehalt und  $\text{Mn}^{2+}$ -Konzentrationen über  $0,1 \text{ mg/l}$ . Diese Risiken sind in Abbildung 51 dargestellt und überlagern teilweise die zuvor als potenzialreich eingestuft Gebiete. Dies zeigt, dass eine hohe geothermische Eignung nicht zwangsläufig mit günstigen chemischen Bedingungen einhergeht.

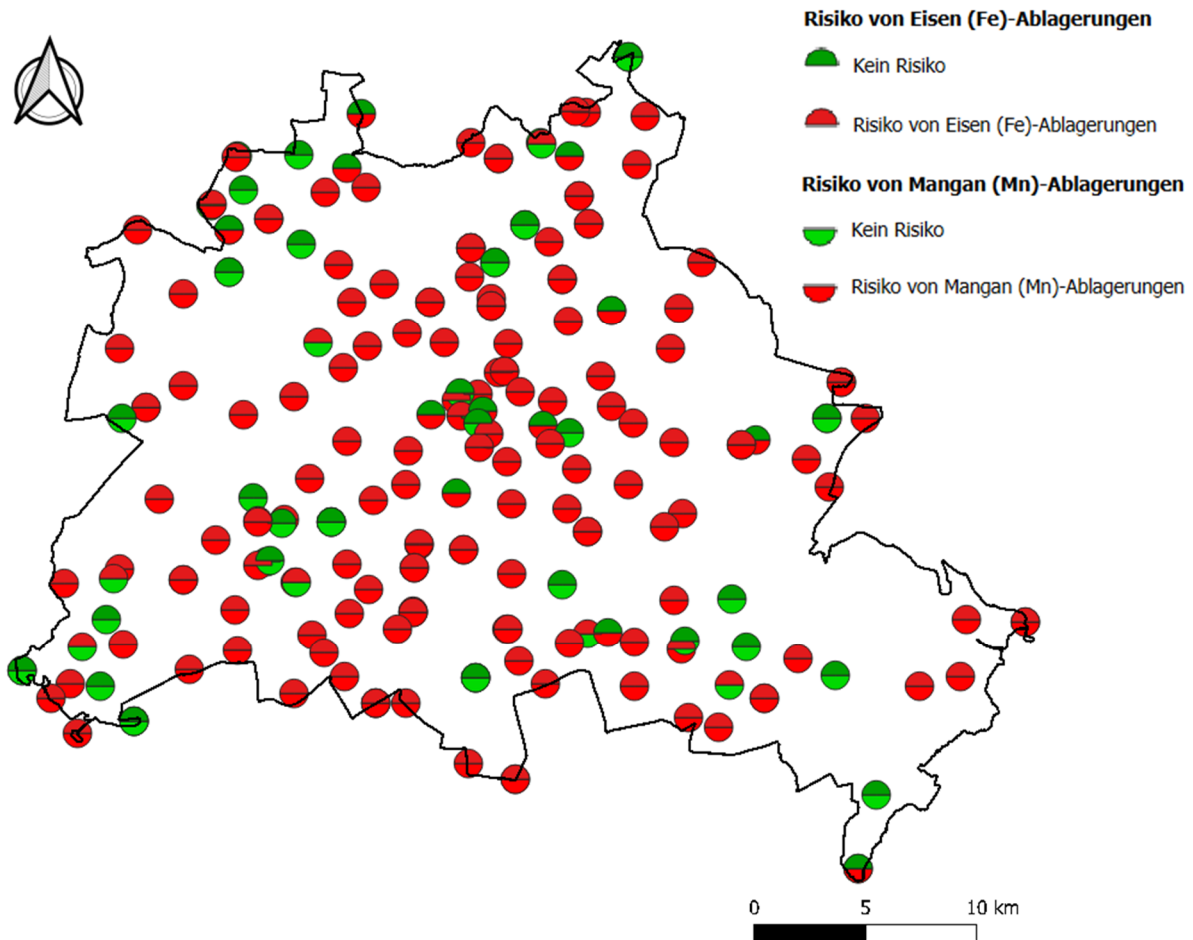


Abbildung 51: Risikobewertung – Wasserchemie. Blockweise Bewertung der Risiken für Eisen- und Manganausfällung sowie Korrosion auf Basis der aktuellen Messdaten (letzte 2 Jahre).

Typische Wertebereiche (Beispiele aus Messstellen):

- pH: meist neutral bis leicht alkalisch (6,8–7,4), selten Werte < 6,8 (Risiko für Fe-Ausfällung steigt bei pH < 7,5)
- Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ): häufig 0,1–1,5 mg/l, Hotspots bis > 10 mg/l (kritisch: > 0,2 mg/l)
- Mangan ( $\text{Mn}^{2+}$ ): meist 0,05–0,5 mg/l, lokal bis > 1 mg/l (kritisch: > 0,1 mg/l)
- Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ): oft < 2 mg/l, viele Messstellen an der Nachweisgrenze (kritisch: < 2 mg/l)
- Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ): meist 20–100 mg/l, lokal bis 200 mg/l (kritisch für Korrosion: > 100 mg/l)
- Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): meist 50–250 mg/l, lokal bis 400 mg/l (kritisch: > 250 mg/l)
- Leitfähigkeit: typischerweise 500–1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Hotspots bis > 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (kritisch: > 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

### 4.7.3 Ergebnis zur Abschätzung der thermischen Leistung

Die Ergebnisse der Potenzialabschätzung gemäß der Methodik aus Kapitel 3.2.7 sind in Abbildung 52 dargestellt. Die Karte zeigt die räumliche Verteilung des theoretischen thermischen Potenzials von Grundwasserleitern auf ISU5-Blockebene, unterteilt in drei Potenzialstufen:

- Niedriges Potenzial (begrenzte Förderrate, geringe thermische Leistung - weniger als 300 kW),
- Mittleres Potenzial (thermische Leistung zwischen 300 und 1000 kW, ausreichend für kleinere Nahwärmenetze oder Einzelanlagen,)
- Hohes Potenzial (thermische Leistung mehr als 1000 kW, geeignet für größere Systeme oder zentrale Versorgung).

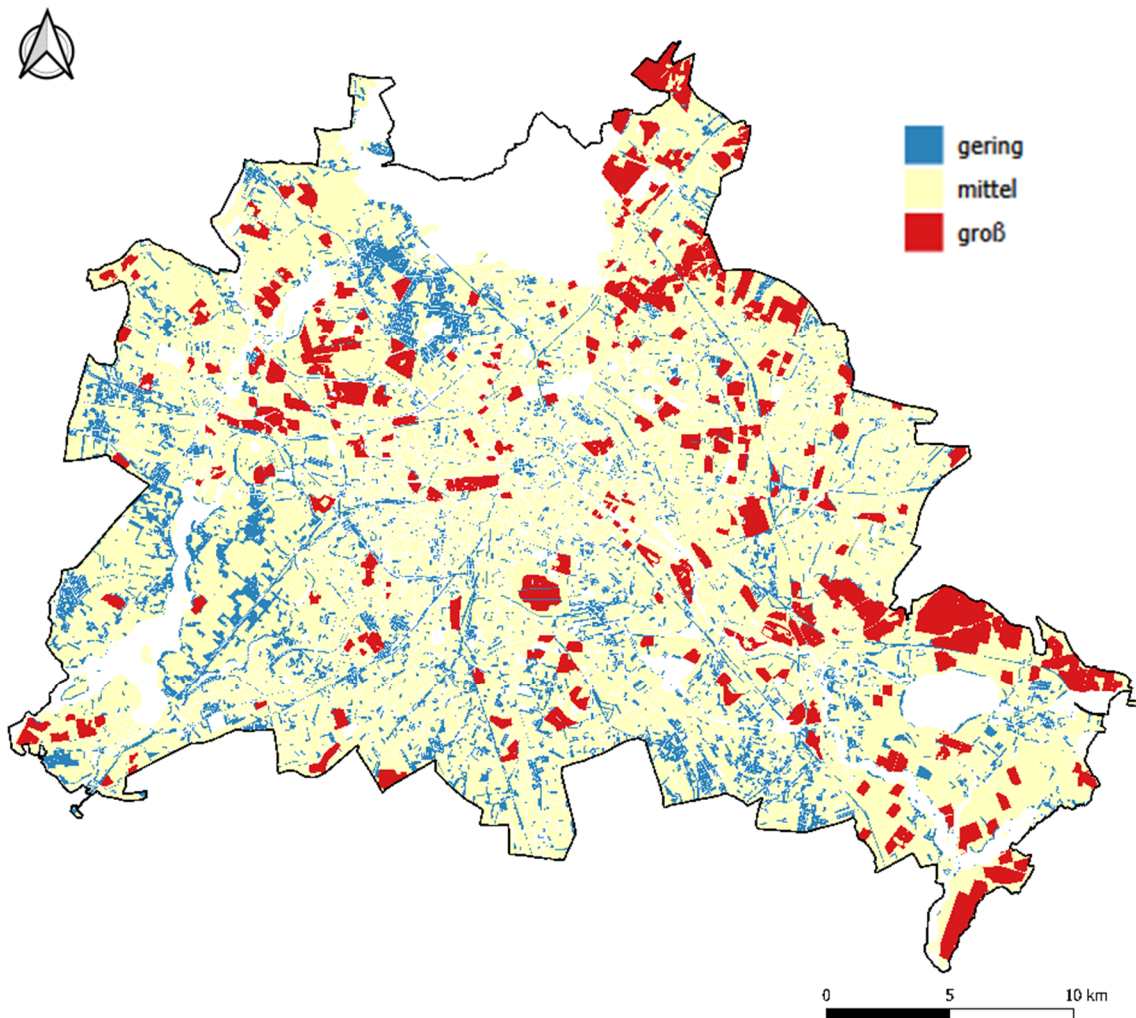


Abbildung 52: Räumliche Verteilung des geothermischen Potenzials von Grundwasser auf ISU5-Blockebene. Die thermische Leistung wurde auf Basis der maximalen Reichweite des Absenktrichters und der Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Rückführung berechnet.

Die Bewertung basiert ausschließlich auf den Möglichkeiten zur Wasserentnahme unter Verwendung mittlerer Modellwerte und vereinfachter geometrischer Annahmen. Die thermische Leistung wurde aus der maximalen Reichweite des Absenktrichters und der Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Rückführung berechnet. Es zeigen sich deutliche räumliche Muster: Höhere Potenziale konzentrieren sich in zentralen und nordöstlichen Bereichen, wo günstige hydrogeologische Bedingungen wie hohe Transmissivität und große wassergesättigte Mächtigkeit vorliegen. Niedrige Potenziale treten vor allem in kleineren Blöcken oder in Bereichen mit ungünstigen geologischen Parametern auf.

Ein wesentliches Ergebnis ist die erkennbare Abhängigkeit der Potenziale von der Fläche der jeweiligen ISU5-Blöcke. Größere Blöcke ermöglichen einen größeren Einflussbereich des Absenktrichters und damit höhere theoretische Förderraten. In kleinen Blöcken ist das Potenzial geometrisch begrenzt, selbst bei günstigen geologischen Eigenschaften. Die dargestellten Werte dienen ausschließlich einer groben Orientierung und ersetzen keine standortspezifische Planung. Die Wiedereinleitung des Wassers sowie bestehende Brunnenanlagen wurden nicht berücksichtigt.

Die berechneten Potenziale stellen einen Grenzzustand dar, bei dem das entnommene Grundwasservolumen den Wasserspiegel innerhalb des betrachteten ISU5-Blocks absenkt, ohne hydraulische Beeinflussung angrenzender Blöcke. Thermische Interaktionen zwischen benachbarten Blöcken oder langfristige Temperaturveränderungen im Untergrund wurden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind daher als konservative Abschätzung der maximal möglichen thermischen Leistung bei isolierter Wasserentnahme zu verstehen.

Die berechneten Potenziale stellen einen Grenzzustand dar, bei dem das entnommene Grundwasservolumen den Wasserspiegel innerhalb des betrachteten ISU5-Blocks absenkt, jedoch keine hydraulische Beeinflussung angrenzender Blöcke verursacht. Die Reichweite des Absenktrichters wurde so gewählt, dass sie vollständig innerhalb des jeweiligen Blocks liegt.

Eine Bewertung der Wiedereinleitung des Wassers (Versickerung) wurde im Rahmen dieser Methodik nicht vorgenommen. Ebenso wurden thermische Interaktionen zwischen benachbarten Blöcken oder langfristige Temperaturveränderungen im Untergrund nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind daher als konservative Abschätzung der maximal möglichen thermischen Leistung bei isolierter Wasserentnahme zu verstehen.

#### **4.7.4 Implikationen für die Planung**

Die Ergebnisse der Potenzialbewertung liefern eine erste Orientierung für die geothermische Nutzung des Grundwassers in Berlin. Besonders geeignet erscheinen jene ISU5-Blöcke mit folgenden Eigenschaften:

- Geringer Flurabstand
- Hohe Grundwassermächtigkeit
- Große Blockfläche
- Günstige Wasserchemie
- Hohe Peclet-Zahl

Die Kombination aus allen positiven Bedingungen ist jedoch nur in wenigen Bereichen vollständig gegeben. In vielen Fällen müssen kompensierende Maßnahmen (z. B. Sauerstoffausschluss, Materialwahl) getroffen werden, um chemische Risiken zu minimieren. Die Bewertung unterstreicht die Notwendigkeit lokaler hydrogeologischer Untersuchungen vor der Umsetzung konkreter Projekte.

## 5 Flächenkulisse des geothermischen Potenzials

Die Flächenkulisse beschreibt eine räumliche Auswahl geeigneter Bereiche, in denen die Nutzung oberflächennaher Geothermie besonders vielversprechend erscheint. Sie dient als Orientierungsrahmen für die strategische Wärmeplanung und für konkrete Projektentwicklungen. Anders als die rein rechnerischen Potenzialkarten stellt die Flächenkulisse eine interpretierte Ebene dar, die technische, städtebauliche und planerische Gesichtspunkte zusammenführt.

Die Flächenkulisse basiert auf folgenden Überlegungen:

- Potenzial vs. Bedarf: Vorrang haben Bereiche, in denen das geothermische Potenzial den Wärmebedarf übersteigt oder zumindest einen hohen Deckungsanteil erreicht
- Flächenverfügbarkeit: Geeignet sind Blöcke mit nutzbaren Freiflächen oder innovativen Optionen (z. B. Gehwege, unter Gebäuden)
- Städtebauliche Perspektive: Neubaugebiete und Areale mit geplanter Nachverdichtung sind besonders relevant, da hier die Integration von Erdwärmesonden unter Bodenplatten möglich ist
- Synergien mit Freiraumplanung: Bestehende Quartiere, die an Sportplätze, Grünflächen oder Spielplätze angrenzen, bieten Chancen für die Platzierung von Sondenfeldern – insbesondere bei anstehenden Sanierungen oder Revitalisierungen.
- Netzgedanke: In LOR-Gebieten, in denen einzelne Blöcke Defizite aufweisen, aber andere Überschüsse haben, eröffnet die Kopplung über kalte Nahwärmenetze eine effiziente Lösung.

Bei der Auswahl geeigneter Flächen kann perspektivisch auch die Auswirkung auf die elektrische Spitzenlast eine Rolle spielen. Oberflächennahe Geothermie mit Nutzung erdgebundener Wärmepumpen weist im Vergleich zur Nutzung von Luftwärmepumpen oder elektrischen Direktheizungen ein günstigeres Lastprofil auf. Dennoch erfordert die Bewertung der Netzbelastung eine detaillierte Analyse der zeitlichen Lastverschiebung und der regionalen Anschlusskapazitäten, die nur vom Stromnetzbetreiber durchgeführt werden kann. Diese Studie liefert dafür keine Berechnungen, sondern stellt die geothermischen Potenziale als Grundlage für eine spätere Abstimmung bereit.

Die Gewichtung der Kriterien ist subjektiv und hängt von den Zielen ab (z. B. schnelle Umsetzung, Kostenoptimierung, Netzstrategien). Die Studie liefert die Datenbasis, die Auswahl und Priorisierung erfolgt im Dialog mit den Akteuren.

## 5.1 Beispiele für geeignete geothermische Flächen

Die Flächenkulisse umfasst unterschiedliche Typen von Vorrangflächen, die sich durch ihre geothermische Eignung und städtebauliche Rahmenbedingungen auszeichnen. Nachfolgend werden typische Beispiele beschrieben:

### Blöcke mit Potenzialüberschuss (Eigenversorger und Energiegeber)

ISU5-Blöcke, deren geothermisches Potenzial den eigenen Wärmebedarf deutlich übersteigt, sind prädestiniert für eine Eigenversorgung und können zusätzlich als Energiegeber in einem kalten Nahwärmenetz fungieren.

Beispiel: Ein Block in einem Randgebiet mit großen Freiflächen (z. B. Grünflächen oder Parkplätze), der bei 100 m Tiefe bereits eine Deckung von über 120 % erreicht. Hier kann ein Sondenfeld installiert werden, das nicht nur den eigenen Bedarf deckt, sondern auch benachbarte Blöcke versorgen kann.

### Innenstadträume mit Neubau

In dicht bebauten Quartieren sind klassische Freiflächen knapp. Neubauprojekte bieten die Möglichkeit, Erdwärmesonden unter der Bodenplatte zu integrieren.

Beispiel: Ein geplanter Wohnkomplex im Zentrum, bei dem die Gründung ohnehin Tiefbauarbeiten erfordert. Durch die Integration von Erdwärmesonden in die Bauphase entstehen keine zusätzlichen Flächenkonflikte. Ergänzend können Gehwege oder öffentliche Räume für zusätzliche Bohrungen genutzt werden.

### Bestandsquartiere mit angrenzenden Freiräumen

Quartiere mit hoher Bebauungsdichte, die an Sportplätze, Spielplätze oder Grünzonen angrenzen, sind besonders geeignet. Diese Flächen können als Sondenfelder genutzt werden, insbesondere wenn eine Revitalisierung oder Sanierung ansteht.

Beispiel: Ein Schulcampus mit angrenzendem Sportplatz, der im Zuge einer Modernisierung für geothermische Bohrungen geöffnet wird. Die Wärme kann für die Schule und umliegende Wohngebäude bereitgestellt werden.

### LOR-Cluster für kalte Nahwärmenetze

Planungsräume, in denen sich Defizit- und Überschussblöcke räumlich ergänzen, sind ideale Kandidaten für kalte Netze.

Beispiel: PLR-Gebiet 10100316 (siehe Beispiel-Box im Kapitel 4.4). Das Gebiet erreicht insgesamt eine Deckung von über 100 %, enthält aber einzelne Blöcke mit Unterdeckung. Durch die Vernetzung dieser Blöcke mit Überschussblöcken kann eine effiziente Wärmeversorgung auf niedrigem Temperaturniveau realisiert werden.

## Innovative Sonderflächen

Neben klassischen Freiflächen können auch Straßenbegleitflächen, Gehwege oder öffentliche Plätze genutzt werden. Diese Option ist besonders relevant in Innenstadtlagen, wo die Integration in bestehende Infrastruktur Synergien schafft.

Beispiel: Nutzung von Gehwegen für Bohrungen im Rahmen einer Straßensanierung. Die Leitungen des kalten Netzes können parallel zur Straßeninfrastruktur verlegt werden.

## 5.2 Erstellung der geothermischen Flächenkulisse auf Basis der Ergebnisse

Die Flächenkulisse wird aus den bereits vorliegenden Ergebnissen der Potenzialstudie abgeleitet. Sie soll dem Auftraggeber ermöglichen, empfohlene Bereiche für die weitere Planung selbstständig zu identifizieren, basierend auf den berechneten Potenzialen und zusätzlichen Kriterien. Die folgenden fünf Ansätze zeigen, wie sich die Kulisse schrittweise zusammensetzen lässt:

### 5.2.1 Neubauf Flächen nach Abriss

Im ersten Schritt können Flächen berücksichtigt werden, bei denen eine vollständige Neubebauung nach Abriss vorgesehen ist. Hier spielt das theoretische Potenzial die zentrale Rolle, da bestehende bauliche Einschränkungen entfallen.

- **Datengrundlage:** Ergebnisse des theoretischen Potenzials (Kapitel 4.1), das die maximal mögliche Wärmeentnahme bei vollständiger Flächennutzung beschreibt.
- **Ausschlusskriterien:** Dauerhafte Restriktionen wie Wasserschutzgebiete, Denkmalschutz oder Flächen mit unterirdischer Infrastruktur, die nicht verlegt werden kann.
- **Begründung:** Bei Neubauten können Erdwärmesonden unter der Bodenplatte integriert werden, sodass die aktuelle Bebauung keine Einschränkung darstellt.
- **Typische Beispiele:** Entwicklungsareale im Zentrum, Nachverdichtungsflächen oder Quartiere mit geplanter Umstrukturierung.

Die hier dargestellte Kulisse basiert im Wesentlichen auf äußeren technischen und räumlichen Aspekten. Sie berücksichtigt die Tatsache, dass bei Abriss und anschließender Neubebauung – insbesondere in innerstädtischen Bereichen wie dem Berliner Zentrum – die Möglichkeit besteht, Erdwärmesonden direkt unter den Fundamenten der neuen Gebäude zu integrieren. Diese Option ist jedoch zeitlich begrenzt und an die Bauphase gekoppelt.

Damit handelt es sich nicht um eine dauerhaft verfügbare räumliche Kulisse, sondern vielmehr um eine Gelegenheitskulisse, die ein zeitlich begrenztes Fenster für die Nutzung eröffnet. Die Realisierung hängt davon ab, dass die Planung frühzeitig erfolgt und die Integration der Erdwärmesonden in die Bauabläufe eingeplant wird.

## 5.2.2 Bestandsflächen mit hohem Deckungsanteil

Im zweiten Schritt werden bestehende Blöcke betrachtet, deren technisches Potenzial den Wärmebedarf vollständig deckt. Diese Flächen sind prädestiniert für Eigenversorgung oder als Energiegeber in kalten Netzen.

- **Datengrundlage:** Technisches Potenzial (Kapitel 4.2), das die nutzbare Wärmeenergie unter realistischen Randbedingungen (Freiflächenanalyse, Ausschlussflächen) abbildet.
- **Kriterium:** Deckungsanteil > 100 % bei einer Tiefe von 100 m oder RT (Rupeltonoberkante/max. 400 m).
- **Ausschlusskriterien:** Flächen mit baulichen Hindernissen, die Bohrungen unmöglich machen (z. B. unterirdische Leitungen, Schutzbereiche).
- **Begründung:** Diese Blöcke sind technisch geeignet und bieten eine hohe Versorgungssicherheit.

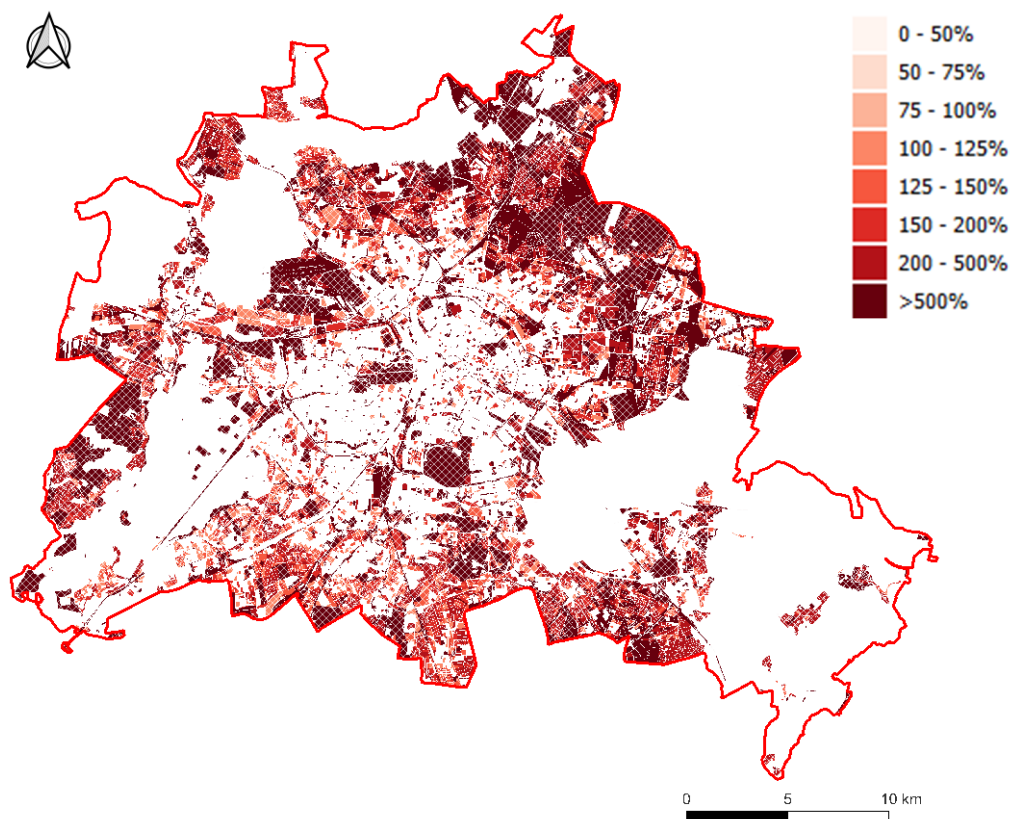


Abbildung 53: Ableitung einer Flächenkulisse aufgrund Bestandsflächen mit hoher Deckung. Die Karte zeigt Deckungsanteile auf ISU5-Blockebene für das Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Die Farbskala zeigt den Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie: dunklere Töne stehen für höhere Deckungsanteile. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche markieren Zonen mit potenziellen Konflikten, die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Karte dient der Identifikation von Vorrangflächen für Eigenversorgung oder Netzlösungen und illustriert, wie aus den bestehenden Ergebnissen eine Flächenkulisse abgeleitet werden kann.

Die Abbildung 53 zeigt die räumliche Verteilung der Deckungsanteile auf ISU5-Blockebene für die Betriebsvariante Regeneration 50 % (R50) bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Grundlage ist das technische Potenzial, das die real nutzbare Wärmeenergie unter Berücksichtigung von Ausschlussflächen (z. B. Gebäude, Bäume, Infrastruktur) abbildet.

Die Darstellung macht deutlich, welche Blöcke ihren Wärmebedarf vollständig oder überproportional decken können (Deckungsanteil  $\geq 100\%$ ). Diese Flächen sind prädestiniert für Eigenversorgung oder als Energiegeber in einem kalten Nahwärmenetz. Besonders interessant sind Blöcke mit hoher Deckung und gleichzeitig günstigen Rahmenbedingungen für Bohrungen (Freiflächen, geringe Nutzungskonflikte).

### 5.2.3 Bestandsflächen mit hohem Deckungsanteil und Wirtschaftlichkeit

Der dritte Ansatz kombiniert die technische Machbarkeit mit der ökonomischen Bewertung. Hier werden Blöcke priorisiert, die nicht nur einen Deckungsanteil  $> 100\%$  erreichen, sondern auch günstige Wärme gestehungskosten (LCoH) aufweisen.

- **Datengrundlage:** Technisches Potenzial (Kapitel 4.2) + Wirtschaftliches Potenzial (Kapitel 4.6).
- **Kriterium:** Deckungsanteil  $> 100\%$  und niedrige LCoH-Werte („Low Hanging Fruits“).
- **Ausschlusskriterien:** Flächen mit baulichen Hindernissen, die Bohrungen unmöglich machen (z. B. unterirdische Leitungen, Schutzbereiche).
- **Begründung:** Diese Kombination ermöglicht eine schnelle und wirtschaftlich attraktive Umsetzung, insbesondere in Quartieren mit hoher Nachfrage und guter Flächenverfügbarkeit.

Die Abbildung 54 illustriert, wie sich aus den bestehenden Ergebnissen eine Flächenkulisse für wirtschaftlich besonders attraktive Standorte ableiten lässt. Grundlage ist das Szenario Regeneration 50 % bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m, kombiniert mit der Bewertung der Wärme gestehungskosten (LCoH).

Dieses Beispiel zeigt die „Low Hanging Fruits“ – Blöcke, die nicht nur technisch geeignet sind (Deckungsanteil  $> 100\%$ ), sondern auch besonders günstige Wärme gestehungskosten aufweisen. Sie sind prädestiniert für eine schnelle Umsetzung im Bestand, da sie eine hohe Versorgungssicherheit mit wirtschaftlicher Vorteilhaftigkeit verbinden. Solche Flächen eignen sich sowohl für Einzelprojekte als auch für die Einbindung in Quartierslösungen, sofern die räumliche Nähe kurze Leitungswege ermöglicht.

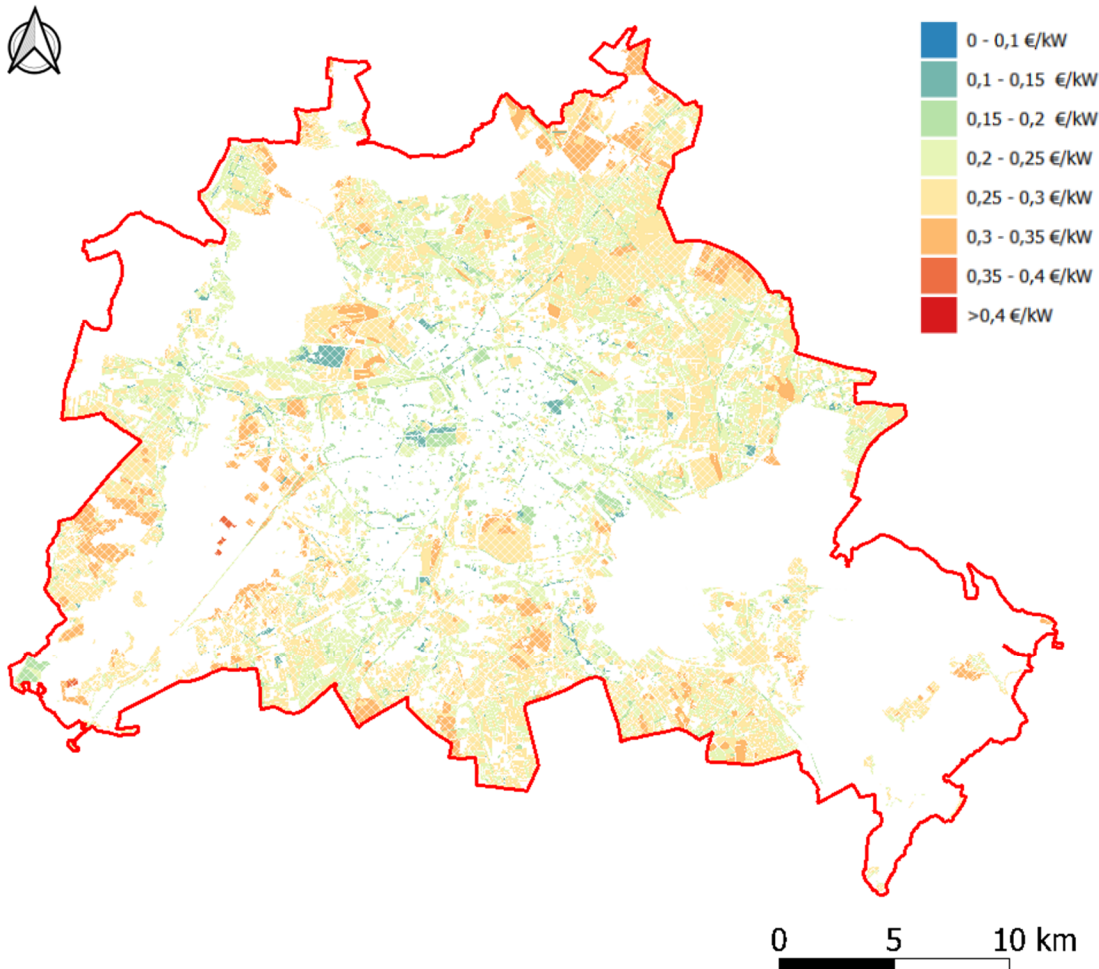


Abbildung 54: Ableitung einer Flächenkulisse für Bestandsflächen mit hoher Deckung und Wirtschaftlichkeit. Die Karte zeigt Deckungsanteile auf ISU5-Blockebene für das Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche kennzeichnen Zonen mit potenziellen Konflikten, die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Darstellung hebt „Low Hanging Fruits“ hervor – Blöcke, die nicht nur technisch geeignet sind, sondern auch wirtschaftlich attraktive Wärmegestehungskosten aufweisen. Sie dienen als priorisierte Kandidaten für eine schnelle Umsetzung im Bestand.

#### 5.2.4 Netzlösungen auf LOR-Ebene

Im vierten Beispiel wird der Netzgedanke berücksichtigt. Hier geht es um Planungsräume (PLR/BZR/PGR), in denen die Gesamtdeckung  $\geq 100\%$  beträgt, auch wenn einzelne Blöcke Defizite aufweisen.

- **Datengrundlage:** Aggregierte Ergebnisse auf LOR-Ebene (Kapitel 4.4).
- **Kriterium:** LOR-Deckungsanteil  $\geq 100\%$ , unabhängig von der Blockeinzelbewertung.
- **Ausschlusskriterien:** Restriktionsflächen für Bohrungen innerhalb der Netzstruktur.
- **Begründung:** Kalte Nahwärmenetze ermöglichen den Ausgleich zwischen Überschuss- und Defizitblöcken und schaffen Synergien für Quartierslösungen.

Die Abbildung 55 zeigt ein Beispiel für die Ableitung einer Flächenkulisse auf Ebene eines Planungsraums (PLR) unter Berücksichtigung des Szenarios Regeneration 50 % (R50) und einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Grundlage ist die Aggregation des technischen Potenzials auf LOR-Ebene, wobei die Deckungsanteile für den gesamten Planungsraum berechnet wurden.

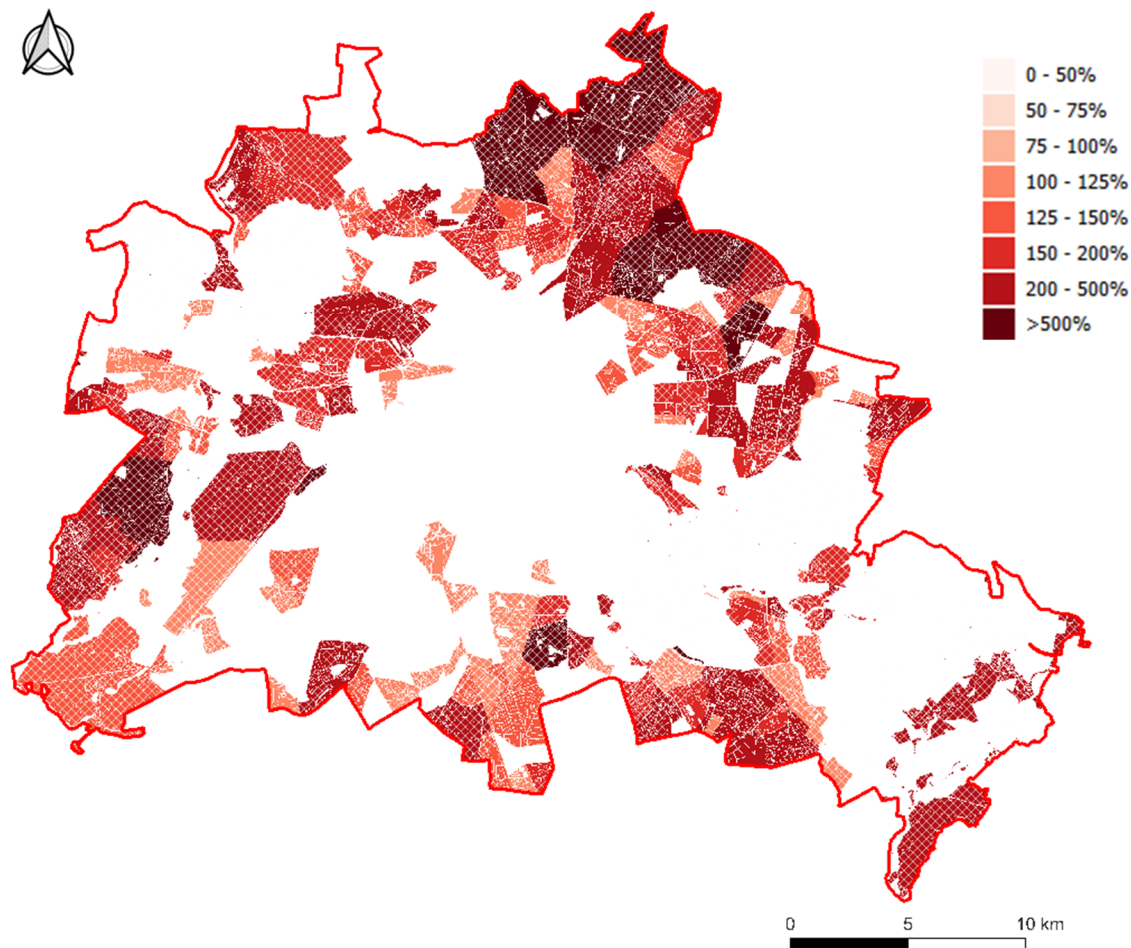


Abbildung 55: Flächenkulisse für kalte Nahwärmenetze auf LOR-Ebene (PLR) im Szenario „Regeneration 50 %“ bei einer Erdwärmesondentiefe von 100 m. Die Farbskala zeigt den Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch oberflächennahe Geothermie: dunklere Töne stehen für höhere Überdeckung. Ausschlussgebiete sind ausgeblendet. Schraffierte Bereiche markieren Zonen mit potenziellen Konflikten (rechtliche oder nutzungsbedingte Einschränkungen), die eine vertiefte Prüfung erfordern, aber grundsätzlich realisierbar sind. Die Darstellung dient der Identifikation von Vorrangflächen für die Bildung kalter Nahwärmenetze, bei denen Überschuss- und Defizitblöcke innerhalb eines Planungsraums gekoppelt werden können.

Das Beispiel verdeutlicht, dass trotz einzelner Blöcke mit geringer Deckung die Gesamtbilanz des PLR-Gebiets positiv ausfällt (Deckungsanteil  $\geq 100\%$ ). Dies eröffnet die Möglichkeit, kalte Nahwärmenetze einzusetzen, um Überschüsse aus potenzialstarken Blöcken für die Versorgung benachbarter Defizitblöcke zu nutzen. Die Netzlösung ist besonders attraktiv, wenn die räumliche Nähe kurze Leitungswege erlaubt und die Konfliktflächen im Zuge von Sanierungen oder Infrastrukturmaßnahmen integriert werden können.

### 5.3 Von der Flächenkulisse zum Projekt: Nutzung und Weiterverarbeitung

Die im Rahmen der Potenzialstudie erstellte Flächenkulisse stellt eine zentrale Grundlage für die strategische und operative Planung von Wärmeversorgungssystemen dar. Sie enthält räumlich verortete Informationen zu geologischer Eignung, verfügbarer Fläche, Wärmebedarfsdichte sowie die Entfernung zu bestehenden Netzinfrastrukturen. Diese Daten ermöglichen eine erste Einschätzung, wo der Einsatz von Erdwärmesondensystemen technisch und wirtschaftlich möglich ist.

Auf Basis dieser Informationen können Kommunen Vorranggebiete für den Einsatz von Geothermie identifizieren und in ihre Wärmeplanungsprozesse integrieren. Die Kulisse unterstützt:

- Szenarienbildung für Dekarbonisierung und Netzoptimierung
- Priorisierung von Maßnahmen in Gebieten mit hoher Wärmebedarfsdichte und günstigen geologischen Bedingungen
- Politische Entscheidungsfindung und Ableitung von Förderstrategien

Die Flächenkulisse bildet die Grundlage für die strategische Wärmeplanung und zeigt, wo Erdwärmesondenanlagen grundsätzlich geeignet sind. Für die konkrete Umsetzung eines Projekts sind jedoch zusätzliche Schritte erforderlich, um von der übergeordneten Planungsebene in die operative Realisierung zu gelangen.

Zunächst müssen die identifizierten Vorrangflächen einer detaillierten Standortanalyse unterzogen werden. Dazu gehören geologische Untersuchungen zur Überprüfung der im Potenzialmodell angenommenen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserfließrichtung sowie die Prüfung lokaler Genehmigungsvoraussetzungen, beispielsweise in Wasserschutzgebieten oder bei Abständen zu bestehenden Leitungen. Ebenso ist die tatsächliche Verfügbarkeit der Flächen sicherzustellen im Hinblick auf Eigentumsverhältnisse, Bebauungspläne und mögliche Nutzungskonflikte.

Darauf aufbauend erfolgt die technische Auslegung des Systems. Hierbei werden Anzahl, Tiefe und Anordnung der Erdwärmesonden festgelegt, basierend auf realen Lastprofilen und den spezifischen Standortbedingungen. Parallel dazu wird die hydraulische und thermische Integration in das Gebäudesystem oder ein lokales Wärmenetz geplant. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Entwicklung eines Regenerationskonzepts, das den Einsatz von Kühlbetrieb, saisonalen Speichern oder die Kopplung mit PV-Stromüberschüssen berücksichtigt.

Neben der technischen Planung ist eine umfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Projektebene erforderlich. Diese umfasst die Berechnung der Wärmegestehungskosten (LCoH) unter Berücksichtigung von Investitions- und Betriebskosten sowie möglichen Förderungen.

Verschiedene Betriebsstrategien wie Heizfall, Regeneration oder sogar ausgeglichener Betrieb sollten in Szenarien verglichen werden, um die wirtschaftlich vorteilhafteste Lösung zu identifizieren. Ergänzend ist eine Risikoabschätzung notwendig, um die Auswirkungen von Unsicherheiten wie Strompreisänderungen oder variablen Bohrkosten zu bewerten.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist das Stakeholder-Management. Die Abstimmung mit Netzbetreibern und Behörden sichert die Anschlussmöglichkeiten und beschleunigt Genehmigungsprozesse. Grundstückseigentümer müssen frühzeitig eingebunden werden, um Zugangsrechte und Vertragsfragen zu klären. Ebenso ist die Kommunikation mit Förderstellen wichtig, um die Förderfähigkeit sicherzustellen und Zuschüsse zu beantragen.

Schließlich sollte ein Konzept für die Datenpflege und das Monitoring entwickelt werden. Die Flächenkulisse ist regelmäßig zu aktualisieren, sobald neue Erkenntnisse aus Standortanalysen oder Projekterfahrungen vorliegen. Während des Betriebs ist ein Monitoring-System zur Überwachung von Temperaturen, Lasten und Effizienzkennzahlen einzurichten. Die gewonnenen Daten sollten in die kommunale Wärmeplanung zurückgeführt werden, um zukünftige Strategien weiter zu optimieren.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Potenzialstudie verfolgt das Ziel, die Nutzungsmöglichkeiten der oberflächennahen Geothermie im Stadtgebiet Berlin systematisch zu erfassen, zu bewerten und für die kommunale Wärmeplanung nutzbar zu machen. Im Fokus steht die Anwendung vertikaler Erdwärmesonden bis zu einer Tiefe von maximal 400 Metern bzw. bis zur Rupelton-Oberkante, ergänzt durch innovative Erschließungskonzepte und die konzeptionelle Einbindung in kalte Nahwärmenetze. Die Ergebnisse wurden auf Blockebene (ISU5) ermittelt und in einem digitalen GIS-Datenpaket sowie einem ausführlichen Bericht dokumentiert.

Berlin als Untersuchungsraum zeichnet sich durch eine komplexe geologische Struktur, eine hohe urbane Verdichtung und vielfältige Nutzungskonkurrenzen aus. Die geologischen und hydrogeologischen Grundlagen wurden mithilfe eines 3D-stratigraphischen Modells, thermohydrodynamischer Simulationen und umfangreicher Bohrdaten analysiert. Die Rupelton-Oberkante bildet die geologische Grenze für die Betrachtung, da darunter salzhaltige Formationen auftreten, die von den Bohrungen unberührt bleiben müssen, um sie nicht mit den darüber liegenden Süßwasserschichten zu verbinden.

Technologisch basiert die Studie auf der Nutzung von Erdwärmesonden, die in geschlossenen Systemen Wärme aus dem Untergrund entziehen und über Wärmepumpen gebäudeseitig nutzbar machen. Ergänzend wurden offene Systeme (Grundwasserbrunnen), kalte Nahwärmenetze und innovative Bohrtechniken wie schräge oder radiale Bohrungen berücksichtigt. Die Platzierung der Sonden erfolgt unter Berücksichtigung von Ausschlussflächen (Gebäude, Bäume, Infrastruktur) und thermischen Mindestabständen.

Die Potenzialermittlung gliedert sich in drei Ebenen: das theoretische Potenzial beschreibt die maximal mögliche Wärmeentnahme bei vollständiger Flächennutzung, das technische Potenzial berücksichtigt möglichst reale Einschränkungen und das wirtschaftliche Potenzial bewertet die Machbarkeit anhand der Wärmegeheimungskosten (LCoH). Die Berechnungen basieren auf einem eigens entwickelten geothermischen Modell, das Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Temperaturverteilung in verschiedenen Tiefenstufen abbildet und auf dem Modell des Geologischen Dienstes bis 100 m Tiefe beruht. Die Simulation der Wärmeentnahme erfolgt mit dem Python-basierten Tool GHEtool unter Verwendung standardisierter Lastprofile.

Die Ergebnisse zeigen, dass das theoretische Potenzial in Berlin groß ist, insbesondere bei tieferen Bohrungen und ausgeglichener Betriebsweise mit saisonaler Regeneration. Das technische Potenzial ist durch die Verfügbarkeit geeigneter Freiflächen begrenzt, wobei innovative Ansätze wie die Nutzung öffentlicher Gehwege oder schräger Bohrungen das nutzbare Potenzial deutlich erhöhen können. Der Deckungsanteil – also der Anteil des Wärmebedarfs, der durch Geothermie gedeckt werden kann – steigt mit der Tiefe und mit aktiver Regeneration. In Kombination mit Fernwärme ergibt sich ein differenziertes Bild, das für die strategische Wärmeplanung genutzt werden kann.

Die Aggregation der Potenziale auf LOR-Gebietsebene zeigt, dass insbesondere in den äußeren Stadtteilen eine vollständige Deckung des Wärmebedarfs durch Geothermie möglich ist. Auch im Zentrum gibt es Blöcke mit hohem Potenzial für die Einbindung in kalte Nahwärmenetze. Die elektrische Anschlussleistung der Wärmepumpen korreliert mit dem geothermischen Potenzial. Die Analyse zeigt, dass bei ausgeglichenem Betrieb die Stromspitzen im Sommer auftreten, während im Heizfall die Winterlasten dominieren. Diese Ergebnisse sind relevant für die Netzplanung und Trafodimensionierung.

Die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials erfolgt über die Kennzahl LCoH (Levelized Cost of Heat). Die vorteilhaftesten Werte werden bei ausgeglichenem Betrieb und in großen Blöcken mit hoher Sondendichte erreicht. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass CAPEX und OPEX unterschiedliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben. Skaleneffekte und Regeneration sind entscheidende Hebel zur Kostenreduktion. Besonders wirtschaftlich erscheinen Konfigurationen mit saisonaler Regeneration, tieferen Bohrungen und optimierter Blockgröße.

Die Analyse des Grundwasserpotenzials zeigt, dass in vielen ISU5-Blöcken günstige Bedingungen für offene geothermische Systeme bestehen. Die Bewertung berücksichtigt Flurabstand, Grundwassermächtigkeit, Wasserchemie und thermische Leistung. Die Ergebnisse dienen als erste Orientierung und erfordern standortspezifische Untersuchungen. Besonders geeignet erscheinen jene Blöcke mit geringer Tiefe zum Grundwasser, hoher GW-Mächtigkeit, günstiger Wasserchemie und hoher Péclet-Zahl.

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die Oberflächennahe Geothermie, darunter vor allem die Erdwärmesondensysteme, ein relevantes und wirtschaftlich nutzbares Potenzial für die Wärmeversorgung Berlins bietet. Besonders hervorzuheben sind: die hohe räumliche Differenzierung der Potenziale, die Eignung für kalte Nahwärmenetze, die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit bei ausgeglichenem Betrieb und die Notwendigkeit einer strategischen Integration in die kommunale Wärmeplanung.

Freiberg, den 20.04.2026



---

Petr Novak

M. Sc. Geophysik, Eur.Geol.

Projektingenieur



---

Maren Theresa Stefanak

M. Sc. Geowissenschaften

Projektleiterin



---

Tom Reinhardt

M. Sc. Geowissenschaften

Teamleiter

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesverband Geothermie, „Oberflächennahe Geothermie,“ [Online]. Available: <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermischetechnologien/oberflaechennahe-geothermie>. [Zugriff am 9 10 2025].
- [2] Umwelt Bundesamt, „Geothermie,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/geothermie#oberflachennahe-geothermie>. [Zugriff am 9 10 2025].
- [3] S. Kummer, F. Bleckmann, M. Schulze, M. Mai, N. Landmeyer, D. Wenzel und L. Carla , „Oberflächennahe Geothermie,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2013. [Online]. Available: [https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_107\\_oberflaechennahe\\_geothermie.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_107_oberflaechennahe_geothermie.pdf).
- [4] Wikipedia-Autoren, „Geographie Berlins,“ 9 10 2025. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Geographie\\_Berlins&oldid=258406030](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Geographie_Berlins&oldid=258406030).
- [5] Land Berlin, „Stadtstruktur / Stadtstruktur - Flächentypen differenziert,“ 9 10 2025. [Online]. Available: <https://www.berlin.de/umweltatlas/nutzung/stadtstruktur/>.
- [6] U. Hörmann, A. Limberg und W. Schröter, „01.17 Geologische Skizze (Ausgabe 2013),“ 9 10 2025. [Online]. Available: [https://www.berlin.de/umweltatlas/\\_assets/boden/geologische-skizze/de-texte/k117.pdf](https://www.berlin.de/umweltatlas/_assets/boden/geologische-skizze/de-texte/k117.pdf).
- [7] Statistisches Bundesamt, „Flächengröße des Waldes nach Bundesländern,“ 9 10 2025. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Tabellen/waldflaeche-bundeslaender.html>.
- [8] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, *Geologische Skizze (Umweltatlas), 2025*.
- [9] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, „Geologie,“ Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, [Online]. Available: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/geologie/>. [Zugriff am 9 10 2025].
- [10] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, „Hydrogeologische Gliederung von Berlin,“ Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, [Online]. Available: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/grundwasser/hydrogeologische-gliederung-von-berlin/>. [Zugriff am 9 10 2025].
- [11] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, „Geothermisches Potenzial (Umweltatlas), Daten zu geothermischen Potenzialen von Berlin bis 40 m , 60 m , 80 m und 100 m Tiefe in Abhängigkeit der geologischen Schichtfolge am Standort.,“ 2018. [Online]. Available:

[https://gdi.berlin.de/services/wfs/ua\\_geothermisches\\_potenzial?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs](https://gdi.berlin.de/services/wfs/ua_geothermisches_potenzial?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs).

- [12] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, „Grundwassertemperatur - Durchschnittstemperatur 2020 (Umweltatlas), WFS Dienst,“ 2020. [Online]. Available: [https://gdi.berlin.de/services/wfs/ua\\_grundwassertemperatur\\_durchs\\_2020?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs](https://gdi.berlin.de/services/wfs/ua_grundwassertemperatur_durchs_2020?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs).
- [13] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, „Geologische Schnitte (Umweltatlas),“ 2025. [Online]. Available: [https://gdi.berlin.de/services/wfs/geol\\_schnitte?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs](https://gdi.berlin.de/services/wfs/geol_schnitte?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=wfs).
- [14] M. Frick, J. Bott, M. Scheck-Wenderoth, M. Cacace, H. Nasrin und S. M., „3D geological model of Berlin - Germany. GFZ Data Services,“ 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5880/GFZ.4.5.2020.005>.
- [15] M. Frick, „Towards a more sustainable utilization of the urban geological subsurface: Insights from 3D thermohydraulic models,“ 2019. [Online]. Available: [https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/23868?utm\\_source=chatgpt.com](https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/23868?utm_source=chatgpt.com).
- [16] Bundesverband Wärmepumpe e.V., „Wie funktioniert die Wärmepumpe?,“ Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP), [Online]. Available: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>. [Zugriff am 9 10 2025].
- [17] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2016.
- [18] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen, „Stadtstruktur (Umweltatlas) - ab 2021,“ Berlin.
- [19] Bauer, D. et al., „Erdwärmekörbe und Spiralsonden – Potenziale und Grenzen,“ *Geothermie-Journal*, Bd. 5, Nr. 2, p. 45-52, 2016.
- [20] Bracke, R. et al., „GeoStar 2.0 – Innovative Sondenkonzepte für urbane Räume. Fraunhofer IEG,“ *Urban Energy Reports*, Bd. 3, Nr. 1, p. 12-18, 2022.
- [21] B. Ahmed und C. Teodoriu, „Innovative Radial Drilling Techniques for Geothermal Applications,“ *Journal of Geothermal Engineering*, 2023.
- [22] S. Homrighausen, „Schrägbohrtechnik in der Praxis,“ *Geothermie Praxisberichte*, Bd. 2, Nr. 1, p. 18-24, 2018.
- [23] Emmermann, R., et al., „Schrägbohrungen in der Geothermie – Technik und Anwendung,“ *Geotechnik aktuell*, Bd. 11, Nr. 1, pp. 22-29, 2022.

- [24] Figueira, R., et al., „Thermoroad: A Danish Case Study on Urban Geothermal In-tegration,“ *WaterCycle Denmark*, 2024.
- [25] L. Clausen und S. Beucker, „Thermoroad - Integration geothermischer Systeme in die Straßeninfrastruktur,“ *Urban Energy Reports*, Bd. 3, Nr. 1, pp. 12-18, 2019.
- [26] UC Viden, „Thermoroad-Prototyp in Horsens - Erste Ergebnisse,“ University College Denmark, 2024.
- [27] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, „Geologische Schnitte (Umweltatlas), WFS Dienst,“ Berlin, 2025.
- [28] B. u. W. B. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, „Geologische Bohrdaten,“ Berlin, 2023.
- [29] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, „Gebäude im INSPIRE-Datenmodell,“ Berlin.
- [30] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, „Schutzgebiete im INSPIRE-Datenmodell (Schutzgebiete nach Naturschutzrecht),“ Berlin.
- [31] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, „Wasserschutzgebiete,“ Berlin.
- [32] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, *AX\_Bahnstrecke\_I*.
- [33] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, „Baumbestand Berlin,“ Berlin.
- [34] LIAG-Institut für Angewandte Geophysik, Georg-August-Universität Göttingen, BGR, geoENERGIE Konzept GmbH, Geologischer Dienst Saarland, Niedersachsen, Sachsen, Hamburg, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt, Hochschule Biberach, „Das Forschungsprojekt "WärmeGut",“ Berlin.
- [35] GBA, BVG, geoENERGIE Konzept GmbH, CGS, SGIDS, GeoZS, PGI-NRI, AGH UST, GiGa, COL more than 20 Associated Partners from 8 EU countries, „GeoPLASMA-CEOberflächennahe Geothermie in Zentraleuropa,“ 2019.
- [36] A. Henning, „<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/geologie/geothermie/>,“ Berlin, 2013.
- [37] R. Kahnt, S. Ertel, H. Fiedmann und A. Behnke, „Potenzialstudie zur Nutzung der geothermischen Ressourcen des Landes Berlin,“ HGC, G.E.O.S., Berlin, 2011.
- [38] A. Kick, GIS-based generic analysis of urban shallow geothermal energy potential in Berlin, T. U. B. - F. V. (. f. G. u. G. Master Thesis, Hrsg., Berlin, 2025.
- [39] T. Kröger, „Web-Based Geothermal Energy Potentialm Mapping and Analysis for Berlin, Estimating the shallow geothermal energy potential of Berlin,“ Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Berlin, 2024.
- [40] bosch & partner, Fraunhofer IEE, „Windenergienutzung in Berlin - Prüfkulisse für den Flächenbeitragswert,“ Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Berlin, Kasse, 2023.

- [41] L. Stubert, „Berliner Gehwegbreiten,“ 2020.
- [42] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), „Update Gradtagzahlen-Tool, Datenaktualisierung bis Dezember 2022,“ 26.6.2025. [Online]. Available: <https://www.iwu.de/fileadmin/tools/gradtagzahlen/Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx>.
- [43] W. Peere und T. Blanke, „GHEtool: An open-source tool for borefield sizing in Python,“ *Journal of Open Source Software* 7(76), 4406., 2022.
- [44] T. Blomberg, J. Claesson, P. Eskilson, G. Hellström und B. Sanner, „EED – Earth Energy Designer 4.20,“ 2019.
- [45] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen, „Energienetze - Netzgebiet Fernwärme einschl. 250 m Puffer,“ [Online]. Available: [https://gdi.berlin.de/services/wfs/ea\\_energienetze](https://gdi.berlin.de/services/wfs/ea_energienetze). [Zugriff am 15.10.25].
- [46] M. Huysmans und A. Dassargues, „Review of the use of Péclet numbers to determine the relative importance of advection and diffusion in low permeability environments, Technical Note,“ *Hydrogeology Journal, Official Journal of the International Association of Hydrogeologists*, 2004.
- [47] V. K. u. U. Senatsverwaltung für Mobilität, „Hauptgrundwasserleiter 2020“.
- [48] I. GÖRZ, M. HEIERMANN, G. GÖTZL, C. STEINER, B. CIAPAŁA, K. HOFMANN und & THE GEOPLASMA-CE TEAM, „Evaluated Guidelines on Harmonized Workflows and Methods For Urban and Nonurban Areas,“ 2019.
- [49] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, „Wasserportal Berlin,“ [Online]. Available: <https://wasserportal.berlin.de/>. [Zugriff am 9.9.2025].
- [50] W. Kyrieleis und W. Sichardt, *Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten*, Berlin/Heidelberg: Springer, 1930.
- [51] J. Dupuit, *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, Paris: Dunod, 1863.
- [52] C. V. Theis, „The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage,“ *Transactions, American Geophysical Union*, Bd. 16, Nr. 2, p. 519–524, 1935.
- [53] Bundesverband Geothermie, *Technologieübersicht oberflächennahe Geothermie*, Berlin: Bundesverband Geothermie, 2023.
- [54] Drück, H., et al., *Langzeitverhalten von Erdwärmesonden*, Stuttgart: Institut für Thermodynamik, Universität Stuttgart, 2016.
- [55] Fraunhofer IEG, *Spiralsonden und Erdwärmekörbe – Technologiestand und Anwendungen*, Bochum: Fraunhofer IEG, 2023.
- [56] BFE – Bundesamt für Energie, „Thermische Regeneration von Erdwärmesonden,“ BFE, 2017.

## 8 Anlagen

### Anlage 1: Potenzialbewertung zu kalten Nahwärmenetzen

Datenbank: Kaltenetzeanalyse.gpkg

Die Datenbank enthält sechs räumliche Tabellen, die jeweils die ISU5-Blöcke mit bevorzugtem Einsatzpotenzial für kalte Wärmenetze in einem bestimmten Regenerationsszenario und einer bestimmten Tiefenstufe darstellen.

Tabellen

- Vorzugsblocke\_H\_100m
- Vorzugsblocke\_R50\_100m
- Vorzugsblocke\_AB\_100m
- Vorzugsblocke\_H\_RT
- Vorzugsblocke\_R50\_RT
- Vorzugsblocke\_AB\_RT

Struktur und Inhalt der Tabellen:

Jede Tabelle enthält folgende Spalten:

- FID und Schlüssel: eindeutige Kennung des ISU5-Blocks (nicht identisch mit ISU5-FID),
- Wärmebedarf Gesamt FW-Korrektur [MWh]: korrigierter Wärmebedarf des jeweiligen ISU5-Blocks,
- TechP\_\*\_#\_N\_G: technisches Potenzial des Blocks im jeweiligen Regenerationsszenario (\*) und Tiefenniveau (#), unter Berücksichtigung nachbarschaftlicher Einflüsse,
- TechP\_\*\_#\_N\_G\_DA: Deckungsanteil des Blocks bezogen auf seinen Wärmebedarf,
- PLR\_ID: Kennung der übergeordneten PLR-Gebietseinheit, in der sich der Block befindet,
- Wärmebedarf Gesamt FW-Korrektur [MWh] sum: aufsummierter Wärmebedarf der gesamten PLR-Gebietseinheit,
- TechP\_\*\_N\_G sum: aufsummiertes technisches Potenzial der PLR-Gebietseinheit im jeweiligen Szenario und Tiefenniveau.

Hinweise zur Interpretation:

- Die ISU5-Blöcke in den Tabellen weisen selbst eine Deckung von unter 100 % auf, befinden sich jedoch vollständig innerhalb einer PLR-Gebietseinheit, deren Gesamtdeckungsgrad 100 % oder mehr beträgt.
- Die Regenerationsszenarien sind:
  - H = Heizfall (keine Regeneration),
  - R50 = 50 % Regeneration,
  - AB = ausgeglichener Betrieb (100 % Regeneration).
- Die Tiefenniveaus sind:
  - 100 m = konstante Tiefe von 100 m,
  - RT = bis zur Oberkante des Rupeltons, maximal jedoch 400 m.

## Anlage 2: Stromanalyse

Datenbank: Stromanalyse.gpkg

Tabellen

PLR

BGR

PGR

Die enthaltenen Tabellen beinhalten folgende Spalten:

- fid (nicht identisch mit dem fid der ISU5-Blöcke),
- [LOR]\_ID, wobei [LOR] für PLR, BGR oder PGR steht,
- sowie die aufsummierten elektrischen Anschlussleistungen für alle drei Regenerationsszenarien und für die Tiefen 100 m und RT innerhalb des jeweiligen Gebietes.

## Anlage 3: Potenzial offene Systeme

Die Datenbank „Potenzial\_offene\_Systeme.gpkg“ enthält eine räumliche Tabelle mit dem Namen „thermische\_leistung“, die den rohen thermischen Leistungswert offener geothermischer Systeme in einzelnen ISU5-Blöcken beschreibt.

Tabellenstruktur und Inhalt:

Jeder Eintrag in der Tabelle repräsentiert einen ISU5-Block und enthält folgende Spalten:

- FID und Schlüssel: eindeutige Kennung des ISU5-Blocks,
- GW\_Saule\_Q [m]: mittlere Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht im Quartär innerhalb des Blocks,
- Flurabstand [m]: mittlere Tiefe des Grundwasserspiegels unter Geländeoberkante,
- $q$  [m<sup>2</sup>/s]: mögliche Förderrate des Grundwassers, ohne hydraulische Beeinflussung angrenzender Blöcke,
- P [kW]: berechnete thermische Leistung des offenen Systems im jeweiligen Block,
- R\_Absenkung [m]: seitliche Ausdehnung des Absenkungstrichters bei der angegebenen Förderrate.

Hinweise zur Interpretation:

Die Daten ermöglichen eine räumlich differenzierte Bewertung des Einsatzpotenzials offener geothermischer Systeme auf Blockebene. Die thermische Leistung P basiert auf konservativen hydraulischen Annahmen, die eine Beeinflussung benachbarter ISU5-Blöcke ausschließen.