



Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt

Integration der thermischen Grundwassernutzung in das Modell München

Kopplung des geothermischen Speicherpotenzials mit dem zentralen Steuerungsinstrument der Wärmewende in München zur effizienten Nutzung der regenerativen Energiequelle Grundwasser für die dezentrale Wärme- und Kältebereitstellung

Herausgeber:

Lehrstuhl für Hydrogeologie

██████████

80333 München

Tel.: +49 89 289 25840

Web: <https://www.cee.ed.tum.de/hydro>

Autoren:

████████████████████
████████████████

Abgabe:

31.12.2022

beauftragt durch:



Landeshauptstadt
München
**Referat für Klima- und
Umweltschutz**

Inhaltsverzeichnis

I	EINLEITUNG	6
I.1	VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG	6
I.2	VORAUSSETZUNGEN UND MODELLUMGEBUNGEN	6
I.2.1	<i>Geo.KW: Ein Simulationsframework und Datenmodell zur Optimierung der thermischen Grundwassernutzung</i>	6
I.2.2	<i>Modell München: Das zentrale Steuerungsinstrument der Wärmewende</i>	8
I.3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	8
I.3.1	<i>Projektzeitraum</i>	8
I.3.2	<i>Meilensteine und Arbeitsschritte</i>	9
I.3.3	<i>Projekt-Veranstaltungen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen</i>	11
I.4	EINGANGSDATEN ZUR POTENZIALEVALUATION UND MODELLKOPPLUNG	13
I.4.1	<i>Hydrogeologische Basisdaten des Münchener Untergrunds</i>	13
I.4.2	<i>Unterirdische Infrastruktur und Düker</i>	15
I.4.3	<i>Unterirdische städtische Wärmeinsel</i>	16
II	METHODIK	19
II.1	POTENZIALDEFINITIONEN	19
II.1.1	<i>Definition des technisch umsetzbaren Potenzials</i>	20
II.1.2	<i>Definition des räumlichen Potenzials</i>	23
II.2	METHODIK ZUR BESTIMMUNG DES TECHNISCH UMSETZBAREN POTENZIALS	24
II.2.1	<i>Weißflächenkartierung für Brunnenstandorte</i>	27
II.2.2	<i>Bestimmung des flurstückscharfen Potenzials</i>	30
II.2.3	<i>Bestimmung des baublockscharfen Potenzials</i>	31
II.3	METHODIK DES ABGLEICHS VON POTENZIAL UND WÄRMEBEDARF	32
II.4	METHODIK ZUR RÄUMLICHEN OPTIMIERUNG IN DER MODELLKOPPLUNG	34
II.4.1	<i>Analytische Temperaturfeldberechnung</i>	34
II.4.2	<i>Optimierung des räumlichen Ausbaus</i>	36
II.4.3	<i>Evaluation des räumlichen Potenzials durch die Optimierung des Stadtgebiets</i>	38
II.4.4	<i>Konzept der Modellkopplung und Schnittstelle zum automatisierten Datenaustausch</i>	40
III	ERGEBNISSE	43
III.1	EVALUATION DER EXISTIERENDEN THERMISCHEN GRUNDWASSERNUTZUNGEN	43
III.2	EVALUATION DES TECHNISCH UMSETZBAREN POTENZIALS	44
III.2.1	<i>Ergebnisse der Weißflächenkartierung</i>	45
III.2.2	<i>Ergebnisse der flurstückscharfen Potenzialanalyse</i>	48
III.2.3	<i>Ergebnisse der baublockscharfen Potenzialanalyse</i>	50
III.2.4	<i>Ergebnisse des Potenzialabgleichs mit dem bestehenden Wärmebedarf</i>	52
III.3	ERGEBNISSE DER RÄUMLICHEN OPTIMIERUNG	57
IV	INWERTSETZUNG FÜR DIE KOMMUNALE WÄRMEPLANUNG	60
IV.1	DEFINITION VON EIGNUNGSGEBIETEN	61
IV.2	SYNTHESE UND AUSBLICK	63
ANHANG		65
A.1	DATENBESCHREIBUNG	65
A.2	LITERATURVERZEICHNIS	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: a) Höhenlage der Quartärbasis aus dem GEPO-Projekt und b) Grundwassergleichenplan aus der Stichtagsmessung August 2014.	14
Abbildung 2: Stadtweite Datensätze der a) quartären Grundwassermächtigkeit, b) Grundwassertemperatur 1 m unter Grundwasserstand, c) Darcy Geschwindigkeit und d) des Flurabstands während der Stichtagsmessung im April 2014.	15
Abbildung 3: Datenbank der unterirdischen Infrastruktur-Objekte mit angeschlossenen Dükern.	16
Abbildung 4: a) Modellierter Sommer-Lufttemperatur 2 m über Grund um 4 Uhr morgens nach (Funk, Groß, & Trute, 2014) und b) Oberflächenversiegelung des DLR.	17
Abbildung 5: Typische saisonale Schwankung der Grundwassertemperatur mit zunehmender Tiefe pro Monat über ein Jahr berechnet nach (Böttcher & Zosseder, 2021).	18
Abbildung 6: Thermische Exposition des quartären Grundwasserleiters gegenüber einer potenziellen anthropogenen Temperaturerhöhung mit einer Übersignatur, die den dominanten Faktor für die Ausbildung des jeweiligen Temperaturregimes beschreibt und die Isolinien der Grundwassertemperatur interpoliert aus der Stichtagsmessung des GEPO-Projekts durchgeführt im April 2014, verändert nach (Böttcher & Zosseder, 2021).	19
Abbildung 7: Schnittmengen und Definition der Potenzialbegriffe aus dem Ergebnisbericht des Energiegipfels (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft Landesentwicklung und Energie, 2019).	20
Abbildung 8: Der typische Aufbau einer Grundwasserwärmepumpe mit einem Förder- und einem Schluckbrunnen mit den jeweils relevanten Prozessen, die das technische Potenzial begrenzen.	22
Abbildung 9: Vor- und Nachteile bei der Interpretation der verschiedenen Potenzialevaluationen.	23
Abbildung 10: a) Aufbau des numerischen Box-Modells mit allen Randbedingungen. b) Seitenansicht des Grundwasserstands im Grenzzustand vor dem hydraulischen Kurzschluss. c) Güte der Regressionsschätzung gegenüber den simulierten Werten am Beispiel des Volumenstroms im Förderbrunnen.	25
Abbildung 11: KI-basierte Baumerkennung mit Kronendurchmesser zur Berücksichtigung der Baumschutzverordnung des InnovationLab.	29
Abbildung 12: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Flurstücken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden und zur Flurstücksgrenze.	31
Abbildung 13: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Baublöcken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden.	32
Abbildung 14: Entwicklung des Verhältnisses der variablen Brunnenbaukosten, in Abhängigkeit der Endteufe des Brunnenpaares zu den Kosten der Wärmepumpe in Abhängigkeit der installierten Heizleistung mit dem definierten wirtschaftlichen Limit von 2 (schwarze Konturlinie = Brunnenbau doppelt so teuer, wie die Wärmepumpe).	34
Abbildung 15: Erweiterung des LAHM Modells durch eine kombinierte räumliche und zeitliche Superposition, bei der sich die Temperaturanomalien von zwei Schluckbrunnen über 3 Zeitschritte hinweg im Grundwasserleiter in x-Richtung ausbreiten (nach Halilovic et al. 2023).	35
Abbildung 16: Mögliche Brunnenpositionen in der räumlichen Optimierung mit rechtlich vorgegebenen Abstandsflächen.	36
Abbildung 17: Beispielhaftes Temperaturfeld der Kälteanomalien in einer Nachbarschaft, dass eine optimale Brunnenpositionierung unter Ausschluss einer negativen thermischen Beeinflussung darstellt.	38
Abbildung 18: Schema des gesamtstädtischen Optimierungsansatzes mit a) der Aufteilung des Optimierungsraums (blau) in Aussageraum (grün) und Randbereich (gelb), b) der Halbierung der Aussagefläche (grün) in vier Quadranten (rot) mittels Quadtree Unterteilung zur Verkleinerung des Optimierungsproblems und c) der Überschneidung der Optimierungsräume (blau) zur zusammenhängenden Berechnung des Aussageraums (grün) über die gesamte Stadtfläche.	39
Abbildung 19: Quadtree Unterteilung des Aussageraums zur stadtweiten Berechnung des Optimierungsproblems bei einer Berechnungszeit von 100 Sekunden.	40

Abbildung 20: Kopplungsschema zum iterativen Datenaustausch zwischen der Multi-Agenten-Simulation (Modell München) und der Optimierung des räumlichen Potenzials für die thermische Grundwassernutzung (Geo.KW).	41
Abbildung 21: Natur- und Wasserschutz spezifische Ausschlussflächen, die in der Weißflächenkartierung berücksichtigt wurden.	45
Abbildung 22: Bau spezifische Ausschlussflächen, die in der Weißflächenkartierung berücksichtigt wurden.	46
Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung der Freiflächen mit Flurstück- und Gebäudeabstandflächen, die für den Brunnenbau zur Verfügung stehen.	48
Abbildung 25: Ergebnis der flurstückscharfen Potenzialanalyse, bei der die technisch umsetzbare thermische Entzugsleistung auf dem jeweiligen Flurstück berechnet wurde.	49
Abbildung 26: Histogramm der maximalen Brunnenabstände auf Flurstücken mit statistischen Kennwerten und einer Angabe der Häufigkeiten von zu keinen Flurstücken (unter 10 m Brunnenabstand), keiner Erkundung von quartärem Grundwasser und einer vollständigen Lage im Trinkwasserschutzgebiet.	50
Abbildung 27: Ergebnis der baublockscharfen Potenzialanalyse, bei der die technisch umsetzbare thermische Entzugsleistung auf dem jeweiligen Baublock berechnet wurde.	51
Abbildung 28: Histogramm der maximalen Brunnenabstände auf Baublöcken mit statistischen Kennwerten und einer Angabe der Häufigkeiten von zu keinen Baublöcken (unter 10 m Brunnenabstand), keiner Erkundung von quartärem Grundwasser und einer vollständigen Lage im Trinkwasserschutzgebiet.	52
Abbildung 29: Stadtweite Verteilung des Verhältnisses der Investitionskosten von Brunnenbau zu Wärmepumpe für dezentrale Grundwasserwärmepumpen bei den unterschiedlichen Sanierungsszenarien mit der definierten Wirtschaftlichkeitsgrenze von 2 (rote gestrichelte Linie).	53
Abbildung 30: Verteilung des Kostenverhältnisses im Stadtteil Solln für das Instandhaltungsszenario, in dem sich Einfamilienhäusern mit relativ hohen Flurabständen räumlich überschneiden und daher das Wirtschaftlichkeitskriterium von 2 überschreiten.	54
Abbildung 31: Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch einen flurstückscharfen Potenzialabgleich, bei dem die nötige Heizleistung für Raumwärme und Trinkwarmwasser des Instandhaltungsszenarios der einzelnen Gebäude auf einem Flurstück mit dem vorhandenen technischen Potenzial abgeglichen wurde.	55
Abbildung 32: Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch einen baublockscharfen Potenzialabgleich, bei dem die nötige Heizleistung für Raumwärme und Trinkwarmwasser des Instandhaltungsszenarios der einzelnen Gebäude auf einem Baublock mit dem vorhandenen technischen Potenzial abgeglichen wurde.	56
Abbildung 33: Balkendiagramm zum stadtweiten Anteil des technisch versorgbaren Wärmebedarfs je Wärmeversorgungslösung und Sanierungsszenario ohne Optimierung des räumlichen Ausbaus (keine Nachbarschaftsbetrachtung).	57
Abbildung 34: Beispielhaftes optimiertes Ausbauszenario mit Temperaturfeldern der 1K-Kältefahnen in einer Nachbarschaft, welches sowohl eine optimale Brunnenpositionierung als auch die Berücksichtigung der bestehenden thermischen Heiz-Nutzungen darstellt.	58
Abbildung 35: Stadtweites Ergebnis für die Umsetzbarkeit von Grundwasserwärmepumpen im Instandhaltungsszenario und der Annahme eines optimierten Ausbaus. Für die technisch versorgbaren Flurstücke ist der mögliche Anteil der installierbaren Leistung räumlich interpoliert dargestellt.	59
Abbildung 36: Balkendiagramm zur Gegenüberstellung des technisch und räumlich versorgbaren Wärmebedarfs für Grundwasserwärmepumpen je Sanierungsszenario (Optimierung des räumlichen Ausbaus).	60
Abbildung 37: Entwurf zur Definition von Eignungsgebieten für Grundwasserwärmepumpen und Grundwasser-Nahwärmenetzen in Baublöcken bei denen der Deckungsgrad bei mindestens 80% des aktuellen Wärmebedarfs liegt.	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine und Arbeitspakete im Projekt.	9
Tabelle 2: Chronologische geordnete Projekttreffen und Veranstaltungen zur Vorstellung der Projektinhalte.	11
Tabelle 3: Projekte der TUM, in denen die detaillierten Grundlagendaten für die Grundwassersimulation in der Stadt München entwickelt wurden.	13
Tabelle 4: Parametergrenzen und Anzahl der Fälle, die in den Szenarien für München variiert wurden.	24
Tabelle 5: Beschreibung und Bewertung der untersuchten Kriterien zur Weißflächenkartierung.	28
Tabelle 6: Annahmen der Datensatzbereinigung mit den für Brunnen und Anlagen genutzten Datenpunkten.	44
Tabelle 7: Räumliche Kennwerte und Auswirkung der untersuchten Kriterien in der Weißflächenkartierung.	47

I Einleitung

I.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Vollversammlung des Stadtrats der Landeshauptstadt München (LHM) hat am 19. Januar 2022 im Rahmen des „Grundsatzbeschluss II Klimaneutrales München“ das Referat für Klima- und Umweltschutz beauftragt, eine verbindliche räumlich ausdifferenzierte Wärmestrategie zu entwickeln. Die LHM und die Stadtwerke München GmbH (SWM) haben in diesem Zusammenhang bereits eine Vereinbarung geschlossen, die der LHM das Recht seitens der SWM einräumt, Daten der SWM für die kommunale Wärmeplanung mittels des sog. „Modell München“ einzusehen und zu nutzen. Im Bereich der dezentralen Wärme- und Kälteversorgung mittels thermischer Grundwassernutzung waren die bisherigen im Modell München enthaltenen Daten- und Analysegrundlagen für eine räumlich ausdifferenzierte Wärmestrategie und Wärmeplanung noch nicht ausreichend.

Gegenstand dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes ist daher die Bestands-, Potenzial- und Szenarioanalyse in räumlich hochaufgelöster Form sowie die Ableitung entsprechender Eignungsgebiete für die Wärmeversorgung mit Grundwasserwärmepumpen. Ziel dieses Vorhabens ist es insbesondere, eine zweckmäßige Kopplung zwischen dem Grundwassermodell des Lehrstuhls für Hydrogeologie der TUM und dem Modell München der SWM und damit auch dem Wärmeplanungstool der LHM zu entwickeln und zu etablieren. Im Projekt Geo.KW hat der Lehrstuhl bereits ein stadtweites Grundwassermodell aufgebaut und zur Erkundung der optimierten (kostenminimierten oder emissionsminimierten) Wärmeversorgung mit einem Energiesystemmodell gekoppelt. Anhand der in Geo.KW entwickelten Methoden, soll nun das Grundwassermodell mit dem Modell München gekoppelt werden. Zum einen werden dadurch die datenseitigen Stärken des Modell München im Gebäudesektor in die Grundwassermodellierung integriert, wodurch die Aktualität der Eingangsdaten gewährleistet ist, und zum anderen wird die Potenzialevaluation und der optimierte Einsatz der thermischen Grundwassernutzung ins Modell München eingegliedert. Durch die Unterstützung der kommunalen Wärmeplanung sollen die entwickelten Instrumente und Schnittstellen somit konkret die Wärmewende und damit den Klimaschutz in München, aber auch in Deutschland voranbringen.

I.2 Voraussetzungen und Modellumgebungen

In den folgenden Abschnitten werden die bestehenden Modellumgebungen beschrieben, die die Grundlage der angestrebten Kopplung bilden. Zum einen handelt es sich um ein stadtweites Grundwassermodell, das vom Lehrstuhl für Hydrogeologie im Forschungsprojekt Geo.KW entwickelt wurde und an der LHM im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung genutzt und in Wert gesetzt wird. Zum anderen wird das Modell München beschrieben, das als konsistenter Datensatz von den SWM gepflegt wird.

I.2.1 Geo.KW: Ein Simulationsframework und Datenmodell zur Optimierung der thermischen Grundwassernutzung

Innerhalb des Verbundvorhabens Geo.KW (2019-2022) wurde ein Managementtool entwickelt, das eine effizientere thermische Nutzung des Grundwassers als dezentrale Energiequelle zum Heizen und Kühlen ermöglicht. Durch eine flexible Planungs- und Optimierungshilfe wird die Umsetzung von Anlagen zur thermischen Grundwassernutzung erleichtert und das Management dieser Energieressource optimiert, sodass eine Vernetzung der unterschiedlichen stadt-spezifischen Verbraucher mit der Dynamik und dem Speicherpotenzial des Grundwassers sichergestellt ist. Damit ist es möglich, einen höheren Anteil des Kälte- und Wärmebedarfs in der Stadt als bisher durch die thermische Grundwassernutzung zu decken und den Primärenergiebedarf zu senken. Die Hauptziele im Projekt waren:

- Optimierung des technisch nutzbaren Potenzials der thermischen Grundwassernutzung
- Berücksichtigung von **Synergieeffekten** zwischen Wärme- und Kältelasten mit Hilfe eines dynamischen Abgleichs von Verbraucher und Energiequelle.

- Bereitstellung von **räumlich aufgelösten Informationen** für eine effizientere Wärme- und Kälteversorgung auf dezentraler, **quartiersbezogener und stadtweiter Ebene** für Energieplaner, Stadtwerke und Genehmigungsbehörden.
- Entwicklung von **quartiersbezogenen Strategien** zur effizienten Grundwassernutzung unter Berücksichtigung von relevanten **dynamischen Aspekten** im urbanen Raum.

Zur Simulation des optimierten Ausbaus der thermischen Grundwassernutzung wurden spezifisch für die jeweiligen räumlichen Skalen, Baublock, Quartier und Stadt, angepasste Optimierungsmethoden entwickelt. Für die stadtweite Optimierung wurde eine transiente thermisch-hydraulische Untergrundsimulation mit einer Energiesystemoptimierung gekoppelt. Eine Grundlage hierfür war der Aufbau eines Energiesystemmodells und eines numerischen 3D-Grundwassermodells, das alle relevanten Wärmequellen und -senken integriert, um den IST-Zustand des Grundwasserleiters abbilden zu können. Auf Quartiersebene wurde ein analytisches Modell zur Berechnung des Temperaturfelds mit einer Optimierung verknüpft, um die Positionierung von Brunnenpaaren auf Flurstücken zu optimieren. Das Ergebnis für ein Quartier ist ein optimiertes Ausbauszenario mit maximaler Versorgung durch Grundwasserwärmepumpen ohne negative thermische Beeinflussung zwischen den Brunnen (Halilovic, Böttcher, Zosseder, & Hamacher, 2022). Im kleinsten Maßstab auf einer geringen Zahl von Baublöcken, wurde eine Methode mittels „PDE-constraint“-Optimierung entwickelt, die Finite-Elemente Modelle nutzt und eine räumlich kontinuierliche Anpassung von Brunnenpositionen ermöglicht, um optimierte Brunnenfelder zu berechnen (Halilovic, Böttcher, Kramer, Piggott, & Zosseder, 2022). Die verschiedenen Optimierungsmethoden können entsprechend den Anforderungen auf den unterschiedlichen Skalenniveaus eingesetzt werden und so die verschiedenen Fragestellungen zur thermischen Grundwassernutzung sowohl im Bestand als auch im Neubau beantworten.

Zur Erstellung und Parametrisierung der Grundwassermodelle wurde eine Datenbank aufgebaut, die hochaufgelöste räumliche Datensätze zur Hydrogeologie des Grundwasserleiters und dessen bestehenden Nutzung aus vorangegangenen Projekten des Lehrstuhls integriert. Die Grundlagen bilden Daten, die in den Projekten „Geothermisches Potenzial der Münchner Schotterebene (GEPO)“ und „Parameterbestimmung für die Abschätzung der geologischen Nutzungspotenziale in der Planungsregion 14 und im tertiären Untergrund des Großraums München (GeoPot)“ für die Stadt München erarbeitet wurden (Zosseder et al., 2022). Neben detaillierten geologischen Daten zur Tiefenlage der Tertiären Schicht, wurden auch die Daten einer großräumig angelegten Stichtagsmessung im April 2014 und eine Vielzahl an Pumpversuchsauswertungen zur Kalibrierung berücksichtigt. Zusätzlich standen zeitlich hoch aufgelöste Messungen zu Grundwasserständen und Temperaturen aus der Datenbank des Referats für Klima- und Umweltschutz (RKU) zur Verfügung, um die Dynamik des Grundwassers untersuchen zu können. Aufbauend auf den Vorarbeiten der Projekte wurden in Geo.KW sämtliche Informationen über die vorhandenen Grundwassernutzungen aus verschiedenen behördlichen Datenbanken vervollständigt, aktualisiert, plausibilisiert und für eine konsistente Simulation ergänzt. Darüber hinaus wurden auch unterirdische Infrastrukturen (Düker-Systeme, Tunnel, tiefliegende Gebäude, Abwassersammelkanäle, etc.) recherchiert, die das Grundwasser hydraulisch beeinflussen, und entsprechend ihrer räumlichen Ausdehnung in das Großraummodell integriert. Des Weiteren wurde aufbauend auf einer Versiegelungskartierung des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR) eine räumlich und zeitlich differenzierte Grundwasserneubildung und saisonale Schwankung der Oberflächentemperatur berechnet, die zudem den Einfluss der urbanen Wärmeinsel im Modell berücksichtigt (Böttcher & Zosseder, 2021).

Zur Bereitstellung und praxistauglichen Anwendung der Projektergebnisse wurde in Geo.KW zusätzlich eine Webapplikation entwickelt. Die Webapp ist auf spezielle Nutzergruppen zugeschnitten und wurde im engen Austausch mit den assoziierten Partnern (RKU, WWA-München und SWM) konzipiert und während der Entwicklung durch Feedback-Schleifen an die Nutzeransprüche angepasst. Die Webanwendung ist für die Nutzung der Ergebnisse in drei übergeordneten Themenfeldern entworfen worden:

1. Grundlage zur Entwicklung von Energiestrategien
2. Informationsbasis für die Genehmigungspraxis und Erleichterung der Bewertung
3. Bereitstellung von Planungsgrundlagen für Fachplaner und Bauleitplanung

Grundlegend steht durch die Analysemethoden eine wichtige Basis für die Wärmeplanung zur Verfügung. Zum einen können die Ergebnisse für die strategische stadtweite Wärmeplanung des RKU eingesetzt werden, zum anderen können die flurstückscharfen Daten auf Quartiersebene Verwendung finden und aufwändige initiale Machbarkeitsstudien ersetzen.

Im zweiten Themenfeld, der Genehmigungspraxis, profitieren die zuständigen Stellen in der unteren Wasserbehörde (Wasserrecht RKU) und am Wasserwirtschaftsamt München (WWA München) von der aufbereiteten Datenbasis zu Grundwasserständen, Temperaturen und existierenden thermischen Nutzungen. Da an den Behörden die Genehmigung von thermischen Grundwassernutzungen erfolgt, erleichtert und beschleunigt eine qualitätsgeprüfte und ganzheitlich dargestellte Datenbasis den Genehmigungsprozess deutlich und kann zu einer beschleunigten und nachhaltigen Umsetzung von grundwassergeführten Systemen führen. Anträge neuer Nutzungen können in der Webapp auf Basis von Simulationsergebnissen begutachtet werden und die Risikoabschätzung von negativen thermischen Beeinflussungen bestehender Anlagen kann detaillierter und schneller vorgenommen werden. Für die Genehmigungspraxis konnte so ein entscheidender Schritt in Richtung eines ganzheitlichen Grundwassermanagements umgesetzt werden. Durch die Verstetigung innerhalb dieses Projekts und darüber hinaus ist ein regelmäßiges Update der Webapp durch RKU und WWA sichergestellt und dem vorsorgenden Trinkwasserschutz kann in angemessener Weise nachgekommen werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich in der Bauleitplanung. Die initiale Beurteilung der Machbarkeit von Grundwasserwärmepumpen war durch die aufwändige Datenrecherche und fehlende Methoden oft eine Hürde, weshalb Potenziale oft unerkannt und ungenutzt blieben. Durch die in der Webapp zugänglichen Planungsgrundlagen können die Beurteilungen von Fachplanern auf denselben hochwertigen Datensätzen basieren, die auch der Genehmigungsbeurteilung zugrunde liegen. So werden initiale Abschätzungen der Machbarkeit im Rahmen der Bauleitplanung einfacher und es verringert sich zugleich das Risiko von Umsetzungsbeschränkungen. Hierfür wird zusätzlich auf eine vom Lehrstuhl Hydrogeologie der TUM im Rahmen des EU-Interreg Projekts GRETA (2016-2018) entwickelte Methodik zurückgegriffen, die ein quantitatives Potenzial für die Nutzung von Grundwasserwärmepumpen bestimmt, welches die relevanten rechtlichen Anforderungen der Genehmigungspraxis berücksichtigt (Böttcher, Casasso, Götzl, & Zosseder, 2019).

1.2.2 Modell München: Das zentrale Steuerungsinstrument der Wärmewende

Die SWM bauen seit dem Jahr 2018 Datenmodelle und Tools für den Münchner Wärmemarkt im Rahmen ihrer Digitalisierungsstrategie auf. Mittlerweile bildet das **Modell München** einen konsistenten Datensatz auf Gebäudeebene mit entsprechender Zuordnung von Adress-, Gebäude-, Energieverbrauchs-, Energieträger- und Netzdaten. Das Modell München wird dabei beständig über SWM-interne und externe Datenerhebungen und Analysen aktualisiert und weiterentwickelt. Zugleich lässt es sich als Tool für Szenarien- und Wirkungsanalysen im Münchner Wärmesektor einsetzen. Mittels einer Multi-Agenten Simulation können verschiedene Szenarien einer zukünftigen Entwicklung der stadtweiten Wärme- und Kälteversorgung untersucht werden. Es bildet damit eine hervorragende Grundlage für die kommunale Wärmeplanung und soll auch an der LHM eingesetzt werden und bestehende Werkzeuge sukzessive ablösen. Daher wurde schon 2018 im Projekt GRETA eine Kooperation des Lehrstuhls Hydrogeologie mit dem Entwicklerteam des Modell Münchens aufgebaut und eine Anforderungsanalyse zur Integration der thermischen Grundwassernutzung durchgeführt. Im Hinblick auf Verbesserungen der Potenzialanalysen aus dem Geo.KW Projekt, die Gegenstand dieses Berichts sind, konnte durch diese Vorarbeit der Datenaustausch wesentlich einfacher und schneller bewerkstelligt werden. Zum Ende des GRETA-Projekts wurden testweise vorläufige Potenzialanalysen ausgetauscht, die allerdings weder flurstückscharf noch unter Berücksichtigung der bestehenden Bebauung berechnet worden sind. Diese Lücken sollen im vorliegenden Projekt geschlossen werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1 Projektzeitraum

Die Laufzeit des Projekts zur Integration der thermischen Grundwassernutzung in das Modell München hat offiziell mit beiderseitiger Unterzeichnung des Forschungs- und Entwicklungsvertrages am 8. November 2022 begonnen und konnte am 31. Dezember 2022 formal abgeschlossen werden. Nach

dem Auslaufen des Geo.KW Projekts zum 31. März 2022 konnte allerdings schon frühzeitig mit den Arbeiten für dieses Projekt begonnen werden und die Weiterführung der Arbeiten für die praktische Anwendung in der kommunalen Wärmeplanung durch LHM und SWM konnte gewährleistet werden. Aus diesem Grund sind auch schon einige Arbeitspakete vor dem offiziellen Start des Projekts abgeschlossen worden (siehe Abschnitt I.3.2). Zusätzlich wurden auch im 1. Halbjahr noch verschiedene Arbeiten durchgeführt, um die Ergebnisse weiterzuentwickeln.

I.3.2 Meilensteine und Arbeitsschritte

Der Lehrstuhl für Hydrogeologie der TUM erreichte erfolgreich das übergeordnete Projektziel der Integration der thermischen Grundwassernutzung in das Modell München für die Anwendung in der kommunalen Wärmeplanung. Die einzelnen Arbeitspakete des Projekts sind in Tabelle 1 mit den entsprechenden Meilensteinen aufgeführt.

Tabelle 1: Meilensteine und Arbeitspakete im Projekt.

Meilenstein	Arbeitspaket	Arbeitsschritt	erreicht	Titel des Arbeitspakets
M1	AP 1.1	Datenabgleich	31.12.2022	IST-Situation thermische Grundwassernutzungen
M2	AP 1.2	Datenabgleich	10.10.2022	Integration der flurstückscharfen Potenzialanalysen
M3	AP 1.3	Datenabgleich	10.10.2022	Integration der baublockscharfen Potenzialanalysen
M4	AP 2.1	Modellkopplung	31.11.2022	Konzepterstellung zur effizienten Kopplung des optimalen Ausbaus mit der Multi-Agenten Simulation im Modell München
M5	AP 2.2	Modellkopplung	31.12.2022	Realisation der technischen Kopplung zur Bestimmung räumlichen Potenzials
M6	AP 2.3	Modellkopplung	31.12.2022	Aufbau einer effizienten Schnittstelle zum automatisierten Datenaustausch
M7	AP 3	Versorgungsvarianten	31.11.2022	Abgleich und Kombination mit alternativen Versorgungsvarianten
M8	AP 4	Stakeholder-einbindung	31.12.2022	Einholen und Einarbeiten von Stakeholder Feedback mit Reflektion und Bewertung unterschiedlicher Zielvorstellungen

Erläuterung zu Meilenstein M1: IST-Situation thermische Grundwassernutzungen

Thermische Grundwassernutzungen sind wasserrechtlich relevant und für den Betrieb einer Anlage wird eine Genehmigung benötigt. Im Zuge der Genehmigung werden die Anlagen registriert und an den involvierten Stellen (RKU, WWA, LfU) in Datenbanken gespeichert. Der erste Kontakt eines Bauherrn im Zuge der Genehmigung erfolgt normalerweise bei der unteren Wasserbehörde am RKU (RKU-IV-13 Wasserrecht). Im wasserrechtlichen Verfahren werden die Daten anschließend an das WWA-München übermittelt, welches den Eintrag in der landesweiten bayerischen Datenbank am Landesamt für Umwelt (LfU) vornimmt. In der Genehmigungspraxis hat es sich als geeignet erwiesen, an den jeweiligen Stellen eigene Datenbanken zu pflegen, die auf die jeweiligen Bedürfnisse der behördlichen Aufgaben zugeschnitten sind. Idealerweise wären die so entstandenen drei Datenbanken am RKU, WWA und dem Landesamt für Umwelt (LfU) kongruent und würden sich lediglich um einzelne Metadaten unterscheiden, die für die verschiedenen Bearbeitungsschritte relevant sind. Aufgrund der

unterschiedlich voranschreitenden Digitalisierung, Personalmangel und ineffizientem Datenaustausch ist der beschriebene Idealzustand in der Vergangenheit nie erreicht worden.

Für belastbare Aussagen zum Potenzial der thermischen Grundwassernutzung innerhalb der kommunalen Wärmeplanung sind Kenntnisse über existierende Nutzungen allerdings eine unerlässliche Voraussetzung. Falls der IST-Zustand nicht vollständig dokumentiert ist, könnten Anlagen in der Wärmeplanung empfohlen werden, die entweder nicht genehmigungsfähig sind, oder nach der Inbetriebnahme existierende Anlagen negativ beeinflussen bzw. selbst negativ beeinflusst werden. Derartige Beratungsfehler seitens der LHM würden die Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie und der Wärmeplanung in der Öffentlichkeit nachhaltig negativ beeinflussen. Dieses Risiko wird durch ein Angleichen der Datensätze deutlich reduziert.

Innerhalb des Geo.KW Projekts wurde bereits ein Verschnitt der Datenbanken zum Zweck der thermischen Grundwassersimulation methodisch entwickelt und durchgeführt. Die Arbeiten beruhen allerdings auf dem Stand Anfang 2019 und sollen innerhalb dieses Vorhabens auf den Stand Ende 2022 nachgezogen werden. Dies ist insbesondere nötig, da die Bewilligungszahlen aufgrund der Energiekrise drastisch gestiegen sind. Zusätzlich soll die Dokumentation der Inkonsistenzen verbessert werden, um im Nachgang des Vorhabens ein sukzessives Aufarbeiten der Lücken an den betreffenden Stellen zu erleichtern. Für die Fortschreibung der einzelnen Datenbanken soll abschließend im Projekt ein Austausch zwischen den Stellen angestoßen werden, um zukünftige Verbesserungsmöglichkeiten in der Kommunikation und Datenübermittlung zu diskutieren.

Erläuterung zu den Meilensteinen M2 und M3: Integration der flurstück- und baublockscharfen Potenzialanalysen

Die flurstück- bzw. baublockscharfe Potenzialanalyse bildet die Grundlage für die Integration der thermischen Grundwassernutzung in das Modell München und somit in die kommunale Wärmeplanung. Wie in Abschnitt II.1 näher erläutert wird, ist es für eine Definition von Eignungsgebieten notwendig das maximale technisch umsetzbare Potenzial pro Flurstück bzw. Baublock auszuweisen. Die Unterscheidung zwischen Flurstücken und Baublöcken wurde getroffen, um die Analysen in einer größeren Fläche auch auf die Machbarkeit von Verbundlösungen zu erweitern. Hierbei wurde die Methodik für Baublöcke im Austausch mit den SWM erarbeitet, um angepasste stadtweite Evaluationsmöglichkeiten für grundwasserversorgte (kalte) Nahwärmenetze zu bieten. Zur Beschränkung des Potenzials werden sowohl technische als auch rechtliche Rahmenbedingungen berücksichtigt, die in Abschnitt II.2 näher beschrieben werden.

Erläuterung zu den Meilensteinen M4, M5 und M6: Kopplung zwischen Geo.KW und Modell München

Aufbauend auf den Potenzialberechnungen aus M2 und M3 wurde in M4 ein Konzept erarbeitet, wie die Potenziale der thermischen Grundwassernutzung optimal stadtweit genutzt werden können. Zunächst muss ein Abgleich des stadtweiten gebäudescharfen Wärmebedarfs mit dem verfügbaren technischen Potenzial durchgeführt werden, um Aussagen über den möglichen Versorgungsgrad durch thermische Grundwassernutzung treffen zu können (Abschnitt II.3). Im Detail beantwortet dieser Schritt die Frage, welche Gebäude durch Grundwasserwärmepumpen oder Nahwärmenetze versorgt werden können.

Da der Potenzialabgleich noch nicht die räumliche Interaktion zwischen den Anlagen berücksichtigt, ist es in einem weiteren Schritt – Meilenstein M5 – nötig zu prüfen, inwiefern ein maximaler Ausbau der technisch möglichen Nutzungen in der Stadt erreicht werden kann, ohne dass sich die Anlagen thermisch negativ beeinflussen. Für die Evaluation dieses räumlich verfügbaren Potenzials ist eine Optimierung nötig, die die installierte thermische Leistung durch einen optimal angeordneten Ausbau maximiert. Das Ergebnis dieser Optimierung muss auf effiziente Weise ins Modell München übertragen werden, was Gegenstand von Meilenstein M6 ist und in Abschnitt II.4 beschrieben wird.

Erläuterung zu den Meilensteinen M7 und M8: Abgleich und Kombination mit alternativen Versorgungsvarianten und Einbindung von Stakeholdern

In einer parallel laufenden Teilstudie lässt das RKU jenseits der thermischen Grundwassernutzung weitere Wärmequellen und -technologien außerhalb des Fernwärmegebiets auf ihr Potenzial hin

untersuchen. Hierzu gehören vor allem dezentrale und semi-zentrale Luftwärmepumpen und punktuell die Nutzung von Erdwärmekollektoren, Abwärme und Biomasse. Die Potenziale der verschiedenen Wärmequellen bzw. Versorgungstechnologien werden innerhalb des Modell München gebündelt und in den Multi-Agenten Simulationen zur Erarbeitung der Wärmewendestrategie genutzt. Durch die erfolgreich durchgeführte Kopplung zwischen Geo.KW und dem Modell München konnte der Meilenstein M7 erreicht werden. Die Ergebnisse der Wärmewendeszenarien sind allerdings nicht Bestandteil dieses Berichts, sondern werden in dem Bericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) detaillierter beschrieben (Kleinertz et al. 2023).

Für grundwassergebundene Nahwärmenetze und dezentrale Grundwasserwärmepumpen entwickeln die SWM aktuell innovative technische Lösungen, die in geeigneten Gebieten angeboten werden sollen. Deshalb wurde in dieser Studie ein Austausch mit den Verantwortlichen bei den SWM aufgebaut und gepflegt. Auf diese Weise konnten unterschiedliche Herangehensweisen bei der Bewertung der technisch-ökonomischen Potenziale für Nahwärmenetze frühzeitig reflektiert und vereinheitlicht werden. Dieses kooperative Vorgehen wird vor allem für das Ableiten von Maßnahmen in der kommunalen Wärmeplanung von Vorteil sein, da die vertrieblichen Überlegungen der SWM und die strategischen Überlegungen des RKU auf gemeinsamen Annahmen beruhen. Vor diesem Hintergrund wird die grundlegende Realisierbarkeit von Projekten innerhalb von Eignungsgebieten sichergestellt und folglich auch die Akzeptanz der kommunalen Wärmeplanung bei Gebäudeeigentümer*innen gestärkt.

1.3.3 Projekt-Veranstaltungen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt startete mit einem internen Kick-off am 24.03.2022, an dem sowohl Vertreter des RKU als auch der SWM teilnahmen, wodurch schon zu Beginn die einzelnen Belange vorgestellt und konkretisiert werden konnten. Wie in Tabelle 2 aufgeführt, wurden im Projektverlauf regelmäßig Treffen mit den verschiedenen Akteuren, wie den SWM, dem WWA München und der FfE, als Bearbeiterin der Studie „Wärmestrategie München“, durchgeführt, um Feedback kontinuierlich integrieren zu können.

Tabelle 2: Chronologische geordnete Projekttreffen und Veranstaltungen zur Vorstellung der Projekthinhalte.

Datum	Veranstaltung	Thema / Inhalt
24.03.2022	Integration Geo.KW in das Modell MUC	Definition der Projekthinhalte, Austausch und Schnittstellen
12.04.2022	Tool Klimaschutzmanagement LHM	Inwertsetzung der Geo.KW Webapp für die kommunale Wärmeplanung
12.05.2022	Integration von Geo.KW am WWA-M	Datenaustausch am Beispiel des Aufbaus eines Modells für die Genter Str.
20.05.2022	Geo.KW Inwertsetzung bei den SWM	Detaillierte Festlegung des Datenaustauschs
12.05.2022, 01.06.2022, 22.06.2022	Integration von Geo.KW am WWA-M	Folgetreffen zum Modellaufbau Genter Str.
27.06.2022	Kick-off Projekt „Wärmestrategie München“ der FfE	Vorstellung des Projektes Geo.KW und der Teilstudie zur Integration ins Modell München zur Definition der thematischen Abgrenzung der Teilstudien zueinander
28.06.2022	Anwendungsfälle Geo.KW aus dem Praxistool	Austausch mit RKU und WWA zur Inwertsetzung der Webapp und zukünftiger Pflegeaufwand
06.07.2022	Kopplung Modell München – Geo.KW	Projekttreffen mit den SWM zur Definition der Kopplung
13.07.2022	Konzeptionelle Überlegungen Kopplung Geo.KW und Modell für kalte Nahwärmenetze und Einzellösungen der SWM	Folgetreffen mit den SWM zur Definition der Kopplung
20.07.2022	Grundwassermodellierung	Consulting zum numerischen Modell Genter Str. des WWA München
25.07.2022	Softwaregestütztes Monitoring im Quartier – Status Quo und Weiterentwicklungsmöglichkeiten	Diskussion zu Synergien zwischen bestehenden Softwarelösungen zur Realisierung einer digitalen Monitoring-Strategie auf Arbeitsebene

Datum	Veranstaltung	Thema / Inhalt
03.08.2022	Abstimmung Software kalte Nahwärme	Folgediskussion spezifisch zur Information über kalte Nahwärmepotenziale
04.08.2022	Vorstellung Geo.KW Tool	Vorstellung der Webapp bei SWM und FfE
31.08.2022	Geo.KW Anwendungsfälle	Anschlusstreffen zur konkreten Anwendung der Geo.KW Ergebnisse beim WWA
01.09.2022	Vorstellung Wärmepumpenatlas der FfE	Vorstellung und Diskussion zum Wärmepumpenatlas der FfE mit Hinweisen zu fachlichen und methodischen Schwächen bei erdgekoppelten Wärmepumpen
07.09.2022	Geo.KW Datenaustausch und Parameterstudien TAP Methode	Datenaustausch und Vorstellung der Potentialevaluation am WWA
14.09.2022	Geo.KW Anwendungsfälle	Anschlusstreffen zur konkreten Anwendung der Geo.KW Ergebnisse beim WWA
16.09.2022	Wärmestrategie München - 1. Workshop	Zuarbeit, Teilnahme und Diskussion am Workshop
06.10.2022	Dashboards und Quartiersarbeit RKU & SWM	Einarbeitung in die Benutzung des Modell München zur kommunalen Wärmeplanung
07.10.2022	eThink Jour Fixe (laufend)	Diskussion zur Integration von Grundwasserwärmepumpen in die Multi-Agenten Simulation
12.10.2022	Geo.KW Anwendungsfälle	Anschlusstreffen zur konkreten Anwendung der Geo.KW Ergebnisse beim WWA
20.10.2022	Dashboards und Quartiersarbeit RKU & SWM	Einarbeitung in die Benutzung des Modell München zur kommunalen Wärmeplanung
09.11.2022	Follow-up: eThink & FfE - Investitionskosten (Heizungstechnik, Sanierung)	Diskussion und Datenaustausch zu Kosten
17.11.2022	Abstimmung Vorgehen Potenzial Grundwasser-WP EFH/MFH	Detailabstimmung mit SWM zur Festlegung der relevanten Parameter
28.11.2022	Update TUM-Studie: Wärme-Kälte-Verbünde	Projektvorstellung bei der FfE
18.04.2023	Abschlusspräsentation zur Integration von Geo.KW ins Modell München	Abschließende Vorstellung während der Geo.KW Abschlussfeier

Innerhalb des Projekts und auch über die Projektlaufzeit hinaus wurden viele gewinnbringende Kooperationen mit verschiedenen Akteuren aufgebaut und gepflegt. Dieses Kapitel beschreibt die Zusammenarbeit und gliedert sich in den Austausch, der mit den jeweiligen Stellen stattgefunden hat.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

BIS Auszug: Im geologischen Landesamt werden zentral für Bayern alle geologischen Daten inkl. der Daten zu thermischen Nutzungen gesammelt. Diese Datenbank wurde benötigt, um einen Abgleich mit weiteren bestehenden Datenbanken über Grundwassernutzungen an anderen Stellen (RKU und WWA) durchzuführen. Mit dem LfU wurde ebenfalls der Aufbau von effizienten Schnittstellen diskutiert, die für weiterführende Inwertsetzung der Projektergebnisse aus Meilenstein M1 in Zukunft weiterentwickelt werden können. Dies betrifft insbesondere die Bereinigung und Harmonisierung der unterschiedlichen Datenbanken, wie unter Abschnitt I.3.2 (M1) erklärt.

Wasserwirtschaftsamt München (WWA München)

Datenaustausch mit dem Wasserwirtschaftsamt zu thermischen Nutzungen: Große thermische Grundwassernutzungen, die gemäß der Eigenüberwachungsverordnung (EÜV) ein Monitoring betreiben müssen, berichten regelmäßig Entnahmedaten an das WWA München. Diese Daten zusammen mit den Stammdaten der thermischen Nutzungen aus dem Brunnenkataster des WWA wurden dem Projekt ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Analog zum RKU und der SWM hat auch das WWA wertvolle Rückmeldungen zur praktischen Verwendung der Projektergebnisse im Rahmen der Genehmigungspraxis für die thermische Grundwassernutzung gegeben. Diese wurden bei der Ausgestaltung der jeweiligen Werkzeuge berücksichtigt. Parallel hat das WWA München ein dreijähriges regional finanziertes Anschlussprojekt gestartet, um analog zum RKU die Ergebnisse des Geo.KW-Projekts in die Praxis zu überführen.

I.4 Eingangsdaten zur Potenzialevaluation und Modellkopplung

Voraussetzung für eine realitätsnahe, großräumige Potenzialermittlung in der Stadt ist eine detaillierte und hochaufgelöste Erfassung der Grundlagendaten. Vor allem im Bereich der hydrogeologischen Grundlagen wurden diese Daten bereits in verschiedenen Projekten am Lehrstuhl für Hydrogeologie für den Großraum München erarbeitet (siehe Tabelle 3). Die hauptsächlich aus den aufgeführten Projekten entnommenen Eingangsdaten werden in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt.

Tabelle 3: Projekte der TUM, in denen die detaillierten Grundlagendaten für die Grundwassersimulation in der Stadt München entwickelt wurden.

GEPO – Erstellung einer Datengrundlage für die Abschätzung des geothermischen Potenzials im oberflächennahen Untergrund des quartären Grundwasserleiters des Großraum Münchens		
Fördergeber Bayer. StMUV	Fördersumme: ~ 840.000 €	Laufzeit: 4 Jahre (2012-2015)
GeoPot - Parameterbestimmung für die Abschätzung der geologischen Nutzungspotenziale in der Planungsregion 14 und im tertiären Untergrund des Großraums München		
Fördergeber Bayer. StMUV	Fördersumme: ~1.485.000 €	Laufzeit: 4 Jahre (2016-2019)
GRETA - Near-surface Geothermal Resources in the Territory of the Alpine Space		
Fördergeber EU-Interreg ASP	Fördersumme: ~321.000 € (Anteil TUM)	Laufzeit: 4 Jahre (2015-2018)
Geo.KW - Kopplung des geothermischen Speicherpotenzials mit den wechselnden Anforderungen des urbanen Energiebedarfs zur effizienten Nutzung der regenerativen Energiequelle Grundwasser für die dezentrale Kälte- und Wärmebereitstellung in der Stadt		
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Fördersumme: ~ 977.003 €	Laufzeit: 3,5 Jahre (2019-2022)

I.4.1 Hydrogeologische Basisdaten des Münchener Untergrunds

Die Landeshauptstadt liegt auf der sogenannten Münchener Schotterebene, einem ausgedehnten Kieskörper, der hauptsächlich im Quartär während den letzten Eiszeiten, i.e. Riß und Würm, auf einem tertiären Paläorelief abgelagert wurde (siehe Abbildung 1a). Da der Schotter in einem fluvio-glazialen Milieu von den Alpen kommend sedimentiert wurden, fällt die Geländeoberfläche der Ebene mit ca. 0.5% nach Norden ab. Die unterlagernde tertiäre Basis weist diese Neigung nicht auf, weshalb die Mächtigkeit der Schotter von Süden nach Norden abnimmt. Der Kies besitzt im Allgemeinen einen geringen Anteil an bindigem Material, i.e. Ton oder Schluff, und weist daher eine gute bis sehr gute hydraulische Durchlässigkeit auf. Das Grundwasser in dem quartären Schotter bildet das oberste Grundwasserstockwerk und fließt entsprechend des hydraulischen Gradienten Richtung Norden bzw. Nord-Osten. Im Stadtgebiet beeinflusst zusätzlich die Isar, als maßgeblicher Vorfluter in der

Schotterebene, die Fließrichtung des Grundwassers im Quartär (siehe Abbildung 1b) (Zosseder et al., 2022).

Die Grundwasseroberfläche im Stadtgebiet liegt bei durchschnittlich 7,5 Metern unter der Geländeoberkante. Dieser Flurabstand ist im Süden durch die größere Mächtigkeit der quartären Kiese tendenziell höher als im Norden. Im Norden von München kann durch das beginnende Auskeilen der Kiese das Grundwasser bereits in 1-2 Metern unter Gelände angetroffen werden (siehe Abbildung 2d). Der quartäre Schotter wird von tertiären Sanden, Schluffen und Tonen unterlagert, die in heterogener Wechsellagerung meist den Grundwasserstauer bilden und so das oberste Grundwasserstockwerk gegenüber tieferliegenden tertiären Grundwasserstockwerken abgrenzen. Diese tieferliegenden Reservoirs werden wasserrechtlich geschützt, weshalb ein Durchteufen der ersten stauenden Schicht nur in seltenen Ausnahmefällen (z.B. Brauwassergewinnung) gestattet wird (Zosseder et al., 2022).

Der quartäre Grundwasserleiter ist daher der Zielhorizont für den Bau von Brunnenanlagen für die thermische Grundwassernutzung und somit auch der Horizont, in dem Grundwassermodelle detailliert aufgelöst werden müssen, um die thermische und hydraulische Dynamik simulieren zu können. Grundlage für die untere Begrenzung des Grundwasserleiters ist somit der Übergang von der quartären in die tertiäre Schichtfolge. Diese sogenannte Quartärbasis wurde im GEPO-Projekt, vgl. Tabelle 3, aus ca. 48.000 plausibilitätsgeprüften Schichtenverzeichnissen für die gesamte Schotterebene interpoliert und wird für die Potenzialberechnung in einer Auflösung von 10 m x 10 m genutzt (siehe Abbildung 1a).

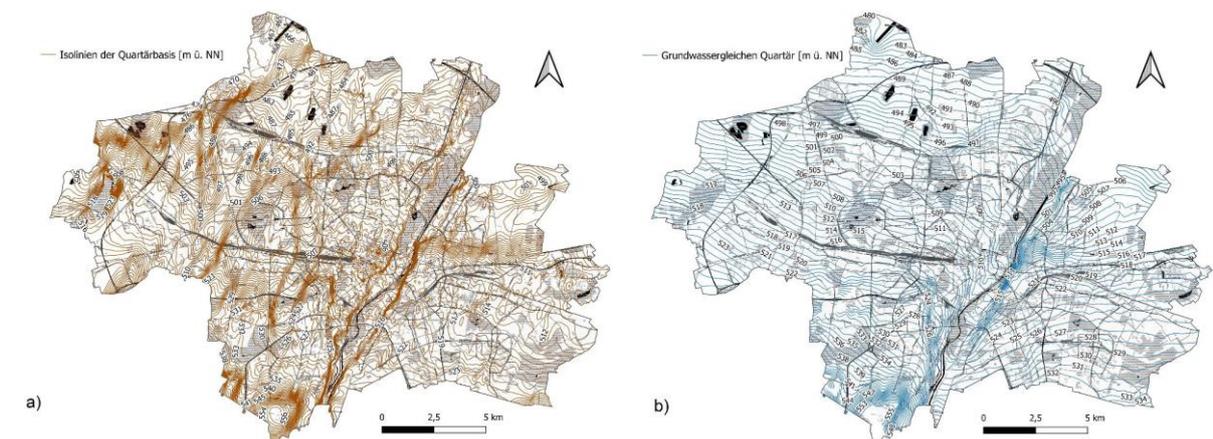


Abbildung 1: a) Höhenlage der Quartärbasis aus dem GEPO-Projekt und b) Grundwassergleichenplan aus der Stichtagsmessung August 2014.

Zusätzlich zur Kartierung der Quartärbasis wurde im April 2014 im Rahmen des GEPO-Projekts eine großangelegte Stichtagsmessung durchgeführt, bei der sowohl der Grundwasserstand als auch die Temperatur an über 6.000 Messstellen im quartären Grundwasserleiter gemessen wurden (siehe Abbildung 1b und Abbildung 2b)). Die erhobenen Grundwasserstände bilden mit der Quartärbasis die Grundlage für die Berechnung der Grundwassermächtigkeit (siehe Abbildung 2a).

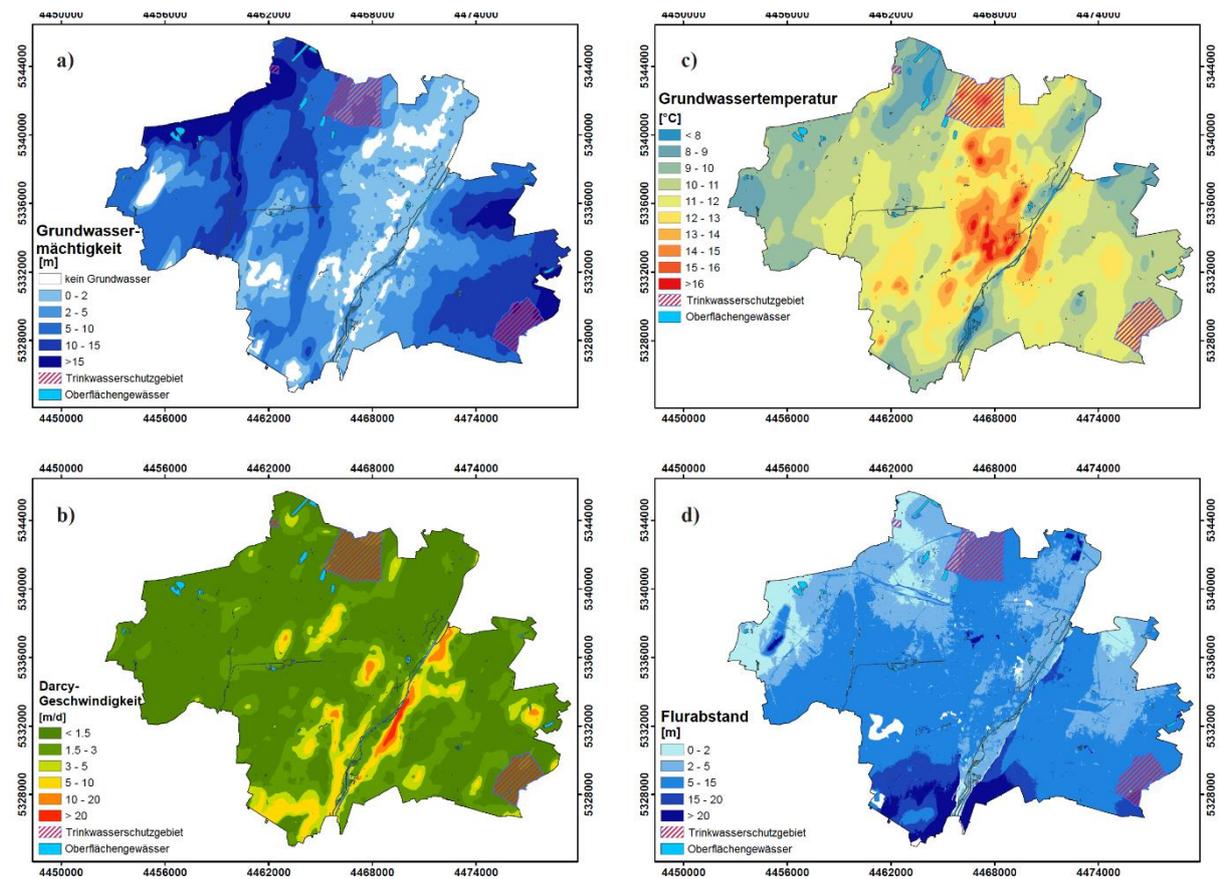


Abbildung 2: Stadtweite Datensätze der a) quartären Grundwassermächtigkeit, b) Grundwassertemperatur 1 m unter Grundwasserstand, c) Darcy Geschwindigkeit und d) des Flurabstands während der Stichtagsmessung im April 2014.

Neben der räumlichen Grundwasserdynamik, die durch die Stichtagsmessung gegeben ist, sind auch Kenntnisse über die hydraulische Durchlässigkeit als Parameter bei der Potenzialberechnung nötig. Um eine qualitativ hochwertige Datenbasis zu schaffen, sind aufwändige Feldversuche, sogenannte Pumpversuche, notwendig. Diese sind historisch oft unzureichend ausgewertet oder dokumentiert worden, weshalb im GEPO- und dem nachfolgenden GeoPot-Projekt die existierenden Datengrundlagen in den Archiven gesichtet und aufgearbeitet wurden. So standen für die Berechnungen zusätzlich über 500 lokale Durchlässigkeitsbeiwerte zur Verfügung, die räumlich interpoliert wurden.

1.4.2 Unterirdische Infrastruktur und Düker

Da der quartäre Grundwasserleiter, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, relativ flach unter der Geländeoberfläche liegt, binden tiefgeschossige Gebäude, Abwasserkanäle und U-Bahn, S-Bahn oder Straßentunnel häufig in die gesättigte Zone ein und beeinflussen die natürliche Grundwasserströmung. Je nach Tiefenlage kann die unterirdische Gebäudestruktur den Grundwasserleiter auch komplett absperren, wodurch sich ein signifikanter Aufstau im Zustrom bilden würde. Um diesen Aufstau auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren, sind bei Gebäuden mit besonders hohem Aufstaupotenzial sogenannte Düker verbaut.

Düker bestehen typischerweise aus horizontalen Drainagerohren, die das Grundwasser im Anstrom in einem zentralen Schacht fassen. Ausgehend vom Schacht im Zustrom leiten Rohre das Grundwasser auf die gegenüberliegende Seite des Gebäudes zu einem weiteren Schacht, von dem das Wasser ohne den Einsatz von Pumpen nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren wieder in den Grundwasserleiter eingeleitet wird. Sowohl die Gebäude als auch die Düker können einen signifikanten Einfluss auf das Strömungsfeld haben und müssen daher hydraulisch berücksichtigt werden. Zusätzlich können Düker als bestehende Grundwasserfassungen mit wenig aufwändigen Umbauten auch als Entnahmestelle und Wiedereinleitung für thermische Nutzungen verwendet werden (Arnold, 2006). In

integrierten Konzepten für größere Verbundlösungen kann eine Entnahme und Wiedereinleitung aus Dükern eine wirtschaftlich attraktive Option sein.

Da zu Beginn des Projekts Geo.KW nur ein ungenauer und unvollständiger Datensatz zu tiefliegenden Gebäuden vorhanden war, wurde dieser bereinigt und um bekannte unterdükerte Bauwerke ergänzt. Somit sind alle Düker in der Datenbank auch einem Gebäude zugeordnet und es existiert sowohl ein Einlass-, als auch ein Auslassbauwerk. Da häufig Annahmen zur Tiefenlage der Gründungssohle gemacht werden mussten, sind nur Gebäude berücksichtigt worden, bei denen durch ihre Bauweise eine vollständige Absperrung des quartären Grundwasserleiters angenommen werden kann. Dies ist zum Beispiel der Fall für Tunnel, die in Deckelbauweise errichtet wurden und vollständig ins Tertiär einbinden.

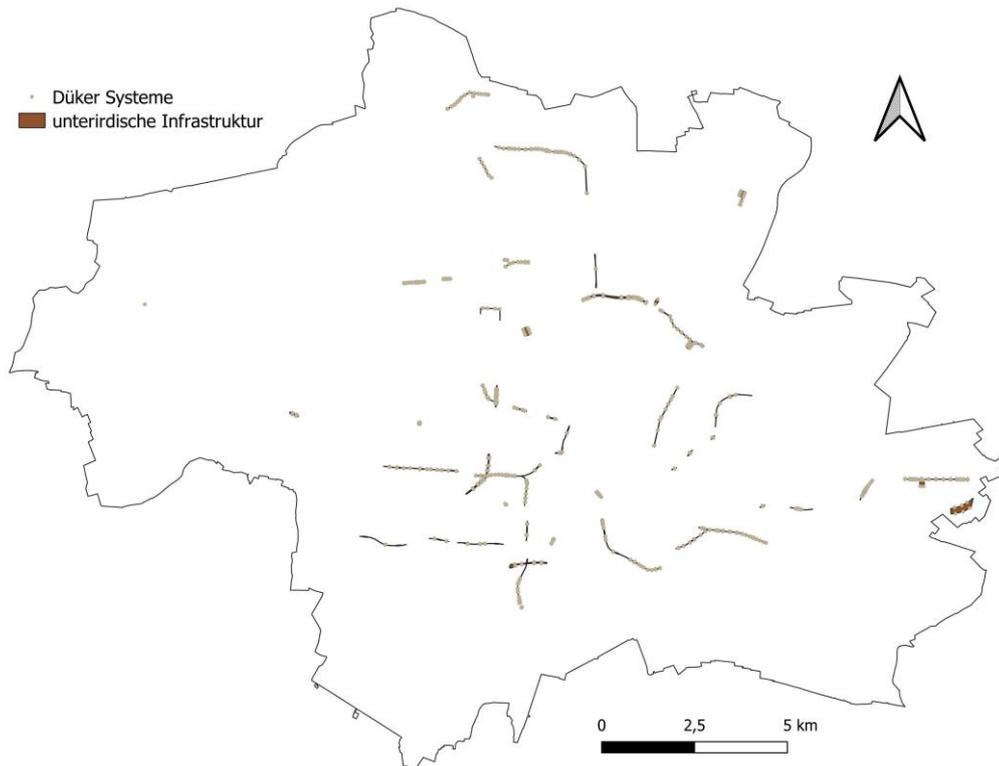


Abbildung 3: Datenbank der unterirdischen Infrastruktur-Objekte mit angeschlossenen Dükern.

Des Weiteren wurden auch bei der Tiefenlage und Länge der Dükerdrainagen Annahmen getroffen und auf eine aufwändige Recherche verzichtet, da die Drainagerohre für eine maximale hydraulische Wirkung gewöhnlich nahe der Quartärbasis eingebaut werden. Somit ist ein stadtweiter Datensatz von 52 unterirdischen Gebäudestrukturen und 383 Dükersystemen erarbeitet worden (siehe Abbildung 3). Zusätzlich zur generellen Funktion der Düker für den hydraulischen Ausgleich, werden die Fassungen auch aktuell schon in einigen Fällen als Förder- und Schluckbrunnen für thermische Nutzungen verwendet. Diese oben beschriebene Art der thermischen Nutzung von Dükern existiert bei 48 Schächten.

Mit diesen Arbeiten ist methodisch der Grundstein für eine unterirdische Gebäudedatenbank gelegt worden, die bis dato nicht existiert hatte und besonders für den Vollzug des Wasserrechts, wie z.B. bei Aufstaubeurteilungen, schon jetzt hohe praktische Relevanz hat. In diesen Vorhaben wurde daher zusätzlich ein vollständiger Übertrag der Datenbank an das RKU realisiert, um perspektivisch eine kontinuierliche Fortschreibung und Verbesserung der Datenbasis unterirdischer Gebäudestrukturen zu erreichen. Dies ist insbesondere mit Daten zum Tiefbau möglich, die im Zuge der Genehmigung von Bauwasserhaltungen im Sachgebiet Wasserrecht beim RKU erhoben werden.

1.4.3 Unterirdische städtische Wärmeinsel

München ist die am dichtesten besiedelte Stadt Deutschlands. Die damit einhergehende großräumige Veränderung der Landnutzung führt im städtischen Ballungsraum zu höheren Lufttemperaturen als im

Umland. Dieses für das Stadtklima typische Phänomen wird als urbaner Wärmeinseleffekt bezeichnet und seine Existenz ist in München bereits lange bekannt und gut erforscht (Funk, et al., 2014). Die Prozesse an der Oberfläche wirken sich allerdings auch auf den Untergrund aus, weshalb der Wärmeinseleffekt auch im obersten Grundwasserleiter Münchens deutlich beobachtet werden kann. Eine räumlich hochaufgelöste Analyse der unterirdischen Wärmeinsel in München, die alle relevanten Wärmequellen- und -senken betrachtet, hat es vor dem Geo.KW Projekt jedoch nicht gegeben.

Besonders für die Bewilligung von Nutzungen zur Kühlung, die das Grundwasser erwärmen, ist die stadtweite Kenntnis der Einflüsse auf die Grundwassertemperatur eine wichtige Voraussetzung. Für ein nachhaltiges Grundwassermanagement ist es deshalb nötig, die thermische Vorbelastung durch die bereits existierende unterirdische Wärmeinsel zu kennen, um einer weiteren Erwärmung des Grundwassers vorzubeugen und damit eine potenzielle Verschlechterung der Grundwasserqualität im Sinne des vorsorgenden Trinkwasserschutzes zu vermeiden. Zusätzlich könnten so Grundwasserwärmepumpen in Gebieten mit hoher Intensität der Wärmeinsel bevorzugt werden, da durch eine Abkühlung des Wassers ein thermischer Bilanzausgleich geschaffen wird.

Wie in Abbildung 2d gezeigt, liegt der Flurabstand mit durchschnittlich 7 m im Stadtgebiet sehr oberflächennah. Zusätzlich nehmen die Flurabstände Richtung Norden tendenziell weiter ab, weshalb sich die Temperatur an der Geländeoberfläche immer unmittelbarer auf die thermischen Verhältnisse im Grundwasserleiter auswirkt (siehe Abbildung 4a). Die Intensität und Wirkung der unterschiedlichen anthropogenen und natürlichen Einflüsse auf die unterirdische urbane Wärmeinsel wurde innerhalb des Geo.KW-Projekts statistisch analysiert und als wissenschaftliche Publikation frei zugänglich veröffentlicht (Böttcher & Zosseder, 2022). Die Ergebnisse der Studie werden hier im Folgenden verkürzt dargestellt. Sie bilden die Grundlage für die Bewertung des thermischen Zustands des quartären Grundwasserleiters in München und stellen zusätzlich eine Voraussetzung für die Einschätzung des Potenzials zur Kälteversorgung dar.

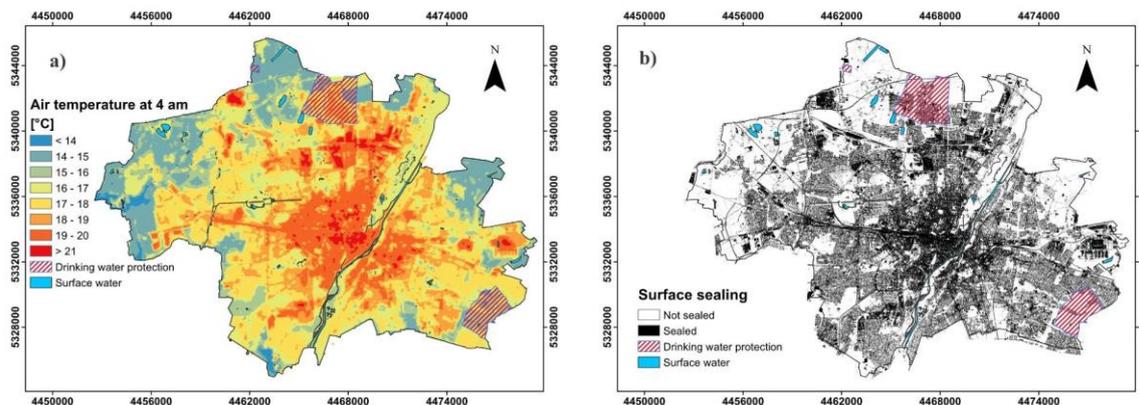


Abbildung 4: a) Modellierter Sommer-Lufttemperatur 2 m über Grund um 4 Uhr morgens nach (Funk, Groß, & Trute, 2014) und b) Oberflächenversiegelung des DLR.

Grundsätzlich müssen für die Definition der suburbanen Wärmeinsel zwei relevante Prozesse berücksichtigt werden. Zum einen existiert ein räumlich stark variabler Temperatureinfluss, der hauptsächlich durch den Versiegelungsgrad gesteuert wird. Die Oberflächenversiegelung eignet sich als Summenparameter besonders, um den diffusen Wärmeeintrag verschiedener anthropogener Wärmequellen zusammenzufassen (siehe Abbildung 4b). Zum anderen muss der zeitliche Einfluss der saisonalen Temperaturschwankungen berücksichtigt werden. Während einem Jahreszyklus propagiert ein warmer Impuls aus dem Sommer und ein kalter Impuls aus dem Winter von der Oberfläche ausgehend in den Untergrund. Die Amplitude der dabei entstehenden Schwingung wird mit zunehmender Tiefe immer stärker gedämpft, wobei sich zusätzlich die Phase des Signals immer weiter verschiebt (siehe Abbildung 5). Durch die Intensität der Dämpfung und Phasenverschiebung können mittels Passive-Heat-Tracing Rückschlüsse auf die Temperaturleitfähigkeit des Untergrunds gezogen werden.

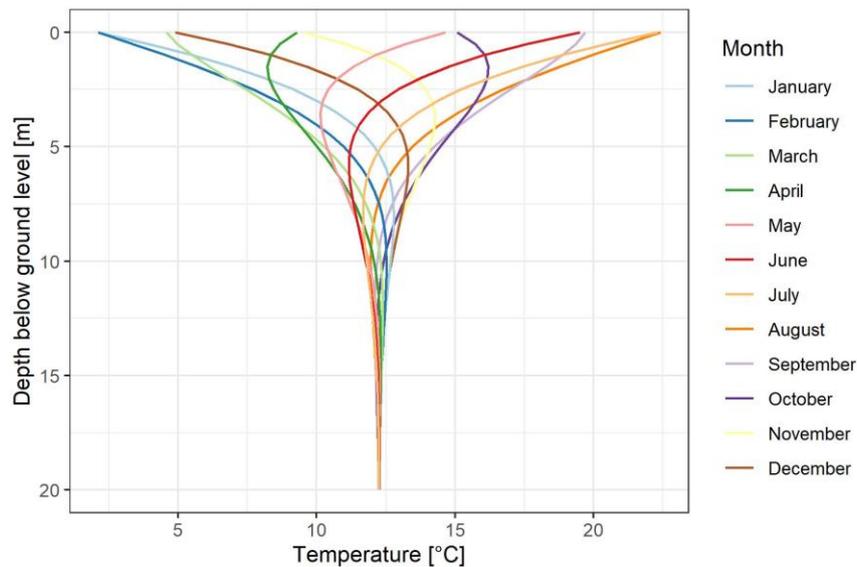


Abbildung 5: Typische saisonale Schwankung der Grundwassertemperatur mit zunehmender Tiefe pro Monat über ein Jahr berechnet nach (Böttcher & Zosseder, 2021).

Im Stadtgebiet standen für die statistische Analyse des Einflusses der Oberflächentemperatur 71 mehrjährige Temperaturzeitreihen, überwiegend vom RKU gemessen, zur Verfügung, die in unterschiedlichen Tiefen gemessen wurden. Aus den Zeitreihen wurde durch additive Dekomposition die saisonale Komponente extrahiert und die jeweilige Dämpfung und Phasenverschiebung in der entsprechenden Messtiefe ermittelt. Durch den entstandenen Datensatz konnte so auf zwei unabhängige Arten eine mittlere Temperaturleitfähigkeit von $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ für das wassergesättigte poröse Medium statistisch berechnet werden. Durch die Ermittlung der Temperaturleitfähigkeit kann auch die saisonale Schwankung der Temperatur nahe der Geländeoberfläche berechnet werden, womit die zeitliche Variabilität der oberen Temperatur-Randbedingung für eine thermische Modellierung und Beurteilung gegeben ist (siehe Abbildung 5).

Neben der zeitlichen Komponente, wurde auch der räumliche Effekt der urbanen Wärmeinsel stadtweit differenziert betrachtet. Dazu stand ein Datensatz von 752 Tiefentemperaturprofilen des Lehrstuhls für Hydrogeologie der TUM zur Verfügung, anhand derer sowohl neun anthropogene als auch vier natürliche Faktoren auf ihren Einfluss hinsichtlich der Temperaturentwicklung im Untergrund getestet wurden. Die statistische Analyse ergab, dass die Oberflächenversiegelung den dominanten und treibenden Faktor bei der Entwicklung der unterirdischen urbanen Wärmeinsel in München darstellt. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass die hydrogeologischen Parameter, Grundwassermächtigkeit, Flurabstand und Darcy-Geschwindigkeit einen signifikanten mitigierenden Effekt auf die anthropogene Temperaturerhöhung im Untergrund haben. Da die Temperatur des Untergrunds für die jeweiligen Parameterwerte am Ort der 752 Profilmessungen bekannt ist, konnte mittels Regressionsanalyse ein funktionaler Zusammenhang geschätzt werden, der beschreibt, wie stark die Erwärmung des Untergrunds aufgrund der verschiedenen signifikanten Einflüsse ausfällt. Die funktionalen Zusammenhänge konnten anschließend genutzt werden, um eine Karte der thermischen Exposition des quartären Grundwasserleiter zu berechnen. Die thermische Exposition beschreibt als dimensionsloser Parameter im Wertebereich -1 bis 1, ob die erwärmenden (Werte > 0) oder abkühlenden (Werte < 0) Faktoren am jeweiligen Ort dominieren. In der Analyse werden die räumlich signifikanten Parameter Grundwassermächtigkeit, Oberflächenversiegelung, Flurabstand und Darcy-Geschwindigkeit als Faktoren berücksichtigt, da diese sich als die sensitivsten Einflussfaktoren auf die räumliche Temperaturänderung im Untergrund erwiesen. Das Ergebnis der stadtweiten Kartierung der thermischen Exposition des Grundwassers durch die urbane Wärmeinsel ist in Abbildung 6 zu sehen.

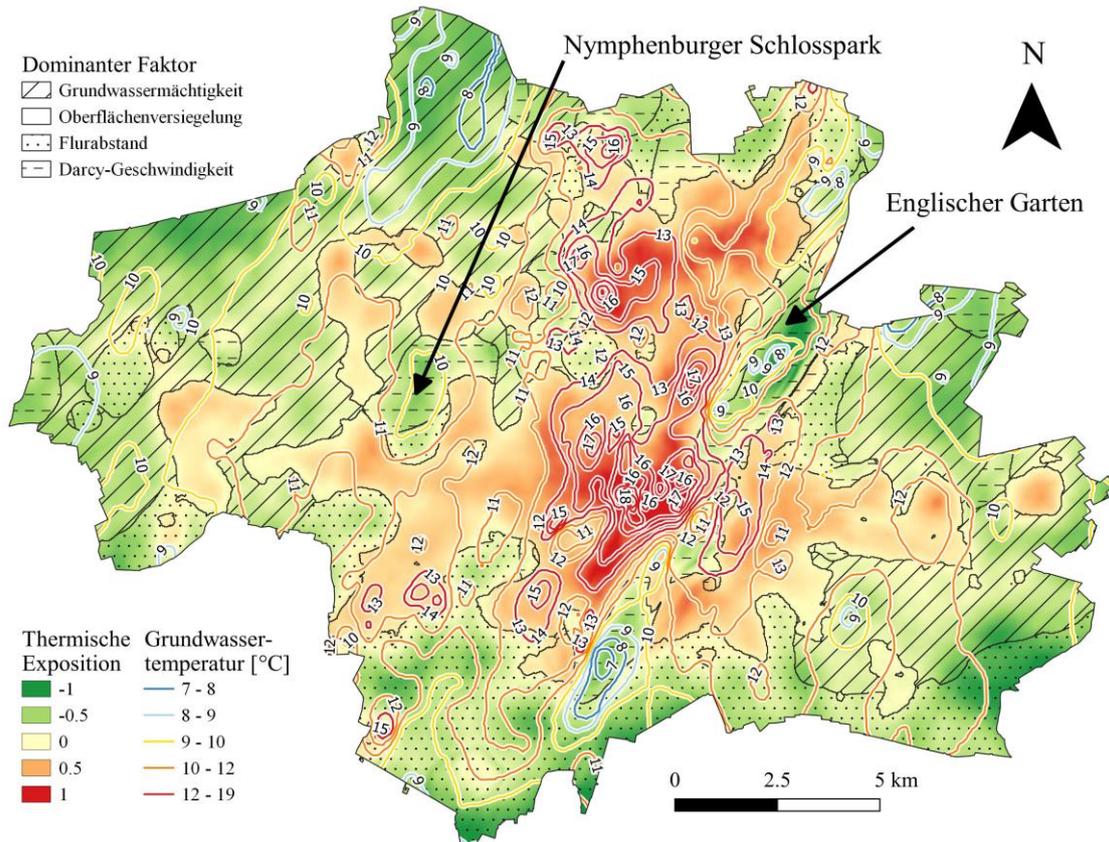


Abbildung 6: Thermische Exposition des quartären Grundwasserleiters gegenüber einer potenziellen anthropogenen Temperaturerhöhung mit einer Übersignatur, die den dominanten Faktor für die Ausbildung des jeweiligen Temperaturregimes beschreibt und die Isolinien der Grundwassertemperatur interpoliert aus der Stichtagsmessung des GEPO-Projekts durchgeführt im April 2014, verändert nach (Böttcher & Zosseder, 2021).

Die thermische Exposition wurde in Abbildung 6 zusätzlich mit der im Frühjahr 2014 gemessenen Grundwassertemperatur abgebildet, wodurch die hohe Korrelation der beiden Datensätze sichtbar wird. Besonders anhand der großen Stadtparks wird sichtbar, in welchem Maß sich v.a. die Oberflächenversiegelung auf die Temperatur des Grundwassers auswirkt. Anhand der Ergebnisse zur thermischen Exposition kann nun eine Bewertung der thermischen Eignung von Grundwassernutzung zur Wärme- und Kältebereitstellung getroffen werden. Im folgenden Kapitel wird die in der Studie verwendete Methodik detailliert beschrieben.

II Methodik

Zur Durchführung der vorliegenden Studie wurden, wie bereits in den Kapiteln I.2 und I.4 erwähnt, verschiedene Vorarbeiten und Entwicklungen des Lehrstuhls für Hydrogeologie genutzt. Dieses Kapitel beschreibt das zur Berechnung der Ergebnisse relevante methodische Vorgehen und orientiert sich an den Anforderungen der kommunalen Wärmeplanung. Im Detail gliedert sich die Beschreibung der Methodik in ein einführendes Kapitel zur Erklärung der Potentialbegriffe (II.1), ein Kapitel zur Beschreibung der technischen Potentialevaluierung für Flurstücke und Baublöcke (II.2), ein Kapitel zur Darstellung des Potenzialabgleichs mit dem Wärmebedarf (II.3) und abschließend einem Kapitel, das die Optimierung und Bestimmung des räumlichen Potenzials umfasst (II.4).

II.1 Potenzialdefinitionen

Die Bewertung des Potenzials für die thermische Grundwassernutzung ist aus mehreren Gründen komplex, weshalb eine einführende Definition der evaluierten Potenziale notwendig ist. Das Ziel dieses Kapitels ist es, eine spätere Fehlinterpretation der berechneten Werte zu vermeiden und das Wissen,

um bestehende Limitationen in den Auswertungen zu verdeutlichen. Für die kommunale Wärmeplanung werden in dieser Studie grundlegend zwei verschiedene Potenziale unterschieden. Initial wird das **technisch umsetzbare Potenzial** und darauf aufbauend das optimierte **räumliche Potenzial** berechnet. Anhand der Potenzialdefinitionen des bayerischen Energiegipfels, zusammengefasst in Abbildung 7, werden diese zwei Potenzialbegriffe im Folgenden eingeordnet.

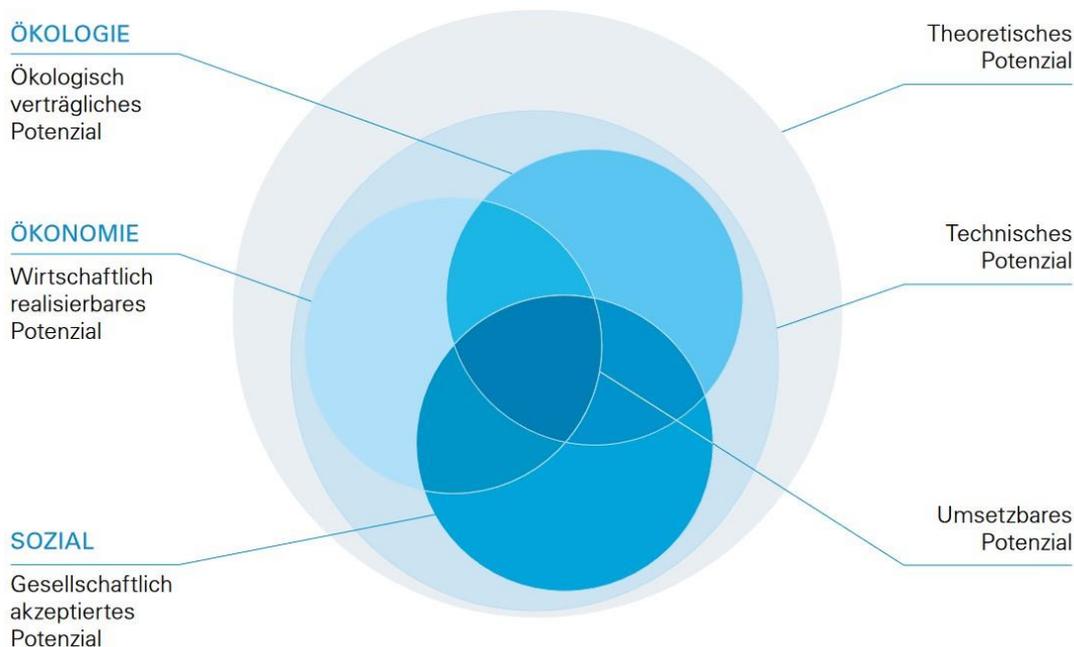


Abbildung 7: Schnittmengen und Definition der Potenzialbegriffe aus dem Ergebnisbericht des Energiegipfels (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft Landesentwicklung und Energie, 2019).

Die Notwendigkeit zur Ausweisung von zwei verschiedenen Potenzialen beruht auf der unterschiedlichen Verwendung der Ergebnisse. Zum einen müssen für die ortsspezifische Planung von neuen Anlagen Aussagen zur initialen Machbarkeit möglich sein und zum anderen sollen auf Stadtebene strategische Aussagen zur maximalen Versorgung des aktuellen Bestands getroffen werden können. Zusätzlich müssen die Potenzialabschätzungen belastbar, konservativ und beständig sein. Aus diesen Anforderungen ergibt sich, dass ökonomische Faktoren, wie z.B. stark schwankende Kosten bei der Brunneninstallation, in der Potenzialbestimmung ausgeklammert werden müssen. Für eine belastbare und konservative Einschätzung hingegen müssen alle relevanten Einschränkungen aus der Genehmigungspraxis, wie z.B. Trinkwasser- und Umweltschutz, und Entzugsgrenzen für einen nachhaltigen Anlagenbetrieb integriert und mit Sicherheiten beaufschlagt werden. Dies wurde bei der Definition des technisch umsetzbaren Potenzials berücksichtigt, wodurch eine ortsspezifische und bedarfsunabhängige Maximalabschätzung ermöglicht wird. Durch die Einbindung der genehmigungsrechtlichen Aspekte in das technisch umsetzbare Potenzial sind strenggenommen auch weite Teile des ökologisch verträglichen Potenzials dort mitberücksichtigt.

II.1.1 Definition des technisch umsetzbaren Potenzials

Die ökologische und sozialverträgliche Nutzung des Grundwassers wird grundlegend im Wasserhaushaltsgesetz (§ 46 - § 49 WHG) und bayerischen Wassergesetz (Art. 30 und Art.29 BayWG) reguliert. Die im Vollzug etablierten Grenzwerte im Sinne der ökologischen Verträglichkeit sind in der Methode berücksichtigt. Grundlage des technisch umsetzbaren Potenzials ist die Berechnung einer Entnahmerate, mit der ein Brunnenpaar nachhaltig betrieben werden kann. Eine vereinfachende Annahme bei der Potenzialanalyse ist, dass eine Anlage stets aus einem Brunnenpaar besteht. Hierbei handelt es sich jeweils um einen Förderbrunnen, aus dem das Grundwasser mit einer Unterwassertauchpumpe entnommen wird, und einen Schluckbrunnen, in dem das Wasser nach der thermischen Nutzung wieder in den gleichen Grundwasserleiter eingeleitet wird (siehe Abbildung 8). Bei einer derartigen, in der Praxis typischerweise installierten Anlage, ergeben sich aufgrund der Nutzung

von Bohrbrunnen technische und ökologisch/soziale Rahmenbedingungen, die das verfügbare Potential gegenüber dem theoretischen Potenzial abgrenzen (siehe Abbildung 7). Die ökologischen und sozialen Aspekte sind, wie oben bereits erwähnt, bei der thermischen Grundwassernutzung primär durch die genehmigungsrechtlichen Beschränkungen gegeben. Zu Beginn der Potenzialanalyse werden Ausschlussflächen für die Installation von thermischen Grundwassernutzungen in einer Weißflächenkartierung abgebildet. Die berücksichtigten Kriterien werden in Kapitel II.2.1 aufgeführt. Anschließend stellen sich auf den zur Verfügung stehenden Weißflächen drei grundsätzliche Fragen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird:

1. Mit welcher maximalen Pumprate kann Wasser aus dem Förderbrunnen entnommen werden?
2. Mit welcher maximalen Rate kann Wasser in den Schluckbrunnen eingeleitet werden?
3. Bei welcher Rate wird das Wasser nicht zwischen Schluck- und Förderbrunnen zirkuliert?

Initial wird das technische Potenzial durch die maximal mögliche Pumprate im Förderbrunnen beschränkt. Während des Pumpvorgangs senkt sich der Wasserstand im Brunnen. Für eine nachhaltige Entnahme soll zum einen verhindert werden, dass die Pumpe im Extremfall trockenfällt, also der Brunnen leer gepumpt wird, und zum anderen, dass weitreichende Grundwasserabsenkungen negative Auswirkungen auf die Ökologie oder Nachbarnutzungen haben. Hierbei wird ein Richtwert von einem Drittel der natürlichen Grundwassermächtigkeit als maximal tolerierte Absenkung des Wasserstands festgesetzt, der sich in der Genehmigungspraxis etabliert hat. Dies unterstützt eine nachhaltige Nutzung des Grundwassers. Da jeweils das maximale Potenzial evaluiert werden soll, ist eine weitere vereinfachende Annahme, dass die Brunnen jeweils vollständig ausgebaut sind. Das bedeutet, dass sie über die gesamte Strecke des Grundwasserleiters verfiltert sind. Die natürliche Grundwassermächtigkeit ist als mittlerer Niedrigwasserstand aus der großangelegten Stichtagsmessung des GEPO-Projekts bekannt und stellt hinsichtlich der Grundwasserdynamik einen konservativen Eingangswert dar (siehe Abbildung 2a). Aus der Grundwassermächtigkeit kann somit die maximale Absenkung im Brunnen abgeleitet werden. Wie stark die Absenkung in Abhängigkeit der Pumprate bei entsprechenden hydrogeologischen Randbedingungen ausfällt, wurde in der Entwicklung der Methode untersucht und ist in Kapitel II.2 beschrieben.

Die zweite Beschränkung betrifft die Wiedereinleitung über den Schluckbrunnen. Im Gegensatz zum Förderbrunnen wird hier ein Aufstau des Grundwassers hervorgerufen. Bei einer nachhaltigen Wiedereinleitung soll somit verhindert werden, dass der Aufstau im Extremfall bis an die Geländeoberfläche reicht und dort zu Überflutungen führt. Im urbanen Umfeld muss zudem eine negative Beeinflussung von unterirdischen Gebäudeteilen ausgeschlossen werden. Da, wie in Kapitel I.4.2 beschrieben, ein detaillierter Untergrundplan über die bestehenden Tiefbauten während der Bearbeitung der Studie noch nicht existierte, wurde ein Sicherheitsabstand von 0,5 m zur Geländeoberkante als Grenzwert für einen maximalen Aufstau festgesetzt. Da bei geringen Flurabständen die Wiedereinleitung auch über Rigolen, oder mehrere Schluckbrunnen statt über einen zentralen Brunnen realisiert werden kann, ist die technische Begrenzung am Schluckbrunnen ebenfalls eine konservative Annahme in der Potenzialevaluation.

Die dritte Beschränkung betrifft die thermische Beeinflussung der beiden Brunnen untereinander. Die Brunnen sind typischerweise gemäß der natürlichen Grundwasserfließrichtung so angeordnet, dass der Förderbrunnen im Zustrom und der Schluckbrunnen im Abstrom liegt. So wird thermisch unverändertes Wasser entnommen und thermisch verändertes Wasser wieder eingeleitet. Hierbei entsteht um den Schluckbrunnen im Grundwasserleiter eine Temperaturanomalie, die sich abhängig vom Betrieb der Anlage und den hydrogeologischen Eigenschaften des Gesteins unterschiedlich ausbreitet. Für eine effiziente Nutzung der Anlage darf das eingeleitete Wasser nicht in signifikanter Menge wieder zurück zum Förderbrunnen strömen, da so das thermisch veränderte Wasser erneut in den Wärmetauscher gelangt und dort sukzessive weiter abgekühlt wird. Dieser Prozess wird thermisches Recycling genannt. Er verringert die Effizienz der Wärmepumpe und kann im Extremfall zum Einfrieren des Wärmetauschers führen. Im nachhaltigen Betrieb wird die Temperaturanomalie im Grundwasserleiter entlang der natürlichen Fließrichtung stromabwärts verfrachtet und nimmt in ihrer Intensität durch verschiedene Wärmetransportprozesse im porösen Medium kontinuierlich ab. Die im klassischen Heizfall mit einer Grundwasserwärmepumpe entstehende Kältefahne erreicht demnach bei einer hydraulisch sinnvollen Anordnung der Brunnen nicht den im Zustrom gelegenen Förderbrunnen. Um ein

thermisches Recycling zwischen den Brunnen zu vermeiden, wird bereits der hydraulische Kurzschluss in der Methode ausgeschlossen. Das bedeutet, dass auch bei der maximalen Entnahme und Wiedereinleitung kein Wasser vom Schluckbrunnen zum Förderbrunnen fließen kann. Durch Speichereffekte im Grundwasserleiter bildet sich der thermische Kurzschluss erst nach dem hydraulischen Kurzschluss aus, wodurch wiederum eine konservative Annahme getroffen wurde. Das Vermeiden einer negativen thermischen Beeinflussung anderer Grundwasserwärmepumpen durch die Kältefahne im Abstrom wird anschließend in der räumlichen Potenzialanalyse berücksichtigt (siehe Kapitel II.1.2).

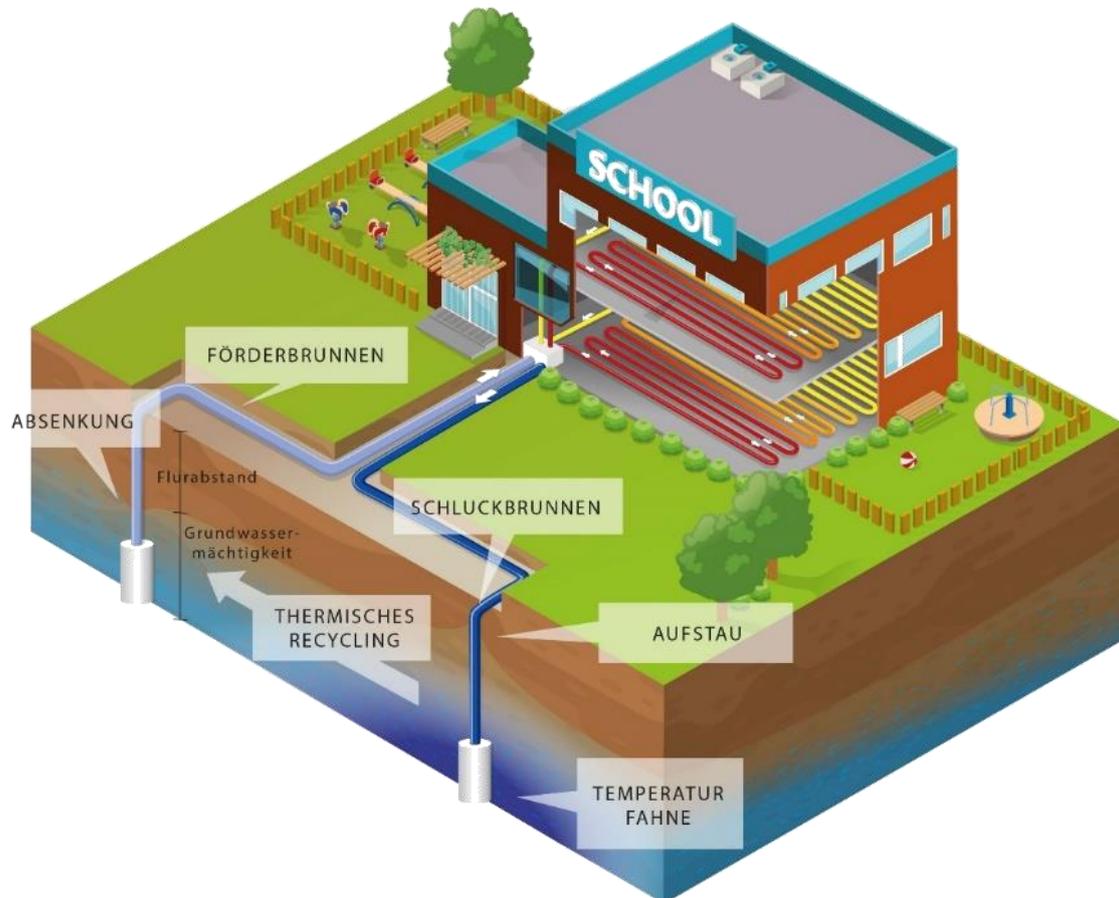


Abbildung 8: Der typische Aufbau einer Grundwasserwärmepumpe mit einem Förder- und einem Schluckbrunnen mit den jeweils relevanten Prozessen, die das technische Potenzial begrenzen.

Zusätzlich zu den drei anlagenspezifischen Beschränkungen gehen auch bautechnische Aspekte der Brunnenpositionierung in die Bestimmung des technisch umsetzbaren Potenzials ein. Hier werden insbesondere die vorgeschriebenen Abstandsflächen von 3 m zu Gebäuden und zur Flurstücksgrenze berücksichtigt. Zudem wird ein Mindestabstand des Brunnenpaares von 10 m vorgeschrieben, was ebenfalls dem üblichen Richtwert in der Genehmigungspraxis entspricht. Eine detaillierte Spartenabfrage zur schlussendlichen Feststellung einer Bohrfreigabe wird durch die Analyse nicht bereitgestellt. Diese muss im Zuge der Bohrgenehmigung stets mit dem zum Bohrtermin aktuellen Spartenbestand durchgeführt werden. Zu beachten ist auch, dass die Zufahrtsmöglichkeit großer Bohrgeräte nicht in der Methodik berücksichtigt wird. Wie bereits oben erwähnt werden in der Weißflächenkartierung Bereiche, die eine Nutzung rechtlich und/oder ökologisch ausschließen (Wasserschutz-, Naturschutzgebiete, Risikogebiete, etc.) in der Potenzialanalyse ausgeschlossen. Dabei ist zu beachten, dass im Falle einer Änderung der Genehmigungspraxis oder einer Festsetzung neuer Ausschlussgebiete, diese Änderungen auch in der Methodik der Potenzialanalyse angepasst werden müssen und die durchgeführte Analyse diesbezüglich Ungenauigkeiten aufweisen kann.

Ökonomische Aspekte sind, wie oben beschrieben, nur untergeordnet nicht in der Methode integriert. Insbesondere ein durch die aktuelle Energiekrise sehr volatiler Markt, als auch eine erfreuliche Dynamik

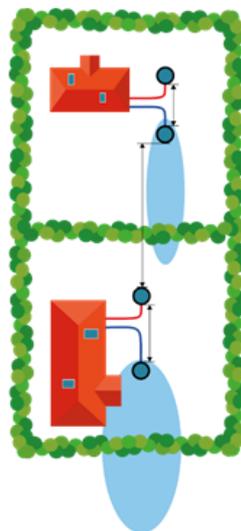
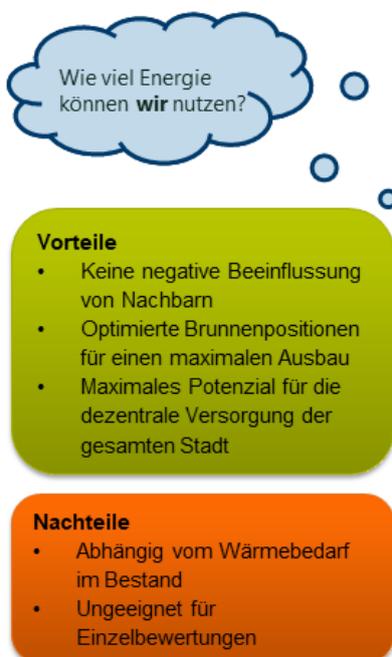
in der Förderkulisse würden dazu beitragen, dass die Potenzialergebnisse nur kurzzeitig belastbar wären. In der Praxis ist die Umsetzung einer thermischen Grundwassernutzung oft abhängig von der Motivation der Akteure. Jedoch gibt es Gegebenheiten, welche die Wirtschaftlichkeit kleiner Grundwasserwärmepumpen stark limitieren können. Diese sind zum Beispiel hohe Flurabstände, die den Primärenergieaufwand für die Förderung des Grundwassers und so die Arbeit des Gesamtsystems stark erhöhen und damit die Effizienz senken (siehe Kapitel II.3). Derartige Restriktionen sind integriert worden und müssen bei der technischen Auslegung einer Anlage berücksichtigt werden (siehe Kapitel II.3). Auch eine genauere Analyse der gesellschaftlich akzeptierten Potenziale wurde nicht durchgeführt.

II.1.2 Definition des räumlichen Potenzials

Wie in Kapitel II.1 einführend erwähnt, wird zusätzlich zum technisch umsetzbaren Potenzial das räumlich-technische Potenzial der thermischen Grundwassernutzung bestimmt. Im Gegensatz zum technisch umsetzbaren Potenzial, das ein „egoistisches“ maximales Potenzial ohne Berücksichtigung möglicher Nachbarnutzungen darstellt, beschreibt das räumliche Potenzial den maximalen Ausbau der thermischen Grundwassernutzung in einem bestimmten Gebiet (siehe Abbildung 9). Hierbei wird die Temperaturanomalie, die sich vom Schluckbrunnen jeder Anlage im Grundwasserleiter ausbreitet, als thermischer Fußabdruck berücksichtigt.

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

Räumliches Potenzial



Technisch umsetzbares Potenzial

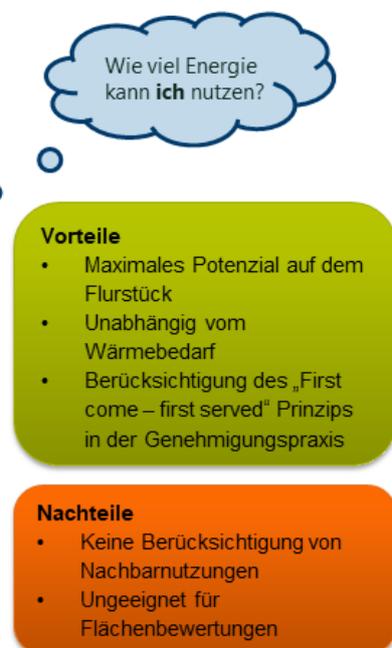


Abbildung 9: Vor- und Nachteile bei der Interpretation der verschiedenen Potenzialevaluationen.

Aufgrund des thermischen Fußabdrucks von Grundwasserwärmepumpen entsteht ein Flächenverbrauch, der die räumliche Verbreitung von Anlagen beschränkt. Um die Frage zu beantworten, wie viele Grundwasserwärmepumpen in einem Gebiet maximal gebaut werden können,

müssen die Brunnen räumlich optimal angeordnet werden, ohne dass sich die Anlagen thermisch negativ beeinflussen. Durch die räumliche Optimierung der Brunnenpositionen wird folglich ein maximales Ausbauszenario in der Fläche ermittelt, das als hypothetische Obergrenze für die Wärmeplanung herangezogen werden kann. Faktisch ist das realisierbare räumliche Potenzial also weiter reduziert, weil die einzelnen Investoren und Nutzer von Grundwasserwärmepumpen nur bedingt räumlich optimiert vorgehen werden. Es gibt verschiedene Anwendungsmöglichkeiten dieser Potenzialevaluation in der Dekarbonisierung der dezentralen Wärmeversorgung. Beispielsweise kann die Auswirkung auf das Stromnetz in stadtweisen Szenarien analysiert werden, da ein gewisser Anteil an Gebäuden mit alternativen Lösungen, wie z.B. weniger effizienten und stromintensiveren Luftwärmepumpen, versorgt werden muss. Für die Multi-Agenten Simulation im Modell München wird das räumliche Potenzial zur Abschätzung des maximalen Ausbaus in der Fläche integriert, um zudem die nachhaltige thermische Bewirtschaftung der Ressource Grundwasser sicherzustellen. Im Folgenden Kapitel wird nun näher auf die Methoden eingegangen, durch die die in der Definition der Potenziale festgesetzten Beschränkungen in der Analyse integriert werden.

II.2 Methodik zur Bestimmung des technisch umsetzbaren Potenzials

Die verwendete Berechnung des Potentials für thermische Grundwassernutzungen basiert auf der am Lehrstuhl für Hydrogeologie der Technischen Universität München im Rahmen des EU-Interreg Projektes GRETA von Böttcher et al. (2019) entwickelten TAP-Methode (**T**hermal **A**quifer **P**otential). Diese integriert die in Kapitel II.1.1 beschriebenen Rahmenbedingungen und wird im Folgenden verkürzt beschrieben.

In einem ersten Schritt werden die Aspekte des rechtlichen Rahmens geprüft, die einen Ausschluss von zusammenhängenden Gebieten betreffen. Dies sind insbesondere Einschränkungen durch Natur- und Wasserschutzgebiete, in denen eine thermische Nutzung des Grundwassers grundsätzlich nicht genehmigungsfähig ist. In der vorliegenden Analyse ist dies in der Weißflächenkartierung integriert. Anschließend werden die drei maßgeblichen technischen Beschränkungen aus der Genehmigungspraxis anhand der bayerischen Bestimmungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie (VDI 4640, BayWG und WHG) in der Potenzialanalyse berechnet (siehe Kapitel II.1.1).

In der TAP-Methode wurden die Zusammenhänge zwischen den oben definierten Beschränkungen und den hydrogeologischen bzw. betriebstechnischen Parametern in numerischen Modellen untersucht. Hierfür wurden idealisierte Box-Modelle aufgebaut, in denen die signifikanten Parameter entsprechend isotrop und konstant variiert werden konnten, um ihren Einfluss auf den Volumenstrom im Brunnenpaar simulieren zu können. Das Schema des hydraulischen 2D Box-Modells ist in Abbildung 10a zu sehen. Im Zentrum des Modells befindet sich das Brunnenpaar mit Förderbrunnen (Out) und Schluckbrunnen (In), deren Quellen- bzw. Senkenterm in der stationären Simulation für den Bilanzausgleich jeweils mit dem identischen Volumenstrom belegt worden ist. Zwei gegenüberliegende hydraulische Randbedingungen sind mittels Festpotenzialen (Dirichlet) so gewählt worden, dass sich ein gleichbleibender hydraulischer Gradient ausbildet. Die verbleibenden zwei Modellränder sind undurchlässig gesetzt worden (Neumann: no flux). Zusätzlich wurde die untere Berandung im quasi-3D Modell entsprechend dem hydraulischen Gradienten geneigt, um eine konstante Grundwassermächtigkeit im Modell zu realisieren.

Tabelle 4: Parametergrenzen und Anzahl der Fälle, die in den Szenarien für München variiert wurden.

Parameter	Einheit	Maximum	Minimum	Fälle
Grundwassererfüllte Mächtigkeit	m	30	1	6
Hydraulische Durchlässigkeit	m/s	$5.8 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	6
Hydraulischer Gradient	-	0.01	0.001	6
Brunnenabstand	m	variabel	10	5

Das Modell wurde zur Erkundung der hydraulischen Zusammenhänge mit den in Tabelle 4 zusammengefassten Parametervariationen simuliert. Die Grenzen wurden speziell an die in der Münchener Schotterebene vorkommenden Extremwerte angepasst. Hierbei wurde nicht, wie bei einer Sensitivitätsanalyse üblich, nur jeweils ein Parameter variiert, sondern es wurden alle sich ergebenden Kombinationen (maximal $6^3 \cdot 5 = 1080$ Fälle) simuliert. In den Modellen wurde stets der in Abbildung 10b gezeigte Grenzzustand kurz vor einem hydraulischen Kurzschluss simuliert. Durch den numerischen

Ansatz konnte das Brunnenpaar ganzheitlich simuliert werden und somit wurde auch die passive hydraulische Beeinflussung zwischen den Brunnen integriert, welche in einer Einzelbetrachtung der Brunnen, wie in analytischen Lösungen üblich, fehlen würde.

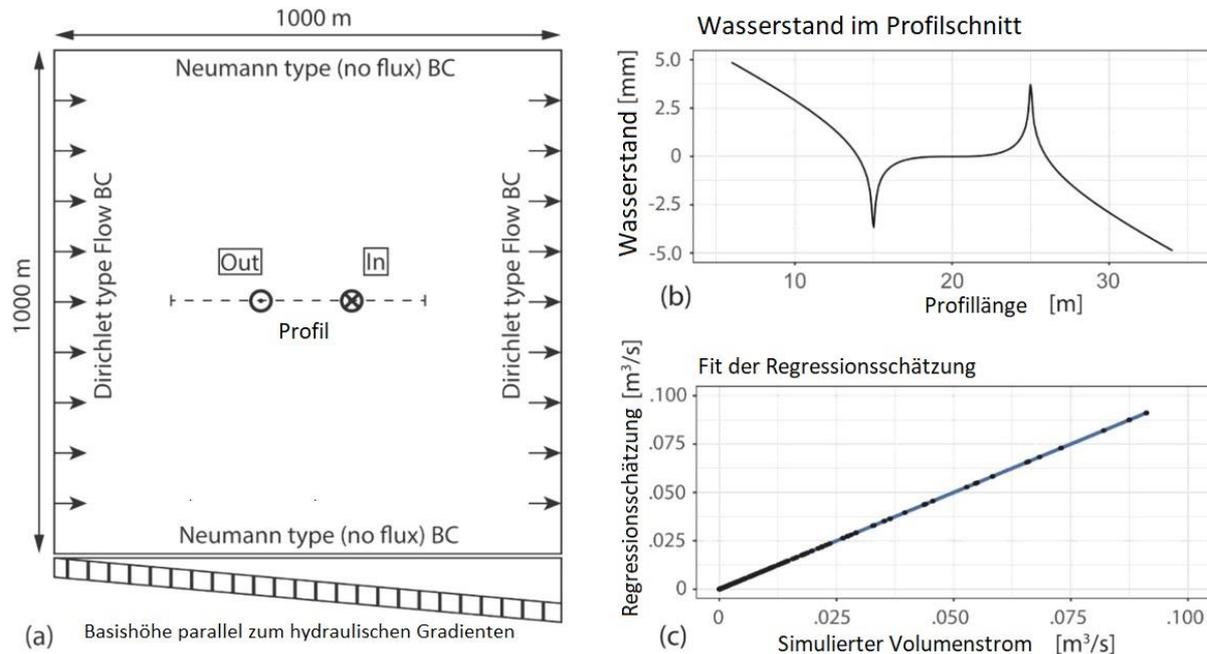


Abbildung 10: a) Aufbau des numerischen Box-Modells mit allen Randbedingungen. b) Seitenansicht des Grundwasserstands im Grenzzustand vor dem hydraulischen Kurzschluss. c) Güte der Regressionsschätzung gegenüber den simulierten Werten am Beispiel des Volumenstroms im Förderbrunnen.

Ziel der TAP-Methode ist es die Vorteile der numerischen Simulation in analytischen Formeln abzubilden, um die Potenzialanalyse auch im großen Maßstab in Geoinformationssystemen durchführen zu können. Dies konnte durch die Verknüpfung der numerischen Parameterstudie mit nicht-linearer multipler Regressionsanalyse realisiert werden. Hierbei wurde die große Anzahl an Ergebnissen aus den Box-Modell Simulationen als Datenbasis für die Schätzung von Regressionsfunktionen verwendet. Abbildung 10c zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und Regressionsergebnissen von Gleichung (1), wobei alle Punkte nahezu ohne Abweichung auf der blauen x=y Linie liegen. Die Regressionsfunktionen sind entsprechend in der Lage die Simulationsergebnisse adäquat nachzubilden. Im Detail wurden die numerischen Modelle mit der Finiten-Elemente Methode in der Software Feflow 7.2 unter folgenden vereinfachenden Annahmen simuliert:

1. Vertikal gemittelte Strömung, ist in 2D, gemäß der „third level model reduction“ nach Diersch berechnet.
2. Ungespannte Strömung und Wärmetransport ist stationär simuliert.
3. Die gesättigte Grundwassermächtigkeit, die hydraulische Durchlässigkeit und der Gradient ist in der gesamten Modell Domäne konstant.
4. Pumpraten sind konstant und in ihren absoluten Werten identisch, während die Brunnen den Grundwasserleiter stets auf der gesamten Länge durchteufen und somit voll ausgebaut sind.

Die Schätzung der Regressionsfunktionen wurde für die drei oben beschriebenen Beschränkungen zur Entnahme, Wiedereinleitung und zum Kurzschluss einzeln vorgenommen. Die entsprechenden Gleichungen zur Quantifizierung der technisch umsetzbaren Entnahmemenge werden in den nächsten drei Abschnitten zusammengefasst.

i) Absenkung im Entnahmebrunnen: Gleichung (1) berechnet die Entnahmerate im Förderbrunnen bei einer maximalen Absenkung von einem Drittel der Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserleiters und der lokal vorherrschenden hydraulischen Leitfähigkeit innerhalb der in Tabelle 4 angegebenen Gültigkeitsbereiche.

$$V_1 = 0,195 k_f M^2 \tag{1}$$

wobei

V_1	$m^3 s^{-1}$	Pumprate für den Absenkungsgrenzwert von $M/3$
k_f	ms^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit

ii) Aufstau im Schluckbrunnen: Die Wiedereinleitung von Grundwasser darf nicht zu einem übermäßigen Anstieg des Grundwasserstands führen, der eine Überflutung der Oberfläche oder Keller zur Folge haben könnte. Der Grundwasserstand darf dabei auf maximal 0,5 m unter der Geländeoberkante steigen (keine Oberflächenüberflutung). Die maximale Injektionsrate wird bestimmt durch die hydraulische Leitfähigkeit, den hydraulischen Gradienten und die Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserleiters innerhalb der in Tabelle 4 angegebenen Gültigkeitsbereiche. Dabei gilt

$$V_2 = (s - 0,5) k_f M^{0,798} e^{(29,9 i)} \quad (2)$$

wobei

V_2	$m^3 s^{-1}$	Einleitrage für die Aufstaugrenze ($s - 0,5$)
k_f	ms^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
s	m	Flurabstand
i	-	hydraulischer Gradient

iii) Hydraulischer Kurzschluss (bzw. Durchbruch): Der Schluckbrunnen, der dem Entnahmebrunnen nachgeschaltet ist, führt das thermisch veränderte Wasser in den Grundwasserleiter zurück. Für eine effiziente Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ist es wesentlich, dass kein thermisch-hydraulischer Durchbruch zwischen Entnahme und Wiedereinleitung vorherrscht, da so ein nachhaltiger und effizienter Betrieb einer thermischen Grundwassernutzung nicht möglich wäre. Die Entnahmerate ist daher begrenzt und abhängig vom Brunnenabstand. Die maximale Fördermenge eines Brunnenpaares ohne hydraulischen Kurzschluss wird zusätzlich durch die Darcy-Geschwindigkeit und die grundwassererfüllte Mächtigkeit bestimmt innerhalb der in Tabelle 4 angegebenen Gültigkeitsbereiche. Dabei gilt

$$V_3 = \frac{\pi}{1,96} v_D M x_w \quad (3)$$

wobei

V_3	$m^3 s^{-1}$	Entnahmerate ohne hydraulischen Kurzschluss
v_D	ms^{-1}	Darcy-Geschwindigkeit
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
x_w	m	Abstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen

Dabei ist die Darcy-Geschwindigkeit des Grundwassers definiert als

$$v_D = k_f i \quad (4)$$

wobei

k_f	ms^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
i	-	hydraulischer Gradient

iv) Abschätzung der technisch umsetzbaren Entnahmerate: Die drei berechneten Volumenströme im Brunnenpaar werden in einem abschließenden Schritt in der technisch umsetzbaren Entnahmerate zusammengeführt. Dabei bestimmt der minimale Volumenstrom als dominanter beschränkender Faktor die technisch umsetzbare Entnahmerate. Dabei gilt:

$$V_{max} = \min(V_1, V_2, V_3) \quad (5)$$

wobei

V_{max}	$m^3 s^{-1}$	Technisch umsetzbare Entnahmerate
V_1	$m^3 s^{-1}$	Pumprate für den Absenkungsgrenzwert von $M/3$
V_2	$m^3 s^{-1}$	Einletrate für die Aufstaugrenze ($s = 0,5$)
V_3	$m^3 s^{-1}$	Entnahmerate ohne hydraulischen Kurzschluss

v) Berechnung der thermischen Entzugsleistung und Heizleistung: Mit der technisch umsetzbaren Entnahmerate wurde anschließend die geogene thermische Leistung innerhalb der rechtlich zulässigen Temperaturspreizung für thermische Grundwassernutzungen, die in Bayern in der Regel 5 K entspricht, berechnet werden. Zusätzlich müssen die absoluten Mindest- und Höchsttemperaturen von 4°C und 20°C berücksichtigt werden. Dabei gilt:

$$P_{th} = V_{max} c_{pw} \rho_w T \quad (6)$$

wobei

P_{th}	W	Thermische Entzugsleistung
V_{max}	$m^3 s^{-1}$	Technisch umsetzbare Entnahmerate
c_{pw}	$J kg^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
ρ_w	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser
T	K	maximale Temperaturspreizung

Nach VDI 4640 Blatt 2 kann mit Gleichung (6) und einer spezifischen Wärmekapazität von 4,187 (Wasser bei konstantem Druck und 10°C) zugleich die Verdampferleistung einer Wasser/Wasser Wärmepumpe abgeschätzt werden. Somit wird zur Berechnung der finalen Heizleistung, die eine Wärmepumpe im Heizkreis bereitstellen kann, lediglich noch eine näherungsweise Schätzung der durchschnittlichen Effizienz getroffen werden. Damit ergibt sich die durchschnittlich Heizleistung aus:

$$P_h = \frac{P_{th}}{1 - \frac{1}{JAZ}} \quad (7)$$

wobei

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

Die Berechnung der Heizleistung ist der finale Schritt, bevor ein Potenzialabgleich mit dem Wärmebedarf der Gebäudeseite vorgenommen werden kann und darauf aufbauend eine Aussage zur Deckung des Bedarfs mittels thermischer Grundwassernutzung vorgenommen werden kann. Der Potenzialabgleich wird in Kapitel II.3 näher beschrieben. Bevor der Potenzialabgleich durchgeführt werden kann, müssen geeignete Brunnenstandorte in einer räumlichen Analyse definiert werden, um die den Brunnenabstand in Gleichung (3) bestimmen zu können. Wie bereits beschrieben, wurde eine Brunnenpositionierung sowohl auf Flurstück-, als auch auf Baublockbasis durchgeführt. Das Vorgehen bei der räumlichen Analyse für Flurstücke wird im folgenden Kapitel beschrieben.

II.2.1 Weißflächenkartierung für Brunnenstandorte

Wie in Kapitel II.1.1 erläutert, werden vor der quantitativen Berechnung des technisch umsetzbaren Potenzials die Ausschlusskriterien, die sich sowohl aus Natur- und Umweltschutz als auch durch bestehende städtische Infrastruktur ergeben, gesammelt und in einer Weißflächenkartierung berücksichtigt. Ungeeignete und nicht genehmigungsfähige Standorte für den Brunnenbau werden somit initial von der quantitativen Analyse ausgenommen. Im Detail wurden die in Tabelle 5 zusammengefassten Kriterien in die Weißflächenkartierung integriert (siehe Kapitel III.2.1).

Tabelle 5: Beschreibung und Bewertung der untersuchten Kriterien zur Weißflächenkartierung.

Kriterium	Beschreibung/Quelle	Bewertung
Trinkwasserschutzgebiete	Wasserschutzgebiet A18 WasserversorgungsVO 225 Wasserschutzgebiet Schleißheim	verboten
Naturschutzgebiete	BeschränkungsVA12a NaturschutzgebieteV A10-13	verboten
Landschaftsschutzgebiete	LandschaftsschutzV 900	Erlaubnis der LHM
Natura 2000 Gebiete	FFH-Richtlinie 92/43/EWG -Richtlinie 2009/147/EG und Richtlinie 2013/17/EU	keine Regelung
Biotope	§ 30 BNatSchG / Art. 23 BayNatSchG § 39 BNatSchG / Art. 16 BayNatSchG	geschützte Flächen ausgenommen
Gewässer	v.a. unterirdische Stadtbäche	verboten
Bodendenkmäler	Art- 7 BayDSchG	Erlaubnis der LHM
Naturdenkmäler	NaturdenkmalV 910	verboten
Überschwemmungsgebiete	ÜberschwemmungsgebietsV Würm370	keine Regelung
Bäume	BaumschutzV 901	verboten
U-Bahntunnel	Geodatenpool LHM	verboten
S-Bahntunnel	Geodatenpool LHM	verboten
Straßentunnel	Geodatenpool LHM	verboten
Tiefgaragen	Geodatenpool LHM	verboten
Unterirdische Gebäude	Geodatenpool LHM	verboten
Fernwärmeleitungen	Datenexport SWM	verboten
Unterführungen und Sonstige	Geodatenpool LHM	verboten
Gasleitungen	Datenexport SWM	verboten
Telekommunikationsnetz	Spartenabfrage	verboten
Unterirdische Stromleitungen	Spartenabfrage	verboten

Die Bewertung hinsichtlich einer Bohrungbeschränkung oder einer Beschränkung der wasserrechtlichen Erlaubnis wurde gemäß der Bundes- und Landesgesetzgebung, sowie der städtischen Satzungen und Verordnungen durchgeführt¹. Im Detail wurden die Ausschlussflächen aus Tabelle 5 gemäß ihrer Bewertung unterschiedlich in der Weißflächenkartierung implementiert. In Trinkwasserschutzgebieten ist es generell verboten, Anlagen zur Versickerung oder Versenkung von Abwasser (einschließlich Kühlwasser und Wasser aus Wärmepumpen) zu errichten oder zu erweitern², weshalb Trinkwasserschutzgebiete vollständig ausgenommen wurden.

In Naturschutzgebieten ist es insbesondere verboten, bauliche Anlagen im Sinne der Bayerischen Bauordnung zu errichten, Grabungen oder Bohrungen vorzunehmen, die Bodengestalt in sonstiger Weise zu verändern und Leitungen zu errichten oder zu verlegen und unterirdisch Wasser zu entnehmen, den Grundwasserstand oder den Zu- oder Ablauf des Wassers zu verändern, weshalb Naturschutzgebiete ebenfalls vollständig ausgenommen wurden³.

In Landschaftsschutzgebieten ist es verboten, Veränderungen vorzunehmen, die geeignet sind, die Natur zu schädigen, den Naturgenuss zu beeinträchtigen oder das Landschaftsbild zu verunstalten. Dementsprechend bedürfen thermische Grundwassernutzungen der vorgängigen Erlaubnis der Landeshauptstadt München - Untere Naturschutzbehörde⁴. Da in den dünn besiedelten Landschaftsschutzgebieten der Stadt vereinzelt thermische Nutzungen existieren, wird davon ausgegangen, dass in der Genehmigungspraxis eine Erlaubnis, ggf. unter Auflagen, erteilt wird. Aus diesem Grund sind Landschaftsschutzgebiete nicht als Ausschlussfläche klassifiziert worden.

Beschränkungen in Natura2000 Gebieten sind in der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie der Europäischen Union (FFH-Richtlinie) geregelt und beschränken die thermische Grundwassernutzung nicht⁵. Natura2000 Gebiete sind daher ebenfalls nicht als Ausschlussfläche klassifiziert.

¹ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift>

² <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/A18.html>

³ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/A11.html>

⁴ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/900.html>

⁵ https://www.lfu.bayern.de/natur/natura_2000/index.htm

Biotope werden durch die Stadtbiotopkartierung des Landesamts für Umwelt (LfU) landesweit auf Grundlage des Art. 46 BayNatSchG kartiert. Die Biotopkartierung dokumentiert naturschutzfachlich wertvolle Flächen. Sie ist keine Ausweisung von Schutzgebieten, umfasst aber auch Flächen, die – unabhängig von der Kartierung – einem unmittelbaren gesetzlichen Schutz unterliegen. Auf ökologisch hochwertig ausgeprägten Flächen können rechtliche Einschränkungen wegen des gesetzlichen Biotopschutzes bestehen, der bestimmte Biotoptypen unter besonderen Schutz stellt. Rechtsgrundlagen sind § 30 BNatSchG mit Art. 23 BayNatSchG und § 39 BNatSchG mit Art. 16 BayNatSchG⁶. Im Datensatz des LfU sind für jede Biotopfläche die prozentualen Anteile der unter (potenziell) Schutz gestellten Flächen vermerkt. Daher wurden in der Methodik Flächen ausgenommen, bei denen der prozentuale Flächenanteil über 20% gemäß § 30 BNatSchG / Art. 23 BayNatSchG lag und ein Hinweis bestand, ob geschützte Flächenanteile nach § 39 BNatSchG / Art. 16 BayNatSchG vorhanden sind. Die übrigen Biotopflächen würden nicht als Ausschlussfläche klassifiziert.

Zusätzlich wurde der stadtinterne Gewässerdatensatz verwendet, da in München vollständig überbaute Stadtbäche verlaufen, die in üblichen Gewässerdatensätzen nicht vermerkt sind. Gewässerflächen wurden zusätzlich mit einer 3 m Abstandsfläche als Puffer versehen und entsprechen als Ausschlussfläche klassifiziert.

Art. 7 BayDSchG (1) besagt, dass Erdarbeiten auf einem Grundstück auf dem sich Bodendenkmäler befinden einer Erlaubnis bedürfen. Zum einen kann die Erlaubnis versagt werden, soweit dies zum Schutz eines Bodendenkmals erforderlich ist, zum anderen sind an eine Erlaubnis meist Auflagen geknüpft, die Erdarbeiten oft signifikant verteuern. Da Bohrungen nur eine kleinräumige Störung des Erdkörpers hervorrufen, werden Bohrungen auf Bodendenkmälern in der Praxis im Regelfall genehmigt. Aus diesem Grund sind Bodendenkmäler nicht als Ausschlussfläche klassifiziert worden.

Naturdenkmäler umfassen den besonders schützenswerten Baumbestand der Stadt und sind als Punkte stadtwweit kartiert. Sie wurden mit einem Puffer von 10 m Radius ebenfalls als Ausschlussfläche klassifiziert⁷.

In Überschwemmungsgebieten werden üblicherweise keine Anlagen zur thermischen Nutzung genehmigt⁸. Überschwemmungsgebiete sind stadtwweit sehr detailliert kartiert, weshalb kleinere Freiflächen (< 1000 m²) innerhalb von Überschwemmungsgebieten auch den Ausschlussflächen zugeschlagen wurden.



Abbildung 11: KI-basierte Baumerkennung mit Kronendurchmesser zur Berücksichtigung der Baumschutzverordnung des InnovationLab.

⁶ <https://www.lfu.bayern.de/natur/biotopkartierung/>

⁷ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/910.html>

⁸ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/370.html>

Abschließend ist für die naturschutzbezogenen Kriterien noch die Berücksichtigung des Baumbestands bewerkstelligt worden, der mutmaßlich unter die Baumschutzverordnung fällt⁹. Hierfür wurde eine Baumkartierung des InnovationLab des IT-Referates eingebunden, die mittels Objekterkennung durch deep learning ca. 1.6 Mio. Bäume umfasst (siehe Abbildung 11).

Neben den naturschutzbezogenen Kriterien sind auch bauliche Kriterien in der Weißflächenkartierung berücksichtigt worden, die die unterirdische Infrastruktur und den Tiefbau stadtweit umfassen. Hierbei sind die U-Bahn-Tunnel, inklusive der Ausbauprojekte der U9 und U5, mit einer zusätzlichen Abstandsfläche von 20 m als Ausschlussfläche klassifiziert worden. Das identische Vorgehen wurde für den S-Bahn-Tunnel der Stammstrecke und der 2. Stammstrecke angewendet. Für Straßentunnel, Unterführungen, Bohrpfahl- oder Stützwände und Unterbauungen wurde eine zusätzliche Abstandsfläche von 10 m verwendet. Tiefgaragen und unterirdische Gebäudeteile wurden mit den für die generelle Bebauung üblichen Abständen von 3 m beaufschlagt und Leitungstrassen der Fernwärme und Fernkälte sind mit 5 m Abstandsfläche versehen. Das gleiche gilt für Gasleitungen, Telekommunikationssparten und unterirdische Stromleitungen, welche durch die SWM bearbeitet und durch das RKU in die Weißflächenkartierung integriert wurden (siehe Kapitel III.2.1).

II.2.2 Bestimmung des flurstückscharfen Potenzials

Als Basis der Potenzialanalyse für die thermische Grundwassernutzung werden die räumlichen hydrogeologischen Grundlagendaten aus Vorgängerprojekten genutzt (siehe Kapitel I.4). Hierzu werden zur Berechnung des quantitativen Potenzials Flurabstand, grundwassererfüllte Mächtigkeit, -fließrichtung und -gefälle sowie die hydraulische Durchlässigkeit des quartären Grundwasserleiters verwendet. Hierfür wird je Flurstück der Median aller Eingangsparameter bestimmt und die Funktionen aus Kapitel II.2 verwendet, um das technisch umsetzbare Potenzial flurstücksweise zu berechnen. Hierbei können die Entnahmerate und die Einleitrates direkt aus den aggregierten hydrogeologischen Daten mit Gleichung (1) und (2) abgeleitet werden. Zur Berechnung von Gleichung (3) wird zusätzlich der Brunnenabstand benötigt, der auf dem Flurstück realisierbar ist.

⁹ <https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/901.html>

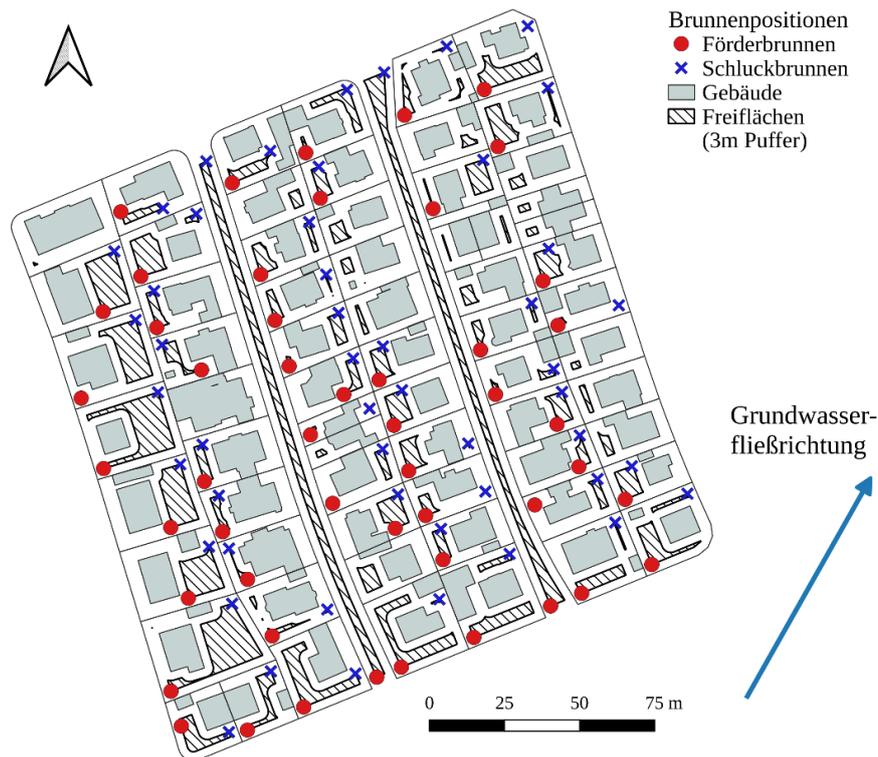


Abbildung 12: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Flurstücken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden und zur Flurstücksgrenze.

Zur Berechnung des maximal möglichen Abstands zwischen Förder- und Schluckbrunnen wird sowohl die Grundwasserfließrichtung zur Ausrichtung der Brunnen als auch das Einhalten von Abstandsflächen berücksichtigt. Zur Ausweisung von geeigneten Freiflächen für den Brunnenbau wird zunächst der in Bayern vorgeschriebene Mindestabstand von 3 m zu bestehenden Gebäuden und zur Grundstücksgrenze berücksichtigt (siehe Abbildung 12). Die übriggebliebenen Freiflächen werden anschließend genutzt, um den Förderbrunnen an dem am weitesten im Zustrom liegenden Punkt und den Schluckbrunnen an den am weitesten im Abstrom gelegenen Punkt zu setzen. Wenn der sich daraus ergebende Brunnenabstand unter 10 m liegt, wird das Brunnenpaar nicht weiter berücksichtigt. Es stehen nun alle Werte zur Berechnung von Gleichung (3) zur Verfügung und es können abschließend auch die technisch umsetzbare Entnahmerate und die thermischen Leistungen für jedes Flurstück berechnet werden.

II.2.3 Bestimmung des baublockscharfen Potenzials

Analog zum Flurstückansatz werden für das baublockscharfe Potenzial die hydrogeologischen Parameter im Median für jeden Baublock bestimmt und anschließend die Funktionen aus Kapitel II.2 verwendet, um das technisch umsetzbare Potenzial zu berechnen. Für die Positionierung der Brunnen wird ebenfalls, die im Baublock zur Verfügung stehende Freifläche kartiert. Im Unterschied zum Flurstückansatz wird hier nur der 3 m Mindestabstand zu Gebäuden berücksichtigt. Die Entscheidung keinen Abstand zu Baublockgrenzen einzubeziehen erfolgte in Abstimmung mit den SWM, da sie als kommunaler Energieversorger auch auf öffentlichem Grund bzw. auf den Verkehrsflächen die Erlaubnis haben Brunnen zu bohren. Das Potenzial auf Baublöcken wird zur Machbarkeitsbewertung von Verbundlösungen, wie kalten Nahwärmenetzen, herangezogen und deren Betrieb erfolgt typischerweise durch einen Energieversorger. Es kann also davon ausgegangen werden, dass bei der Brunnenplanung auch Verkehrsflächen zur Verfügung stehen.

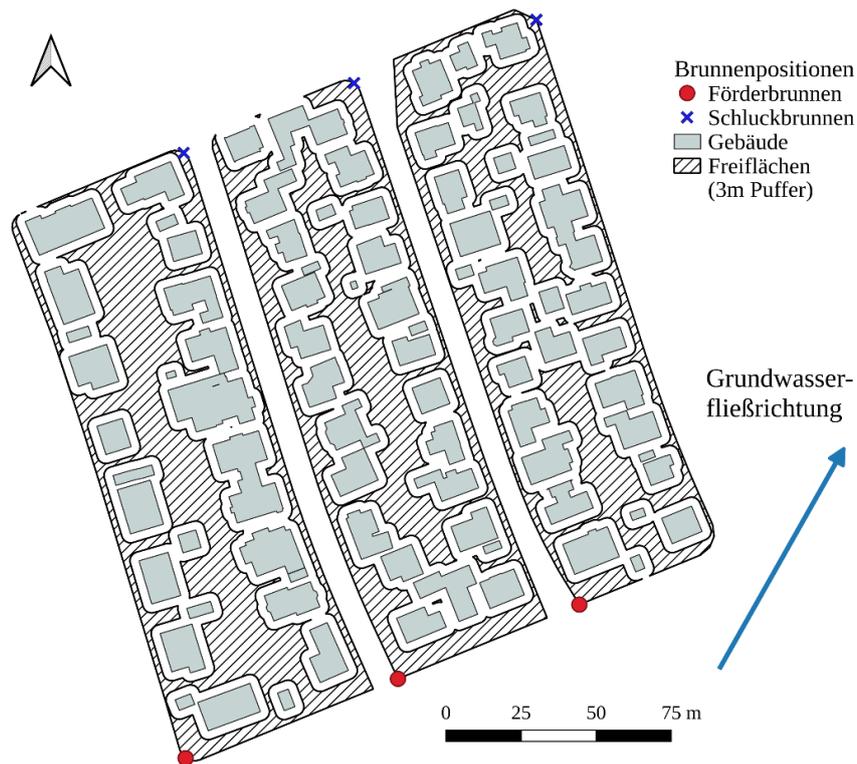


Abbildung 13: Beispielhafte Anordnung von Förder- und Schluckbrunnen auf Baublöcken unter Berücksichtigung der Grundwasserfließrichtung und des 3 m Mindestabstands zu Gebäuden.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft eine Verteilung der Brunnen auf drei Baublöcken mit den möglichen Freiflächen nach Abzug des 3 m Mindestabstands von Gebäuden. Da die Brunnen hier generell weiter entfernt voneinander stehen können als beim Flurstücksansatz, wird der hydraulische Kurzschluss immer weniger zum beschränkenden Faktor für die technisch umsetzbare Entnahmemenge. Es werden häufiger Grenzzustände erreicht, bei denen die maximale Absenkung oder der maximale Aufstau maßgeblich für die umsetzbare Entnahmerate sind. Nach der Berechnung der Potenziale aus den zwei Aggregierungsebenen, i.e. Flurstück und Baublock, erfolgt nun im nächsten Schritt der Abgleich mit dem gebäudeseitigen Wärmebedarf.

II.3 Methodik des Abgleichs von Potenzial und Wärmebedarf

Für die Multi-Agenten Simulation im Modell München ist zur Abschätzung der initialen Machbarkeit einer thermischen Grundwassernutzung ein Abgleich des Potenzials mit dem Wärmebedarf des Gebäudes notwendig. Um die mögliche Deckung des Wärmebedarfs durch das lokal verfügbare Potenzial zu prüfen, ist im Detail ein Abgleich der technisch möglichen Heizleistung mit dem Bedarf an Heizleistung auf dem jeweiligen Flurstück oder Baublock nötig. Die technisch mögliche Heizleistung wird, wie in Kapitel II.2 beschrieben, mit Gleichung (7) berechnet. Hierfür wird für Grundwasserwärmepumpen eine mittlere Jahresarbeitszahl von 4 als konstant angenommen. Speziell für die thermische Grundwassernutzung ist im Gegensatz zu anderen oberflächennahen geothermischen Entzugssystemen nicht die Jahresenergiemenge der entscheidende Faktor, sondern die Leistung. Da während der Entnahme und Wiedereinleitung in einem Brunnenpaar selbst am maximalen Betriebspunkt kein thermischer Kurzschluss entsteht, ist ein kontinuierlicher Dauerbetrieb durch eine konservative Auslegung der Methode sichergestellt (siehe Kapitel II.2). Folglich ist nicht die Dauer des Betriebs, i.e. Entzugsenergie, sondern die Intensität, i.e. maximale Entzugsleistung, maßgebend.

Auf der Gebäudeseite wird die zu installierende Heizleistung für eine Vollversorgung aus dem Modell München geliefert und von e-think Energy Research, dem Partner der SWM für die Gebäudesimulation, berechnet. Die Methodik der Heizleistungsberechnung ist daher nicht Bestandteil dieses Berichts. Der Abgleich des Potenzials mit dem Wärmebedarf erfolgt anschließend gebäudescharf. Das bedeutet, dass für jedes beheizte Gebäude der Wärmebedarf mit dem zur Verfügung stehenden Potenzial

abgeglichen wird. Wenn mehrere beheizte Gebäude auf der zu untersuchenden Fläche stehen, dann werden sie entsprechend ihres Bedarfs in absteigender Reihenfolge geprüft. Dabei wird als konservative Annahme immer von einem monovalenten Betrieb der Wärmepumpe und einer vollständigen Deckung des Wärmebedarfs im Gebäude ausgegangen. Falls der Bedarf eines Gebäudes gedeckt werden kann, wird es versorgt und das nächstkleinere Gebäude geprüft. Die Versorgung von Gebäuden wird so lange kumuliert, bis das Potenzial erschöpft ist, oder alle Gebäude versorgt werden. Falls das nächstkleinere Gebäude nicht versorgt werden kann, aber noch weitere Gebäude auf der Fläche stehen wird die Prüfung fortgesetzt und somit ein „Auffüllen“ des restlichen Potenzials sichergestellt. Das Ergebnis des Potenzialabgleichs ist eine Identifikation der versorgbaren Gebäude und eine Angabe der möglichen Bedarfsdeckung auf Flurstücken und Baublöcken. Hierbei ist insbesondere die kumulierte installierte Heizleistung auf den Flächen von Bedeutung, da sie zur Optimierung des räumlichen Potenzials herangezogen wird. Die Methodik der Optimierung wird im folgenden Kapitel im Detail erläutert.

Zusätzlich zur Prüfung, ob der Bedarf durch das verfügbare Potenzial auf einem Flurstück gedeckt werden kann, wird in einem zweiten Schritt die Wirtschaftlichkeit des Brunnenbaus berücksichtigt. Bei Grundwasserwärmepumpen sind die Investitionskosten stark vom z.T. aufwändigen Brunnenbau abhängig. Je nach Tiefe des Grundwasserstands (Flurabstand) können die Brunnenbaukosten für eine Anlage örtlich stark variieren, wohingegen z.B. Kosten für Baustelleneinrichtung, Brunnenpumpe, Genehmigung, usw. bei gleicher Anlagengröße eher wenig schwankende Fixkosten sind. Wie in Abbildung 2d zu sehen ist, schwankt der Flurabstand, in München meist zwischen 0 und 20 m, wobei in Extremfällen auch Flurabstände von bis zu 40 m am südlichen Rand des Stadtgebiets auftreten. Die Installation einer Grundwasserwärmepumpe wird im Münchener Süden daher aufgrund des Brunnenbaus tendenziell teurer sein als im Münchener Norden.

Neben diesem generellen Einfluss kann es durch hohe Flurabstände besonders bei kleinen Anlagen dazu kommen, dass die Brunnenbaukosten die Kosten der Wärmepumpe um ein Vielfaches übersteigen würden. In der Praxis sind derartig hohe Kosten für die Erschließung der Wärmequelle unwirtschaftlich, weshalb eine Begrenzung der maximalen Endteufe (Ausbautiefe) des Brunnenpaares abhängig von der Heizleistung einer Grundwasserwärmepumpe eingeführt wurde. Je größer die Wärmepumpe, umso tiefer können Brunnen ausgebaut werden. Zur Ermittlung aktueller Kosten für 2023 wurde eine Expertenbefragung von Bohrunternehmen, Geobüros und Wärmepumpenherstellern durchgeführt. Aus den üblichen Leistungen zur Installation einer Grundwasserwärmepumpe wurden anschließend die variablen Positionen des Brunnenbaus, wie Laufmeter Bohrung und Brunnenbau inkl. Steig- und Fallleitung, ausgewertet, um eine Kostenfunktion anzupassen. Für die Kosten der Wasser/Wasser Wärmepumpe wurde ebenfalls eine Funktion angepasst. Mit der Division von variablen Brunnenbaukosten durch Wärmepumpenkosten erhält man einen Faktor, mit dem man die Wirtschaftlichkeit der Wärmequellenerschließung in Abhängigkeit von Heizleistung und Brunnentiefe bewerten kann. Die Funktion zur Berechnung des Kostenverhältnisses lautet

$$C_{limit} = \frac{5,6 z + 6,9 (2,25 p_{hp})^{0,47}}{15 p_{hp}^{0,7}} \quad (8)$$

wobei

C_{limit}	-	Verhältnis der variablen Investitionskosten des Brunnenbaus zu den Kosten des Wärmepumpenaggregats
p_{hp}	kW	Heizleistung der Wärmepumpe
z	m	Endteufe des Brunnenpaares (Förder- und Schluckbrunnen)

In der vorliegenden Studie wurde die Grenze des Kostenfaktors (C_{limit}) in Gleichung (8) auf **2** festgelegt. Dieser Wert wurde empirisch in Absprache mit Bohrunternehmen festgelegt. Da Kosten für Wärmepumpen und Brunneninstallationen marktbedingt starken Schwankungen unterliegen, wurde der Grenzwert eher konservativ gewählt, um eine Überschätzung des vorhandenen Potenzials zu vermeiden. Bei veränderter Marktlage sollte die Kostenfunktion daher angepasst werden. Die ist im Rahmen der rollierenden Wärmeplanung am RKU geplant und stellt eine Fortschreibung der Analyse sicher. Zusätzlich ist zu beachten, dass es sich bei der in Gleichung (8) gegebenen Funktion lediglich

um ein Verhältnis handelt. Es können folglich keine absoluten Kosten etwa für Wärmepumpen oder Brunnenbau berechnet werden.

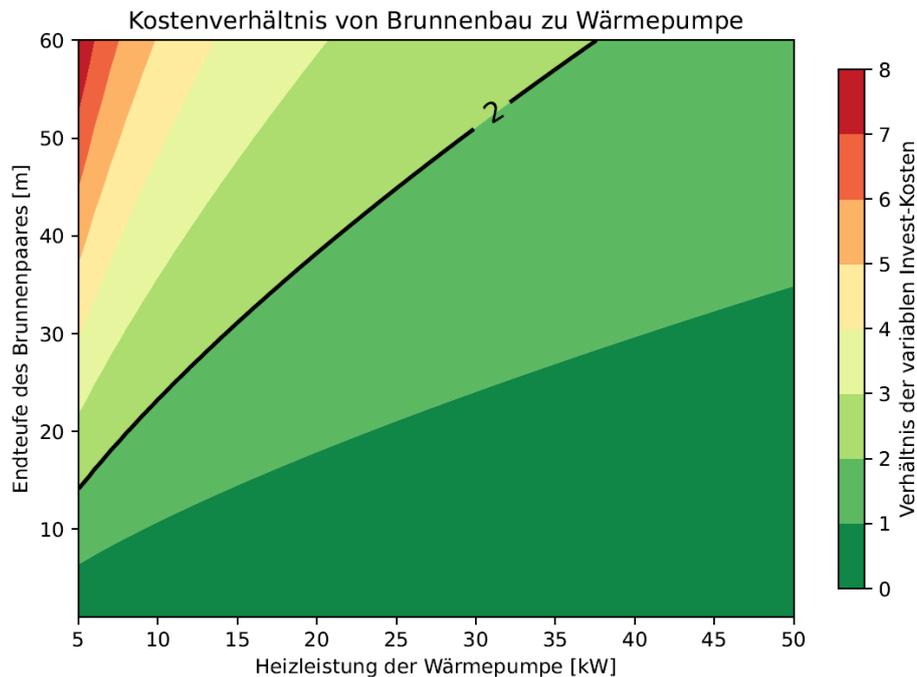


Abbildung 14: Entwicklung des Verhältnisses der variablen Brunnenbaukosten, in Abhängigkeit der Endteufe des Brunnenpaares zu den Kosten der Wärmepumpe in Abhängigkeit der installierten Heizleistung mit dem definierten wirtschaftlichen Limit von 2 (schwarze Konturlinie = Brunnenbau doppelt so teuer, wie die Wärmepumpe).

In Abbildung 14 wird die Berechnung des Kostenfaktors (c_{limit}) durch Gleichung (8) für definierte Wertebereiche von Brunnentiefe (Endteufe) und Heizleistung der Wärmepumpe graphisch dargestellt. Im Vergleich mit dem Flurabstand im Stadtgebiet wird ersichtlich, dass die Wirtschaftlichkeitsgrenze von 2 (schwarze Linie) lediglich kleine Anlagen in wenigen, räumlich sehr begrenzten Gebieten des Münchener Südens betreffen wird (siehe Abbildung 2d). Durch den Wegfall der Individuallösung einer dezentralen Grundwasserwärmepumpe sollte in diesen Gebieten bei ausreichend Potenzial folglich eine Verbundlösung durch ein grundwasserversorgtes Nahwärmenetz in Betracht gezogen werden, um das Grundwasser auf eine wirtschaftlichere Art zu erschließen. Im Folgenden Kapitel wird nun die Methodik der räumlichen Optimierung im Detail erläutert, die einen stadtweiten Ausbau von Grundwasserwärmepumpen ohne negative thermische Beeinflussung der Anlagen untereinander untersucht.

II.4 Methodik zur räumlichen Optimierung in der Modellkopplung

Wie in Kapitel II.1.2 eingangs beschrieben, wird das räumliche Potenzial zur Bewertung der Umsetzbarkeit von thermischen Grundwassernutzungen in der Fläche benötigt. Hierfür wird eine Optimierungsmethode verwendet, die im Geo.KW Projekt entwickelt und angewendet wurde (siehe Kapitel I.2.1). Eine detaillierte Beschreibung der Methode wird in Halilovic et al., (2023) gegeben, weshalb die wichtigsten Punkte hier zusammengefasst dargestellt werden. Das zentrale Element in der Optimierung ist die Temperaturfeldberechnung mittels räumlicher und zeitlicher Superposition, die im folgenden Abschnitt erläutert wird. Darauf aufbauend wird die Optimierung des räumlichen Ausbaus beschrieben.

II.4.1 Analytische Temperaturfeldberechnung

Zur analytischen Berechnung des Temperaturfelds wird das Linear Advective Heat Model (LAHM) verwendet. Diese Art der Temperaturfeldberechnung hat sich in der Genehmigungspraxis zur Bewertung von thermischen Nutzungen bewährt und ist insbesondere für die hydrogeologischen

Bedingungen in der Münchener Schotterebene mit hohen Fließgeschwindigkeiten geeignet¹⁰. Die LAHM Methode überschätzt die thermische Ausbreitung der Kältefahnen eher und kann daher als konservativ angesehen werden. Das Modell beschreibt den Wärmetransport von einem Schluckbrunnen ausgehend unter der Annahme homogener hydrogeologischer Parameter. LAHM ist definiert als

$$\Delta T(\Delta x, \Delta y, t) = \frac{q \cdot \Delta T_{inj}}{4 \varepsilon B v_a \sqrt{\pi \beta_T}} \exp\left(\frac{\Delta x - r}{2 \beta_L}\right) \frac{1}{\sqrt{r}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r - \frac{v_a t}{R}}{2 \sqrt{\frac{v_a \beta_L t}{R}}}\right) \quad (9)$$

und

$$r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \frac{\beta_L}{\beta_T} \quad (10)$$

wobei

ΔT	K	Änderung der Grundwassertemperatur
$\Delta x, \Delta y$	m	Räumliche Entfernung in x und y Richtung
t	s	Zeit
q	$m^3 s^{-1}$	Einletrate am Schluckbrunnen
T_{inj}	K	Spreizung zwischen natürlicher und eingeleiteter Wassertemperatur
ε	-	Porosität
B	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
v_a	$m s^{-1}$	Abstandsgeschwindigkeit
$\beta_{L/T}$	m	Longitudinale und transversale Dispersivität
r	m	Radialer Abstandsfaktor
R	-	Retardationsfaktor

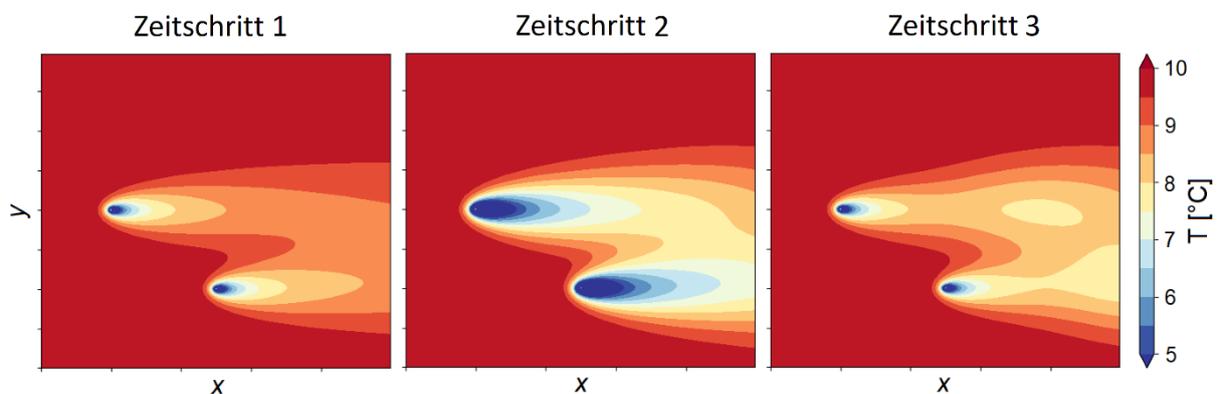


Abbildung 15: Erweiterung des LAHM Modells durch eine kombinierte räumliche und zeitliche Superposition, bei der sich die Temperaturanomalien von zwei Schluckbrunnen über 3 Zeitschritte hinweg im Grundwasserleiter in x-Richtung ausbreiten (nach Halilovic et al. 2023).

In seiner ursprünglichen Definition in Gleichung (9) kann LAHM allerdings nur für einen Schluckbrunnen mit konstanter Einletrate genutzt werden. Darum wurde das Modell durch zwei verschiedene Prinzipien der Superposition erweitert (siehe Abbildung 15). Die räumliche Superposition ermöglicht es, eine Vielzahl an Temperaturanomalien auf einem Temperaturfeld zu berechnen und somit auch den gemeinsamen Einfluss mehrerer Schluckbrunnen abzubilden. Die zeitliche Superposition bietet die Möglichkeit Temperaturanomalien zu berechnen, die sich durch variable Einletraten ausbilden. Somit können die saisonal unterschiedlichen Lasten der thermischen Nutzungen berücksichtigt werden. In

¹⁰ Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Umweltministerium, Baden-Württemberg (2009)

Abbildung 15 ist beispielsweise die Einletrate von Zeitschritt 2 gegenüber den Zeitschritten 1 und 3 verdoppelt worden. In Zeitschritt 3 ist daher stromabwärts die höhere Intensität der Einletrate in Form einer ausgeprägteren Temperaturanomalie noch zu erkennen. Die Temperaturfeldberechnung mit LAHM kann nun im Folgenden für größere Bereiche mit einer Vielzahl an potenziellen Grundwasserwärmepumpen genutzt werden, um mögliche negative thermische Interaktionen zwischen benachbarten Brunnen zu identifizieren und entsprechend auszuschließen. Das Ziel hierbei ist es, die Brunnen in einem Gebiet so anzuordnen, dass neben einem Ausschluss von negativer Interaktion zusätzlich die maximale thermische Leistung installiert wird. Die Lösung für diese Problemstellung ist eine räumliche Optimierung, die im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

II.4.2 Optimierung des räumlichen Ausbaus

Das Optimierungsziel ist die Maximierung des thermischen Potenzials im quartären Grundwasserleiter. Dies wird erreicht, indem die Brunnen von potenziellen Grundwasserwärmepumpen so positioniert werden, dass sie die maximale Energie innerhalb eines definierten Gebiets nutzen können, ohne sich innerhalb der gesetzlichen Bestimmungen negativ zu beeinflussen. Die Positionierung wird während der Optimierung durch die Selektion von vordefinierten Brunnenstandorten bewerkstelligt. Diese potenziellen Standorte, die in der Optimierung zur Auswahl stehen, werden in einem vorangestellten Arbeitsschritt generiert.

Für die Definition potenzieller Brunnenstandorte werden gesetzliche Rahmenbedingungen wie z.B. Natur- und Trinkwasserschutzgebiete und die existierende Gebäudestruktur mit Abstandsflächen in einer Weißflächenkartierung berücksichtigt (siehe Kapitel II.2.1). Wie in Abbildung 16 dargestellt, werden zuerst Freiflächen für den Brunnenbau ausgewiesen, die den Mindestabstand von 3 m zu Gebäuden und zur Grundstücksgrenze einhalten. Anschließend werden die Freiflächen in ihrem Zentroid rechtwinklig zur Grundwasserfließrichtung in Zustrom- und Abstromflächen zerteilt. Abschließend werden an den äußeren Rändern der Teilflächen in einem regelmäßigen Abstand von 5 m zueinander potenzielle Brunnenstandorte generiert. Auf den Zustromflächen entsprechend Förderbrunnen und auf den Abstromflächen Schluckbrunnen. So wird sichergestellt, dass eine hydrogeologisch einwandfreie Auswahl an möglichen Positionen in der Optimierung zur Verfügung steht.

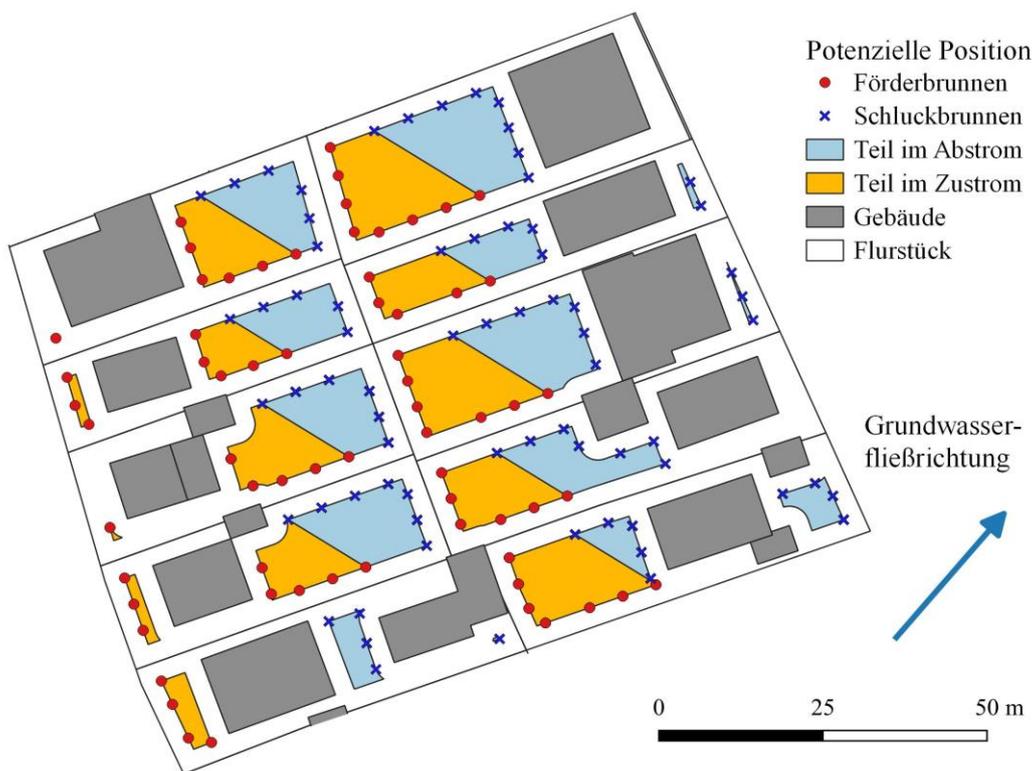


Abbildung 16: Mögliche Brunnenpositionen in der räumlichen Optimierung mit rechtlich vorgegebenen Abstandsflächen.

Im Selektionsprozess wird als vereinfachende Annahme davon ausgegangen, dass in jedem Flurstück nur maximal eine Grundwasserwärmepumpe (GWWP) mit jeweils einem Förder- und Schluckbrunnen umgesetzt werden kann. Wenn die Platzverhältnisse es erlauben, mehrere potenzielle Standorte auf dem jeweiligen Flurstück zu generieren, dann entsteht ein gewisser Freiheitsgrad für die räumliche Anordnung der Brunnen. Während dem Optimierungsprozess wird daher nicht nur entschieden, welche Grundwasserwärmepumpe installiert wird, sondern auch wo ihr Brunnenpaar bestmöglich positioniert wird. Für die Selektion gelten im Optimierungsprozess zusammengefasst folgende Nebenbedingungen:

- Jede GWWP hat eine vordefinierte Anzahl an potenziellen Förder- und Schluckbrunnen
- Wenn eine GWWP installiert wird, muss ein Brunnenpaar bestehend aus einem Förder- und einem Schluckbrunnen ausgewählt werden
- Förder- und Schluckbrunnen auf einem Flurstück müssen mindestens 10 m voneinander entfernt sein.
- Die Temperatur an Förderbrunnen darf gegenüber der natürlichen Grundwassertemperatur nicht mehr als 1 K sinken.
- Wenn eine GWWP nicht installiert wird, werden keine Brunnen ausgewählt
- Die Selektion von Brunnen wird mit binären Optimierungsvariablen modelliert (1=selektiert; 0=abgelehnt)

Die Entscheidungsvariablen werden dabei so integriert, dass die absolute Temperaturveränderung im Grundwasser gegenüber den Optimierungsvariablen linear ist. Dies ist notwendig, damit das gesamte Optimierungsproblem linear bleibt. Zusätzlich zum hypothetischen Ausbau in der Optimierung existieren im Stadtgebiet aktuell bereits über 2700 Grundwasserwärmepumpen. Diese bestehenden Anlagen verfügen bereits über eine Betriebserlaubnis und sind somit wasserrechtlich geschützt. Zur Integration der bestehenden Nutzungen gelten folgende Nebenbedingungen:

- Auf dem Flurstück einer bestehenden Nutzung wird eine Brunnenselektion durchgeführt.
- Die bestehenden Brunnen gehen an ihren Standorten als vorselektiert in die Optimierung ein.
- Die Temperatur an bestehenden Förderbrunnen darf durch die Neuinstallation von Schluckbrunnen gegenüber der natürlichen Grundwassertemperatur nicht mehr als 1 K sinken.

Zur Formulierung des eigentlichen Optimierungsproblems muss nun die Zielfunktion und die Nebenbedingungen definiert werden. Das Optimierungsziel ist, wie oben erwähnt, die Maximierung der thermischen Energie, die mittels bestmöglicher Positionierung der GWWP und ihrer Brunnen aus dem Grundwasserleiter entzogen wird. Die Zielfunktion ist folglich definiert als

$$E_{ext} = \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N d_{inj,k} q_{k,l} \Delta T_{inj} C_w \Delta t \quad (11)$$

wobei

E_{ext}	J	Entzugsenergie aus dem Grundwasser
d_{inj}	-	Entscheidungsvariable für Schluckbrunnen
Δt	s	Zeitschrittlänge
q	$m^3 s^{-1}$	Einletrate am Schluckbrunnen
T_{inj}	K	Spreizung zwischen natürlicher und eingeleiteter Wassertemperatur
M	-	Absolute Anzahl an Zeitschritten
N	-	Anzahl an Schluckbrunnen
l	-	Zähler für Zeitschritte
k	-	Zähler für Schluckbrunnen
C_w	$J m^{-3} K^{-1}$	Volumetrische Wärmekapazität von Wasser

Das Ziel ist es Gleichung (11) zu maximieren, während alle Nebenbedingungen eingehalten werden. Das Ergebnis ist ein optimiertes Brunnenlayout, bei dem sowohl die Brunnenstandorte der installierten

Wärmepumpen so gesetzt werden, dass keine negative thermische Beeinflussung besteht als auch nur die Anlagen installiert wurden, die zu einer optimalen Nutzung der räumlich begrenzten Ressource Grundwasser führen.

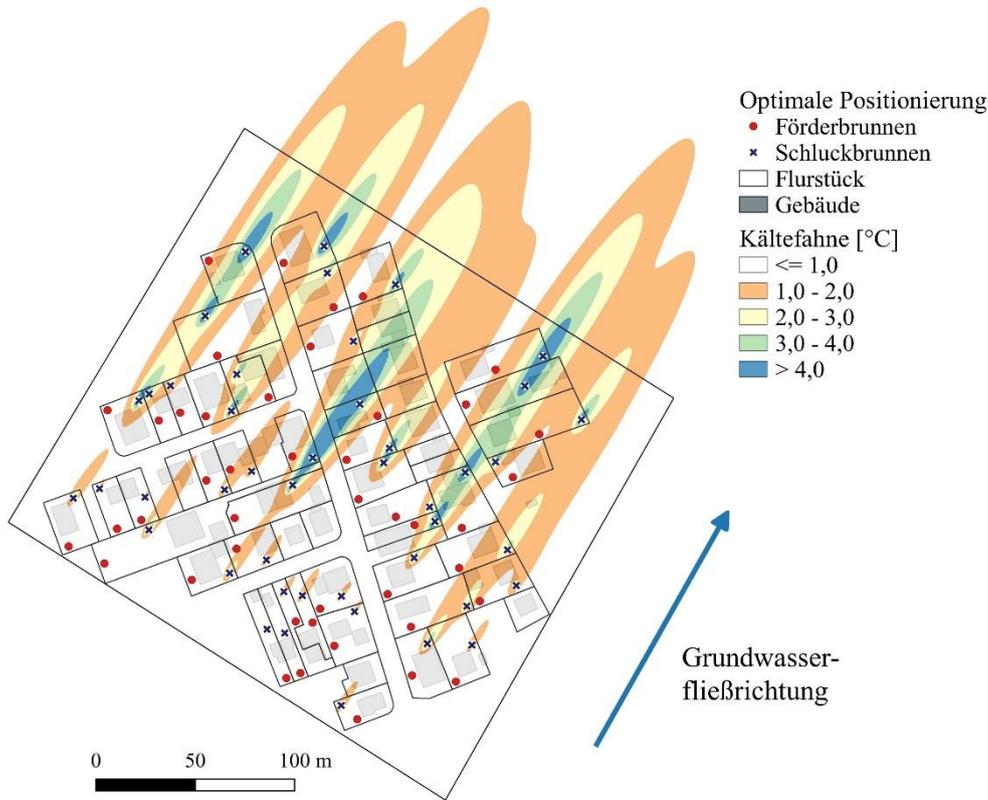


Abbildung 17: Beispielhaftes Temperaturfeld der Kälteanomalien in einer Nachbarschaft, dass eine optimale Brunnenpositionierung unter Ausschluss einer negativen thermischen Beeinflussung darstellt.

Abbildung 17 zeigt das Temperaturfeld nach der Optimierung in einer beispielhaften Nachbarschaft. Es ist zu sehen, dass einzelne Flurstücke vor allem im Abstrom nicht versorgt werden konnten, da die 1-K Temperaturanomalie (orange Fläche) von oberstromigen Schluckbrunnen die Grundstücke komplett beeinflusst. Zusätzlich liegt keiner der installierten Förderbrunnen (rote Punkte) innerhalb der 1-K Kältefahnen, womit die negative thermische Beeinflussung der Anlagen untereinander minimiert wird. Da mit der Anzahl der Optimierungsvariablen die Schwierigkeit und damit auch der Rechenaufwand des Optimierungsproblems exponentiell steigt, ist die Größe des Gebiets pro Optimierungsvorgang begrenzt. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die Optimierung dennoch für das gesamte Stadtgebiet durchgeführt wurde.

II.4.3 Evaluation des räumlichen Potenzials durch die Optimierung des Stadtgebiets

Im Stadtgebiet müssen 5084 bestehende Brunnen und über 480.000 potenzielle Brunnenstandorte auf über 57.000 Flurstücken in der räumlichen Optimierung des Ausbaus von Grundwasserwärmepumpen berücksichtigt werden. Die große Anzahl an Optimierungsvariablen erfordert daher eine Unterteilung des Stadtgebiets, um das Optimierungsproblem mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung handhabbar zu machen. Die Herausforderung bei der Unterteilung des Optimierungsraums ist, dass die Ergebnisse unter Umständen stark vom globalen Optimum abweichen können, weil zwischen den unterschiedlichen Räumen keine Informationen ausgetauscht werden. Im praktischen Beispiel der Temperaturfeldberechnung bedeutet dies, dass die Kältefahnen aus dem oberstromig gelegenen Optimierungsraum nicht in den angrenzenden abstromigen Raum fließen und somit nicht berücksichtigt werden. Im oberen Randbereich des abstromig gelegenen Optimierungsraums könnten daher Förderbrunnen installiert werden, die eigentlich noch in den Kältefahnen des oberen Optimierungsraums liegen und negativ beeinflusst werden. Dieses Problem besteht an allen Rändern

des Optimierungsraums, falls eine thermische Beeinflussung über die Grenzen hinausgeht und jenseits der Grenzen Brunnen für einen optimierten Ausbau vorgesehen sind.

In der Optimierung eines größeren Gebiets stellt sich erst im zentralen Bereich eine Lösung ein, die von den Randeffekten weniger stark beeinflusst wird. Da sich vor allem am oberen und unteren Rand durch den thermisch unbeeinflussten Zustrom und den freien Abstrom eine Population an Wärmepumpen etabliert, die das Zentrum einrahmt, erhält man in diesen zentralen Bereich ein robusteres Optimierungsergebnis, um einen Ausbau in der Fläche beurteilen zu können. Für die Evaluation des räumlichen Potenzials über verschiedene Optimierungsräume hinweg wurde daher ein zentraler Aussageraum innerhalb des Optimierungsraums definiert, der eine Verzerrung des Ergebnisses durch den Einfluss der Ränder weitgehend verhindert. In Abbildung 18a wird dargestellt, wie die Unterteilung zwischen Optimierungsraum, Randbereich und Aussageraum schematisch vorgenommen wurde. Im gewählten Ansatz ist in dieser Studie die Kantenlänge des Aussageraums konstant halb so lang wie die Kantenlänge des Optimierungsraums gewählt worden. Durch die zentrale Lage des Aussageraums ist der Abstand des Aussageraums zur Grenze des Optimierungsraums folglich wiederum die Hälfte der Kantenlänge des Aussageraums. Zur einfacheren Bearbeitung ist das gesamte Stadtgebiet zu Beginn in quadratische Kacheln mit Optimierungsräumen von 2400 m Kantenlänge zerlegt worden.

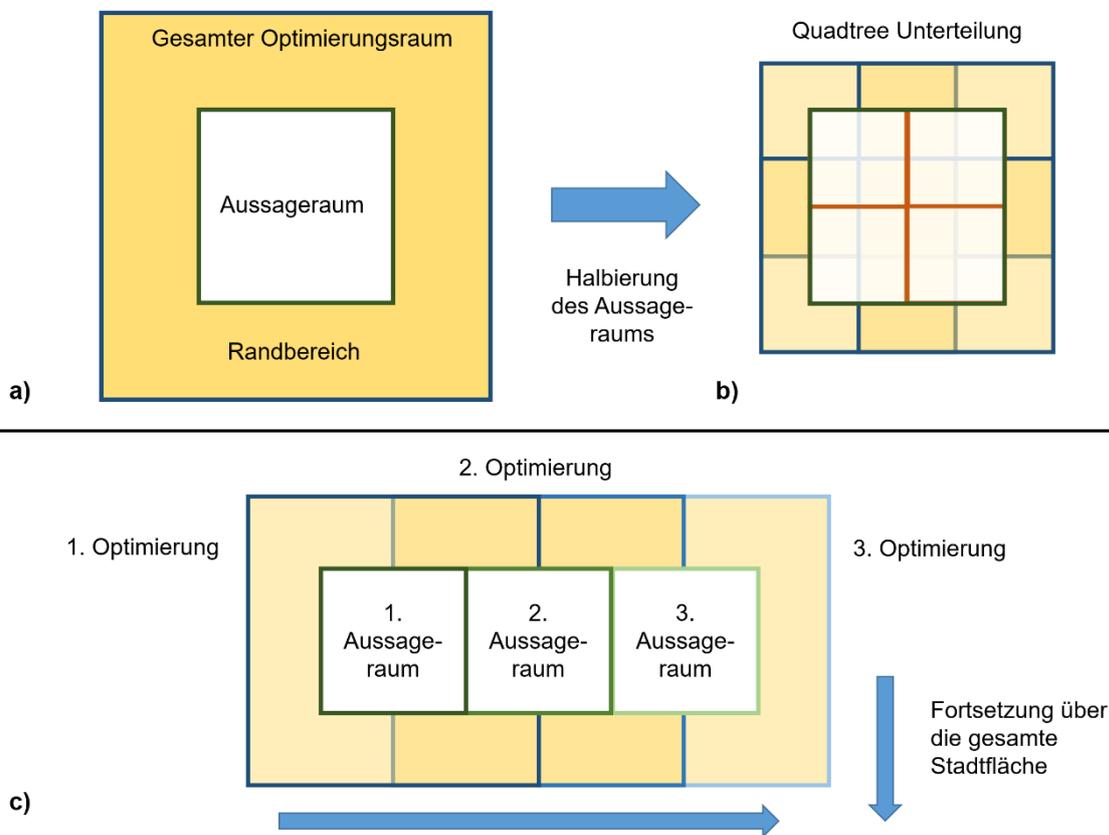


Abbildung 18: Schema des gesamtstädtischen Optimierungsansatzes mit a) der Aufteilung des Optimierungsraums (blau) in Aussageraum (grün) und Randbereich (gelb), b) der Halbierung der Aussagefläche (grün) in vier Quadranten (rot) mittels Quadtree Unterteilung zur Verkleinerung des Optimierungsproblems und c) der Überschneidung der Optimierungsräume (blau) zur zusammenhängenden Berechnung des Aussageraums (grün) über die gesamte Stadtfläche.

Da das Stadtgebiet unterschiedlich dicht besiedelt ist, können die Optimierungsprobleme mit der initialen Kantenlänge nur in weniger dicht besiedelten Gebieten gelöst werden. Da methodisch das Bestreben darauf abzielt, möglichst große Gebiete zusammenhängend zu optimieren, um die Abweichung vom globalen Optimum gering zu halten, wurde die stadtweite Evaluation in einem ersten Schritt mit entsprechend großen Kacheln begonnen. Um dicht besiedelte Gebiete zu berechnen, musste der Optimierungsraum allerdings sukzessive verkleinert werden. Methodisch wurde eine Quadtree Unterteilung implementiert, die den Aussageraum in vier gleich große Quadranten zerlegt. In Abbildung 18b wird dieses Vorgehen schematisch gezeigt, indem der grüne Aussageraum in vier rote Quadranten

unterteilt wird. Zusätzlich werden die sich ergebenden Optimierungsräume der vier Quadranten in blau dargestellt, die sich aufgrund des Randbereichs jetzt jeweils zur Hälfte überlagern. Ziel für die städtische Optimierung ist nun, das gesamte Gebiet mit aneinandergrenzenden Aussageräumen abzudecken. Dafür werden die Kacheln der Aussageräume angeordnet und die Optimierungsräume entsprechend mit doppelter Kantenlänge, wie in Abbildung 18c dargestellt, positioniert, bis die gesamte Stadtfläche abgedeckt ist.

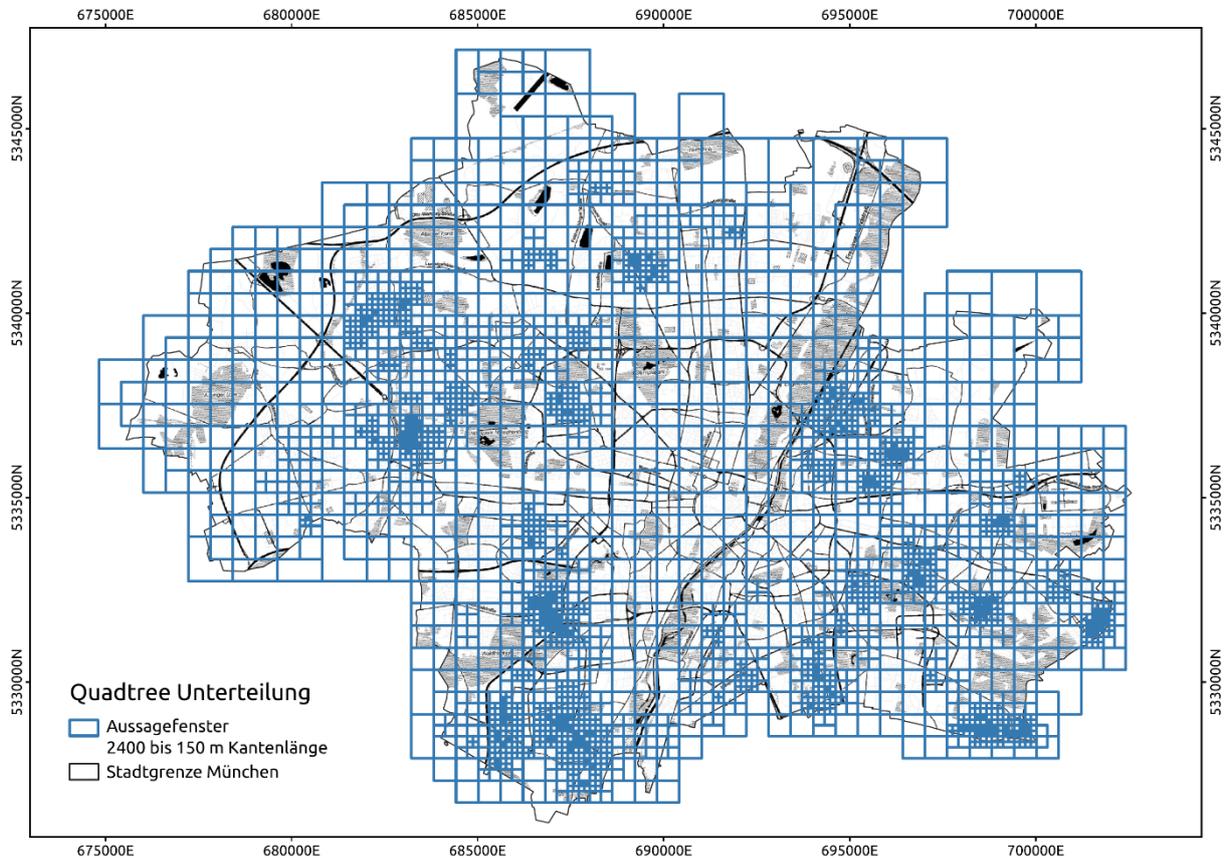


Abbildung 19: Quadtree Unterteilung des Aussageraums zur stadtweiten Berechnung des Optimierungsproblems bei einer Berechnungszeit von 100 Sekunden.

Da für die Lösung des Optimierungsproblems nur eine zuvor festgelegte Berechnungszeit von 100 Sekunden Echtzeit auf 32 parallelen Prozessen zur Verfügung steht, wird die Quadtree Zerlegung so lange vorgenommen, bis der optimierte Ausbau für das gesamte Stadtgebiet berechnet wurde. Ein Resultat dieses Unterteilungsprozesses ist in Abbildung 19 zu sehen. Je kleiner die quadratischen Kacheln der Aussageräume sind, desto schwieriger war das Optimierungsproblem in dem Gebiet zu lösen, was größtenteils mit der Dichte der Besiedlung korreliert.

Die räumliche Optimierung stellt den finalen Schritt der Potenzialevaluierung dar. Mit ihr liegen alle relevanten potenzialseitigen Kennwerte vor, die bei der kommunalen Wärmeplanung benötigt werden. Anschließend können sie für eine Definition von technologiespezifischen Eignungsgebieten herangezogen werden und so zur Wärmestrategie der Landeshauptstadt München beitragen. Zusätzlich ist die Optimierung des räumlichen Ausbaus der thermischen Grundwassernutzung ein elementarer Baustein in der iterativen Modellkopplung mit der Multi-Agenten Simulation, die im Modell München eingesetzt wird. Im Folgenden wird das Konzept der Modellkopplung und die Datenschnittstellen zwischen den beiden Modellumgebungen erläutert.

II.4.4 Konzept der Modellkopplung und Schnittstelle zum automatisierten Datenaustausch

Während das technische Potenzial eine geeignete Informationsquelle zur individuellen Entscheidung für eine Versorgungstechnologie darstellt, bietet es aus den bereits in Kapitel II.1 beschriebenen Gründen keine geeignete Entscheidungsgrundlage für eine gesamtstädtische Versorgungssimulation. Eine derartige Simulation zur Transformation des Wärmesektors hin zu erneuerbaren Wärmequellen ist

allerdings die Voraussetzung zur Ausarbeitung geeigneter Maßnahmen, die Bestandteil einer fachlich fundierten Wärmewendestrategie sind. Wie bereits in Kapitel 1.2.2 erläutert, findet die Analyse verschiedener Wärmewendeszenarien durch eine Multi-Agenten Simulation im Modell München statt. Um den möglichen Beitrag der thermischen Grundwassernutzung in einer zukünftigen klimaneutralen Wärmeversorgung der Stadt simulieren zu können, muss das Modell München die Obergrenzen für einen Ausbau kennen. So wird verhindert, dass das verfügbare räumliche Potenzial überschritten wird.

Abbildung 20 zeigt das Schema mit Datenflüssen zur gekoppelten Simulation eines Wärmewendeszenarios. Der Prozess beginnt mit der Initialisierung der beiden Modelle. Hierbei wird einleitend das technische Versorgungspotenzial des Wärmebedarfs ohne räumliche Optimierung als Obergrenze für den möglichen Ausbau von Geo.KW an das Modell München übergeben (Abbildung 20 linke Seite). Zusammen mit den Eingangsparametern für das entsprechende Wärmewendeszenario wird im Modell München eine Realisation der zukünftigen Wärmeversorgung zeitlich aufgelöst bis 2050 simuliert. Aus diesem Simulationslauf wird abgeleitet welche Gebäude sich für eine thermische Grundwassernutzung entschieden haben. Dabei ist zu beachten, dass Multi-Agenten Simulationen mit Wahrscheinlichkeiten arbeiten. Für die konkrete Zuweisung der Gebäude mit Vollversorgung durch Grundwasserwärmepumpen, werden die Gebäude mit den höchsten Wahrscheinlichkeiten selektiert, bis die Summe des technischen Potenzials auf einem Baublock ausgeschöpft ist. Gebäude ohne Wahrscheinlichkeit für die Installation einer Grundwasserwärmepumpe, werden nicht berücksichtigt. Diese Zuweisung ist für die folgende räumliche Optimierung nötig, da konkrete Ausbauszenarien mit Brunnenpositionen auf definierten Flurstücken berechnet werden. In der zeitlich aufgelösten Simulation des Modell München können Heizungswechsel und Sanierungsaktivitäten unabhängig voneinander ablaufen. Da nach der Installation einer Grundwasserwärmepumpe vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die Anlage bis 2050 betrieben wird, ist der im gesamten Simulationszeitraum maximale Wärmebedarf der selektierten Gebäude maßgeblich für die Optimierung des räumlichen Ausbaus. Dieses Vorgehen ist hinsichtlich der thermischen Belastung des Grundwasserleiters konservativ zu werten, da durch das Aggregieren auf den maximalen Wärmebedarf die zeitliche Komponente verloren geht und somit der schlechteste Zustand angenommen wird. Um konservative Ergebnisse zu erhalten, wird angenommen, dass ein der heutige energetische Zustand eines Gebäudes bis 2050 nicht durch Sanierung verbessert wird. Nach der Definition von versorgten Gebäuden und zukünftigen Wärmebedarfen, werden die entsprechenden Heizleistungen der Wärmepumpen an Geo.KW übergeben und der iterative Prozess der Kopplung bis zur Konvergenz beginnt (siehe Abbildung 20).

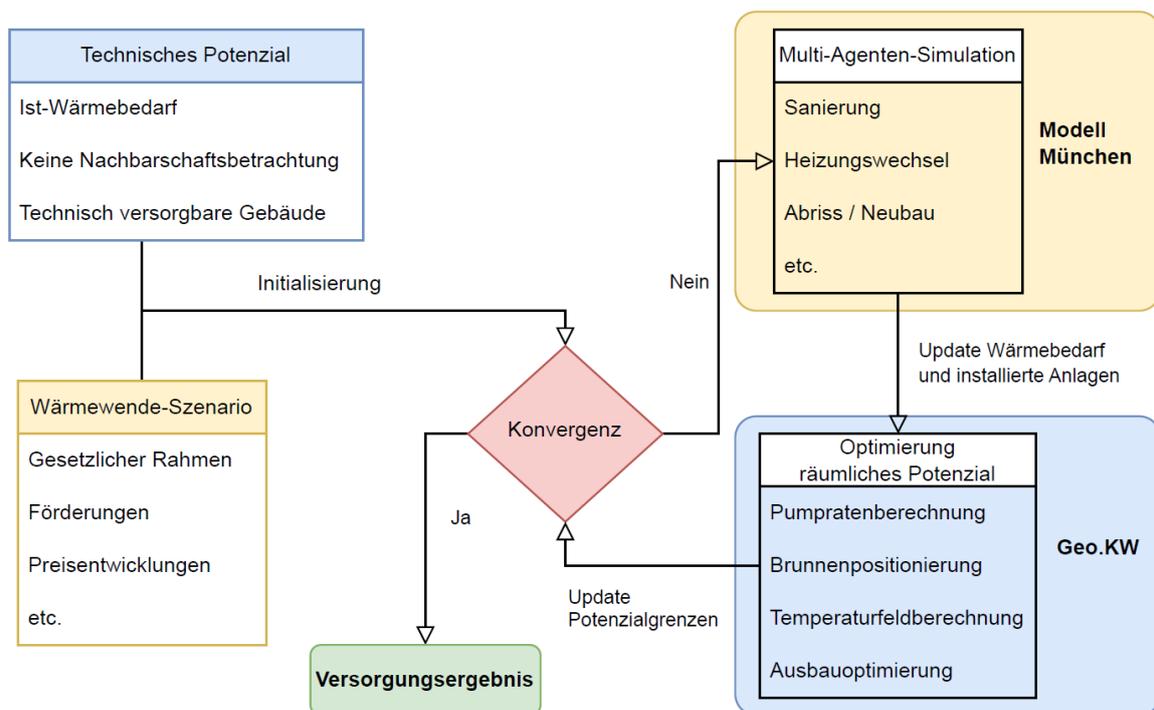


Abbildung 20: Kopplungsschema zum iterativen Datenaustausch zwischen der Multi-Agenten-Simulation (Modell München) und der Optimierung des räumlichen Potenzials für die thermische Grundwassernutzung (Geo.KW).

In Geo.KW werden die Heizleistungen der selektierten Gebäude gemäß ihrer Lage auf Flurstückebene aggregiert und über die vereinfachende Annahme einer konstanten Effizienz ($JAZ=4$) und Temperaturspreizung im quellenseitigen Wärmetauscher (5K) in maximale Pumpraten pro Flurstück umgerechnet. Anschließend werden, wie in Kapitel II.4.2 beschrieben, die möglichen Brunnenpositionen für die Optimierung des räumlichen Ausbaus definiert. Nach diesen vorbereitenden Schritten startet der stadtweite Optimierungslauf (siehe Kapitel II.4.3) mit analytischer Temperaturfeldberechnung (siehe Kapitel II.4.1). Das Ergebnis dieser Optimierung sind neue räumliche Potenzialgrenzen, die eine negative thermische Beeinflussung der Anlagen untereinander ausschließen und entsprechend niedriger liegen. Diese Potenzialgrenzen ersetzen nun die initialen technischen Potenziale und der iterative Prozess startet von neuem. Das Modell München simuliert nun eine neue Realisation der zukünftigen Wärmeversorgung und übergibt die Wärmebedarfe der installierten Anlagen wieder an Geo.KW. Wenn sich die Potenzialgrenzen nicht mehr signifikant ändern, stoppt der Prozess und ein konvergiertes Versorgungsszenario liegt als Ergebnis vor. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die sich aus der Anwendung der oben beschriebenen Methodiken ergeben. Die Analyse der Wärmewendeszenarien sind Bestandteil des FfE-Berichts und die darauf aufbauenden Maßnahmen werden im Bericht des Hamburg Instituts zur Wärmewendestrategie aufgegriffen.

III Ergebnisse

Der Ergebnisteil gliedert sich entsprechend den in Kapitel I.3.2 vorgestellten Meilensteinen des Projekts. Zu Beginn wird auf die Ergebnisse bei der Aufbereitung der existierenden thermischen Nutzungen eingegangen, wodurch eine qualitativ hochwertige Datenbasis zur Abbildung des IST-Zustands der Nutzung des quartären Grundwasserleiters erstellt werden konnte. Anschließend werden die Ergebnisse der Weißflächenkartierung vorgestellt, die die Grundlage für die Potenzialanalyse auf Flurstück- und Baublockbasis bildet. Abschließend wird das Ergebnis der räumlich optimierten Potenzialanalyse präsentiert.

III.1 Evaluation der existierenden thermischen Grundwassernutzungen

Für eine detaillierte Abbildung des IST-Zustands wurden alle bestehenden Grundwassernutzungen im Stadtgebiet gesichtet, aufbereitet und ein einheitlicher Datensatz erstellt, der alle relevanten Daten für die räumliche Potenzialevaluierung enthält. Unter Grundwassernutzungen fallen neben thermischen Nutzungen auch allgemeine Wasserentnahmen ohne Wiedereinleitung, wie z.B. Brauchwasserbrunnen.

Ein initialer Schritt bei der Aufbereitung der Daten war das Zusammenführen von Datenpunkten aus verschiedenen Datenbanken (siehe Kapitel I.3.2 Meilenstein M1). Für die Brunnenstandorte und generelle Metadaten zu den Anlagen stand das Brunnenkataster des Wasserwirtschaftsamts München, das Archiv des Referats für Klima- und Umweltschutz und das zentrale Bodeninformationssystem (BIS) des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) zur Verfügung. Da thermische Grundwassernutzungen typischerweise aus einem oder mehreren Förderbrunnen (FB) und einem oder mehreren Schluckbrunnen (SB) bestehen, musste grundlegend sichergestellt werden, dass die Brunnen fehlerfrei zu Anlagen zusammengefasst sind und mindestens je ein Förder- und ein Schluckbrunnen vorhanden ist. Da der Bezug zwischen Brunnen und Anlagen nur im BIS hinterlegt ist, mussten die Beziehungen für die neuen Datensätze aus dem Archiv des RKUs und dem Brunnenkataster nachgezogen werden. Zudem wurden Anlagen ohne Brunnenzuweisung und Duplikate bereinigt. Für Anlagen bei denen keine Vervollständigung der Brunnen (mind. 1 FB und 1 SB) aus den vereinigten Datensätzen möglich war, wurde der jeweils fehlende Brunnen künstlich erstellt. Vor allem bei älteren Anlagen, deren Genehmigung schon länger als die Einführung der heutigen IT-Infrastruktur und Datenhaltung im BIS zurückliegt, wurden die Schluckbrunnen häufig nicht mit aufgenommen. In solchen Fällen wurde gemäß der Grundwasserfließrichtung auf dem betreffenden Flurstück der Anlage ein Schluckbrunnen an der Grenze im Abstrom erstellt. Hierfür wurden die gängigen Abstandsflächen von 3 m zur Flurstücksgrenze und 3 m zu Gebäuden eingehalten und dementsprechend ein Standort gewählt, der in maximaler Entfernung zum bestehenden Förderbrunnen liegt. Für fehlende Förderbrunnen wurde entsprechend im Zustrom unter den gleichen Rahmenbedingungen ein Brunnen erstellt. Durch die getroffenen Annahmen konnte der grundlegende Datensatz der Brunnenstandorte und ihrer Verknüpfung zu Anlagen komplettiert werden und final zum Stichtag, dem 01.08.2021, 2705 Anlagen mit insgesamt 5893 Brunnen in der Potenzialevaluierung berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Voraussetzungen geschaffen, die existierenden Anlagen in eine zeitlich aufgelöste Simulation zu integrieren. Hierfür müssen allen Brunnen gemäß ihres Typs Zeitreihen der Pumpraten und bei Schluckbrunnen auch Zeitreihen zur Einleittemperatur als Randbedingung hinterlegt werden. Dazu wurden für alle Anlagen Lastprofile erstellt. Bei EÜV-pflichtigen Anlagen wurden die abgegebenen Jahresberichte verwendet. Diese beinhalten in sehr unterschiedlicher Qualität Angaben zu monatlichen Entnahmen und Förder- bzw. Einleittemperaturen. Die Daten aus den Jahresberichten wurden daher bei der manuellen Digitalisierung, die in Teilen ebenfalls im Projekt durchgeführt wurde, zusätzlich auf Plausibilität geprüft. Da die Lasten bei diesen Anlagen z.T. sehr variabel ausfallen, wurden mittlere Jahres-Referenzlastprofile berechnet, um ein typischen Lastprofil zu generieren.

Bei kleineren thermischen Nutzungen, für die gewöhnlich keine Monitoring-Daten vorliegen, wurde ein Lastprofil aus dem Wärmebedarf der Gebäude auf dem Flurstück abgeleitet. Der Wärmebedarf wurde den Ergebnissen der gebäudescharfen stadtweiten Wärmebedarfssimulation entnommen, die von e-think im Auftrag der SWM für das Model München durchgeführt wurde, und auf einer hochwertig mit gemessenen Verbräuchen kalibrierten Datenbasis beruht. Das sich durch die aggregierten

Gebäudelasten auf dem Flurstück ergebende Lastprofil wurde im Anschluss anhand verschiedener Angaben zur Anlagengröße und Betriebsweise auf Plausibilität geprüft. Als erster Datenpunkt wurde die genehmigte Jahresentnahme verwendet, um Lasten zu reduzieren, die die genehmigte Entnahme überschritten haben. Bei Flurstücken, auf denen mehrere beheizte Gebäude existieren, wird somit davon ausgegangen, dass nicht alle Gebäude durch die Anlage versorgt werden. Falls nur ein Gebäude auf dem Flurstück existiert, kann es sich auch um ein bivalent betriebenes System handeln oder es wird nur ein bestimmter Gebäudeteil versorgt. Neben der Jahresentnahme wurden auch Angaben zur Heiz- oder Kühlleistung oder zur Entnahme für den Heiz- oder Kühlbetrieb für die Reduktion der Lasten unter das entsprechende Limit verwendet. Für den Fall, dass in den Metadaten der Anlage kein Wert für eine Plausibilitätskontrolle zur Verfügung steht, wurde die Versorgung auf das kleinste Gebäude auf dem Flurstück beschränkt und zudem ein Abgleich mit der technisch umsetzbaren Entnahmerate, die sich aus der TAP-Methode berechnet, durchgeführt (siehe Böttcher et al., 2019).

Tabelle 6: Annahmen der Datensatzbereinigung mit den für Brunnen und Anlagen genutzten Datenpunkten.

Objekt	Datenpunkt	Datenquelle	Aufbereitung/ Annahme
Brunnen	Koordinaten der Brunnenstandorte	Brunnenkataster, BIS, RKU-Archiv	Bei fehlenden Brunnen (mind. FB/SB Paar pro Anlage): Erstellen eines synthetischen Brunnens gemäß Grundwasserfließrichtung und 3m Abstandsflächen
	Tiefenlage der Filterstrecke	BIS (Boden-Informationssystem)	Bei fehlendem Wert: Verfilterung von Grundwasserstand (GEPO) bis 1m über Quartärbasis
	Ausbau-durchmesser	BIS, RKU-Archiv	Bei fehlendem Wert: Standarddurchmesser 6" bzw. 152mm
Anlage	Genehmigte Jahresentnahme	BIS	Verwendung zur Plausibilitätsprüfung bei der Erstellung der Lastkurve
	Temperaturspreizung	BIS	Bei fehlendem Wert: konstant 5K für Heiz- und Kühlanlagen
	Beziehung Anlage zu Brunnen	Brunnenkataster, BIS, RKU-Archiv	Erstellung synthetischer Anlagen bei fehlenden Beziehungen
	Heiz- oder Kühlleistung	BIS	Verwendung zur Plausibilitätsprüfung bei der Erstellung der Lastkurve
	Nutzungsart	Brunnenkataster, BIS, RKU-Archiv	Verwendung bei der Erstellung der Lastkurve
	Entnahme für Heiz- oder Kühlbetrieb	BIS	Verwendung zur Plausibilitätsprüfung bei der Erstellung der Lastkurve
Lastkurven	Jahresberichte EÜV-Anlagen	WWA-München	Digitalisierung, Plausibilitätsprüfung, Aggregieren auf Referenzlast pro Jahr
	Wärmebedarfs Simulation	Model München	Abgleich von Anlagendaten und Wärmelasten der Gebäude zur Abschätzung der Versorgung

Am Bayerischen Landesamt für Umwelt ist geplant das Brunnenkataster sukzessive in das BIS zu migrieren und schlussendlich aufzulösen, um divergierende Datensätze in Zukunft zu vermeiden. Hierfür werden zum einen historische Abweichungen bereinigt und zum anderen neue Arbeitsprozesse etabliert, die einen fehlerfreien und beschleunigten Austausch von genehmigungsrelevanten Datensätzen zwischen den involvierten Behörden ermöglichen. Das RKU unterstützt das WWA und das LfU hierbei, die nötigen Entwicklungen waren allerdings zum Zeitpunkt der Berichtsfassung nicht abgeschlossen. Perspektivisch ist daher geplant, den aktualisierten Datensatz der thermischen Nutzungen für ein Update der räumlichen Potenzialevaluierung zu verwenden, sobald die Bearbeitung abgeschlossen ist.

III.2 Evaluation des technisch umsetzbaren Potenzials

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Schritte der Potenzialanalyse vorgestellt. Die Grundlage der Berechnung des technisch umsetzbaren Potenzials bildet die Weißflächenkartierung, anhand der Ausschlussflächen für die thermische Nutzung des Grundwassers festgelegt werden. Daran anschließend werden die Ergebnisse der flurstückscharfen und baublockscharfen Potenzialanalyse vorgestellt.

III.2.1 Ergebnisse der Weißflächenkartierung

Wie in Kapitel II.2.1 beschrieben, wurden in der Weißflächenkartierung sowohl Natur- Denkmal- und Wasserschutz relevante Kriterien als auch bauliche Kriterien berücksichtigt. Die Zusammenschau der räumlichen Ausgestaltung der einzelnen Ausschlusskriterien ist in Abbildung 21 und Abbildung 22 zu sehen. Zusätzlich werden in Tabelle 7 die Anzahl der Geometrien, Gesamtflächen und Anzahl, der im Gebiet liegenden Gebäude pro Ausschlusskriterium zusammengefasst. Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt noch den beiden Themen (Naturschutz und Bau) und geordnet nach ihrer Signifikanz beschreiben.

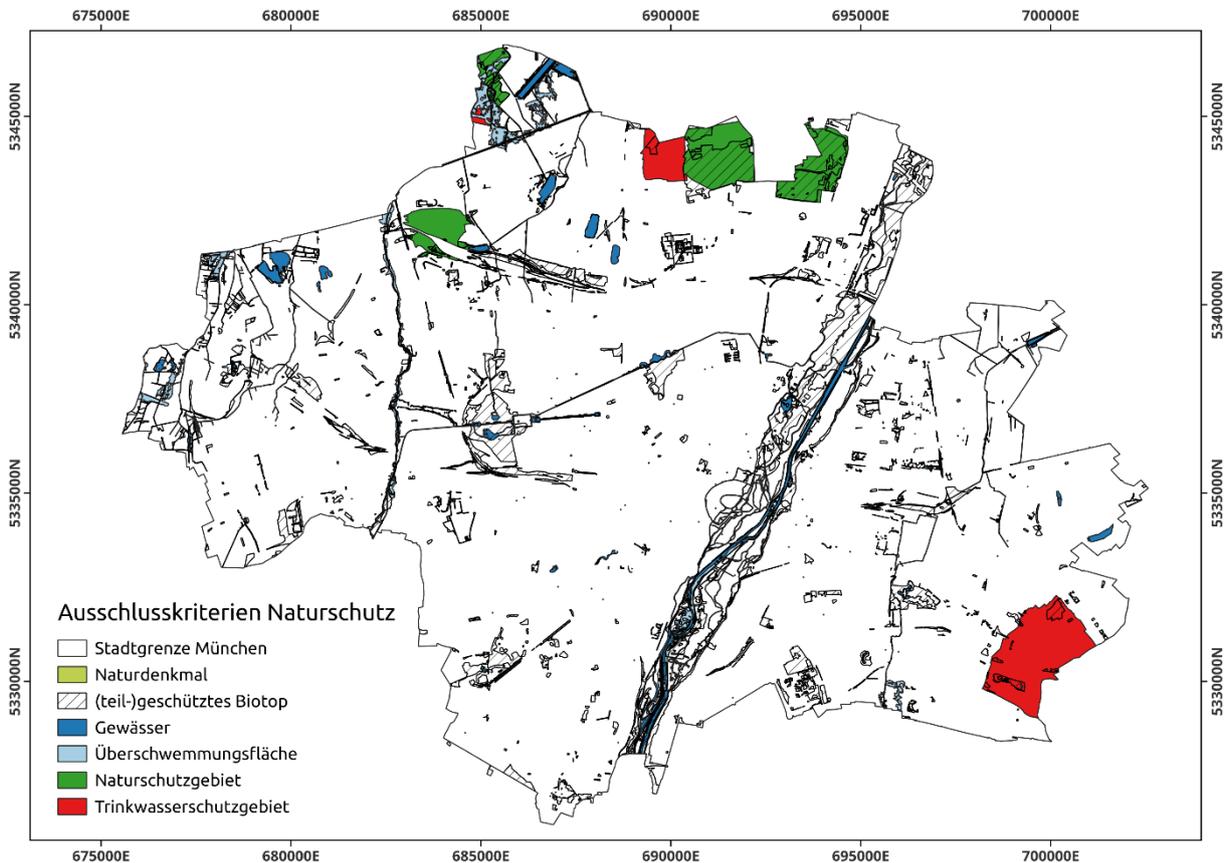


Abbildung 21: Natur- und Wasserschutz spezifische Ausschlussflächen, die in der Weißflächenkartierung berücksichtigt wurden.

Die 118 Naturdenkmäler umfassen die geringste Fläche und betreffen nur 9 Gebäude, weshalb durch sie nur sehr wenige Einschränkungen für den Ausbau der thermischen Grundwassernutzung bestehen. Die als Naturdenkmäler kartierten Bäume stehen meist in Parks und nur selten nahe der Wohnbebauung. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass Bäume generell einen vielfach höheren Einfluss auf mögliche Bohrplätze haben werden. Wenn der Baumbestand, der gemäß BaumschutzV geschützt ist, auf Basis der Befliegungsdaten durch die Luftbildstelle der Stadt kartiert ist, wird dieser verbesserte Datensatz die KI-generierten Baumdaten ersetzen und in einem späteren Update in die Weißflächenkartierung integriert (siehe Kapitel II.2.1). Eine ebenso geringe Einschränkung für den Ausbau von Grundwasserwärmepumpen gegenüber dem Gebäudebestand stellen Naturschutzgebiete dar. Da in Naturschutzgebieten der Neubau verboten ist, war dieses Ergebnis trotz der großen Gesamtfläche zu erwarten.

Eine etwas höhere Beschneidung des Potenzials besteht aufgrund von Gewässern und ausgewiesenen Überschwemmungsgebieten. Vor allem in den Stadtteilen Lehel, Isarvorstadt und in der unteren Au sind die Stadtbäche oft überbaut und müssen entsprechend berücksichtigt werden. Die restlichen Gewässer liegen an der Geländeoberfläche und überschneiden sich daher nicht mit Gebäuden. Für die Bebauung relevante Überschwemmungsgebiete sind entlang der Würm und des Harlachinger Bachs ausgewiesen. Die übrigen Gebiete sind großteils unbebaut und trotz der räumlichen Ausdehnung

besteht somit nur ein geringer beschränkender Einfluss. Gemessen an der Gesamtfläche wirken sich die geschützten Biotope der Stadt ebenfalls recht gering auf den Gebäudebestand und somit das Potenzial aus. Zum einen wird nur selten bebautes Gebiet als Stadtbiotop ausgewiesen und zum anderen überschneiden sich die größeren Biotopflächen häufig mit den Naturschutzgebieten und Stadtparks, wie dem Nymphenburger Park und dem Englischen Garten. Im Stadtgebiet sind allerdings auch eine Vielzahl kleinerer Freiflächen kartiert, die für den Bau größerer Brunnenanlagen zur Versorgung von Nahwärmenetzen geeignet wären.

Eine größere Beschneidung des Potenzials für Grundwasserwärmepumpen besteht durch die zwei größeren Trinkwasserschutzgebiete Oberschleißheim und Trudering. Die Ausläufer des Gebiets in Oberschleißheim betreffen den nördlichen Teil des Stadtteils Hasenberg. In Trudering liegt das Gebiet meist auf unbebautem Gebiet. Es gibt allerdings Ausnahmen, wie z.B. die Grenzkolonie Trudering mit vielen Einfamilienhäusern.

Bei den baurelevanten Ausschlussflächen beschneiden alle identifizierten Kriterien das Potenzial in einem signifikanten Maß. In Bezug auf betroffene Gebäude liegen Tiefbauobjekte und Straßentunnel am unteren Ende der Beeinflussung (siehe Tabelle 7). Da viele Objekte im Tiefbau, wie z.B. Unterführungen, eine räumliche Überschneidung mit dem Straßenbau haben, sind hier weniger Gebäude von einer Verringerung des Potenzials betroffen. Bei der Lage der S-Bahn-Tunnel sind die Zusammenhänge ähnlich. Hier überschneiden sich die Tunnel weitgehend mit hydrogeologisch ungünstigen Gebieten und wirken sich trotz der vielen betroffenen Gebäuden weniger stark auf das Potenzial aus.

Bohrbarpostgres

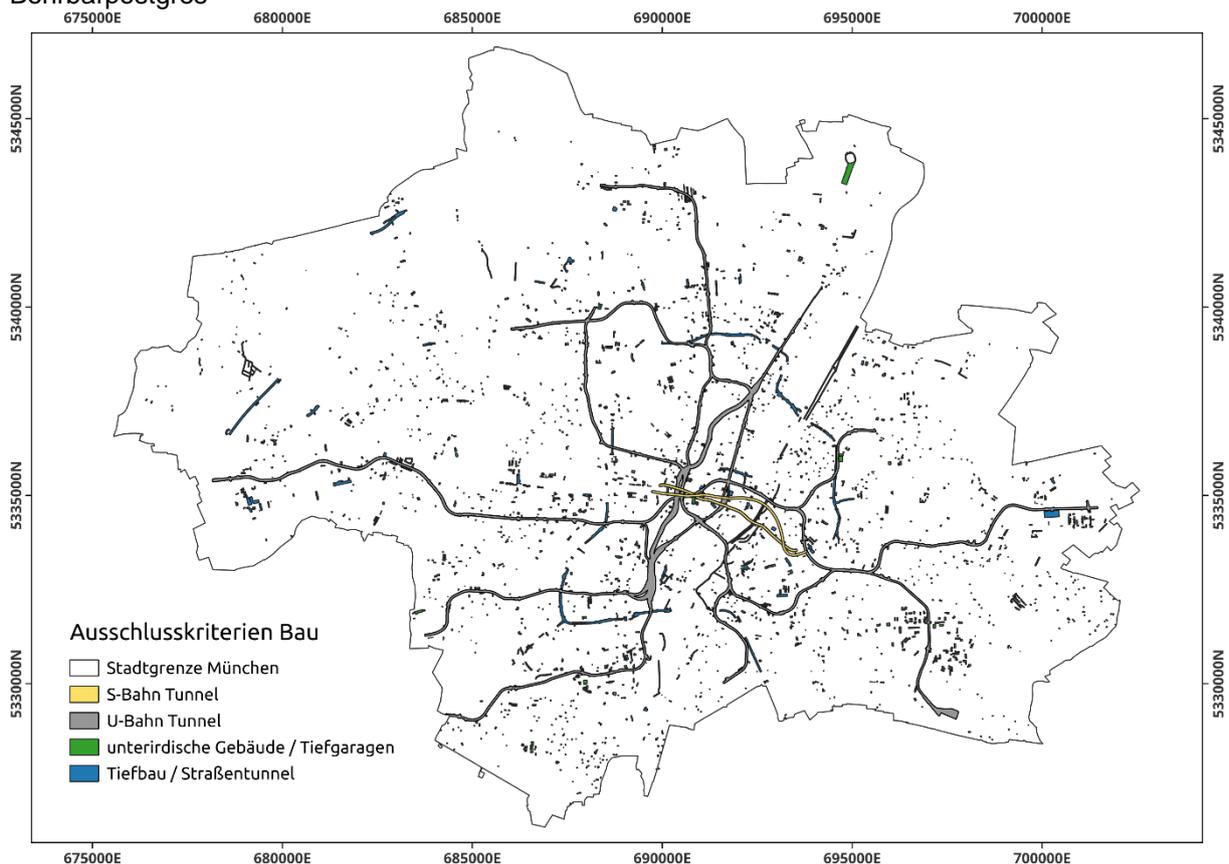


Abbildung 22: Bau spezifische Ausschlussflächen, die in der Weißflächenkartierung berücksichtigt wurden.

Eine größere Beeinflussung geht von unterirdischen Gebäuden und Tiefgaragen aus. Sie sind diffus über das gesamte Stadtgebiet verteilt und liegen meist direkt auf den Flurstücken der zu versorgenden Gebäude. Jedes Objekt wirkt sich somit direkt durch eine Einschränkung der Brunnenpositionen negativ auf das zur Verfügung stehende Potenzial aus. Zusätzlich können sich unterirdische Gebäude und Tiefgaragen je nach Tiefenlage auf die Genehmigungsfähigkeit von neuen Grundwassernutzungen im

Umkreis auswirken, da Auflagen zur Beschränkung des Aufstaus nötig sein können, um den Gebäudebestand zu schützen.

Ein geringer beschränkender Einfluss für die thermische Grundwassernutzung kommt durch das Fernwärme- und U-Bahn-Netz zustande. Die räumliche Ausdehnung der Netze überschneidet sich praktischerweise stark mit Gebieten, die ohnehin ein geringeres Potenzial für thermische Grundwassernutzung aufweisen. Da die Objektdichte vor allem im Stadtzentrum und entlang der westlichen Isarseite besonders hoch ist, ist auch bei diesen Kriterien der reduzierende Einfluss auf das Potenzial gering. Zusätzlich liegen Fernwärmetrassen und U-Bahn-Tunnel häufig unter Straßen, was die Einschränkungen bei der grundstückseigenen Wärmeversorgung von Wohngebäuden mit Grundwasserwärmepumpen weiter verringert. Des Weiteren soll auf dem strategischen Niveau der kommunalen Wärmeplanung im Fernwärmegebiet auch der leitungsgebundenen Wärmeversorgung der Vorrang gegeben werden. Eine Einschränkung des Potenzials im Fernwärmegebiet ist daher auch strategisch gesehen nicht so problematisch. Nichtsdestotrotz wird in der Zusammenschau der Kriterien durch die stadtwert großräumige Ausdehnung das meiste Potenzial durch U-Bahn und Fernwärmenetz verhindert.

Zusätzlich zu den baurelevanten und naturschutzrelevanten Kriterien wurden auch unterirdische Leitungen, sog. Sparten, in der Weißflächenkartierung berücksichtigt. Wie in Tabelle 7 dargestellt, wurde das Fernkälte- und Fernwärmenetze, das Gasnetz, das Stromnetz und die Trinkwasserversorgung aus Datenschutzgründen als vereinigte Geometrie verarbeitet und berücksichtigt. Für die verschiedenen Leitungssysteme wurden sowohl die Leitungstrassen als auch zugehörige Schächte und Regelanlagen inklusive der Hausanschlüsse einbezogen. In der Kartierung der Ausschlussgebiete für Bohrungen sind die Sparten mit den üblichen Abstandsflächen von ca. 2 m belegt worden, um eine Beschädigung der unterirdischen Infrastruktur auszuschließen. An dieser Stelle muss allerdings betont werden, dass die Aufnahme der Sparten in der Weißflächenkartierung die nochmalige Spartenabfrage vor einer Bohrung nicht ersetzt. Die Abfrage der aktuellen Spartensituation ist eine Voraussetzung für jeden Bohrvorgang und muss weiterhin zwingend durchgeführt werden.

Tabelle 7: Räumliche Kennwerte und Auswirkung der untersuchten Kriterien in der Weißflächenkartierung.

Ausschlusskriterium	Anzahl Geometrien	Ausschluss-Fläche in ha	Anzahl betroffene Gebäude
Trinkwasserschutzgebiete	3	621,1	2631
Naturschutzgebiete	12	909,1	7
(Teil-)geschützte Biotope	1790 (aus 2578)	2764,0	848
Gewässer	268	820,4	449
Naturdenkmäler	118	3,7	9
Überschwemmungsgebiete	34	509,5	471
U-Bahntunnel	290	661,9	3950
S-Bahntunnel	2	203,1	1252
Unterirdische Gebäude (inkl. Tiefgaragen)	1629 (721)	236,2	1952
Tiefbau (inkl. Straßentunnel)	1089 (151)	328,2	530
Fernwärme-, Fernkälte-, Gas-, Strom- und Trinkwasserleitungen	1 (vereinigt)	3401,5	19182

In einem abschließenden Schritt wurde für den flurstücksweisen Einsatz von Grundwasserwärmepumpen noch der vorgeschriebene Mindestabstand für Bohrungen von 3 m zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen aufgenommen und alle zuvor beschriebenen Ausschlusskriterien miteinander verschmolzen. Abbildung 23 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Weißflächenkartierung und die resultierenden Freiflächen, die potenziell für den Brunnenbau zur Verfügung stehen.



Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung der Freiflächen mit Flurstück- und Gebäudeabstandflächen, die für den Brunnenbau zur Verfügung stehen.

Die hier vorgestellte und im Projekt erstmalig durchgeführte Weißflächenkartierung hat zu einer erheblichen Verbesserung des Detailgrads bei der anschließenden Analyse des technisch umsetzbaren Potenzials geführt. Mit Hilfe von qualitativ hochwertigen städtischen Datensätzen konnten die meisten relevanten Kriterien zur Identifikation von Ausschlussflächen betrachtet werden und zusätzlich die Methode hinsichtlich ihrer räumlichen Integration weiterentwickelt werden. Wie bereits in Kapitel II.2.1 erwähnt, ist für einen weiteren Update-Zyklus der Potenzialberechnung bereits geplant, auch den geschützten Baumbestand, das unterirdische Strom-, Gas- und Telekommunikationsnetz zu integrieren. In den folgenden Kapiteln werden die auf der Weißflächenkartierung basierenden flurstückscharfen und baublockscharfen Potenzialanalysen präsentiert.

III.2.2 Ergebnisse der flurstückscharfen Potenzialanalyse

Wie in Kapitel II.2 beschrieben, wurde auf Basis der TAP-Methode das flurstückscharfe Potenzial für die thermische Grundwassernutzung stadtwweit berechnet (siehe Böttcher et al. 2019). Das Ergebnis für die thermische Entzugsleistung, die final mit Gleichung (6) und einer üblichen Temperaturspreizung von 5 K berechnet wurde, ist in Abbildung 24 zu sehen. In den Ergebnissen der Weißflächenkartierung aus dem vorhergehenden Kapitel ist ersichtlich, dass sich die Gegenden mit hohem Potenzial gut vom Fernwärmegebiet abgrenzen. Die thermische Grundwassernutzung lässt sich daher in geeigneter Weise in die strategischen Überlegungen der kommunalen Wärmeplanung in München eingliedern und kann einen signifikanten Anteil der Wärme- und Kälteversorgung in dezentral versorgten Gebieten leisten. Als grober Richtwert zur Interpretation der Entzugsleistungen, kann die Farbgebung in Abbildung 24 folgendermaßen klassifiziert werden. Falls keine anderweitigen Informationen zur Hydrogeologie vorliegen, sollte auf Flurstücken unter 5 kW Entzugsleistung von einer thermischen Grundwassernutzung abgesehen werden. In Gebieten zwischen 5 und 25 kW können üblicherweise Einfamilienhäuser und Doppelhaushälften versorgt werden. Bis 100 kW ist einer Versorgung kleinerer Mehrfamilienhäuser und ab 100 kW größerer Mehrfamilienhäuser möglich. Zu beachten ist, dass hier die geogenen Entzugsleistungen der Wärmequelle Grundwasser gegeben sind. Die Heizleistung einer Wärmepumpe im Gebäude ist abhängig von der Effizienz der Wärmepumpe, welche wiederum vom Temperaturhub abhängig ist, der zwischen Wärmequelle, i.e. Grundwassertemperatur, und der Wärmesenke, i.e. Heizkreis, geleistet werden muss. Durch die vereinfachende Annahme eines mittleren Betriebspunkts bzw. einer durchschnittlichen Effizienz einer hypothetischen Wärmepumpe kann mit Gleichung (7) zur Abschätzung der initialen Machbarkeit die Verdampferleistung einer Wärmepumpe berechnet werden.

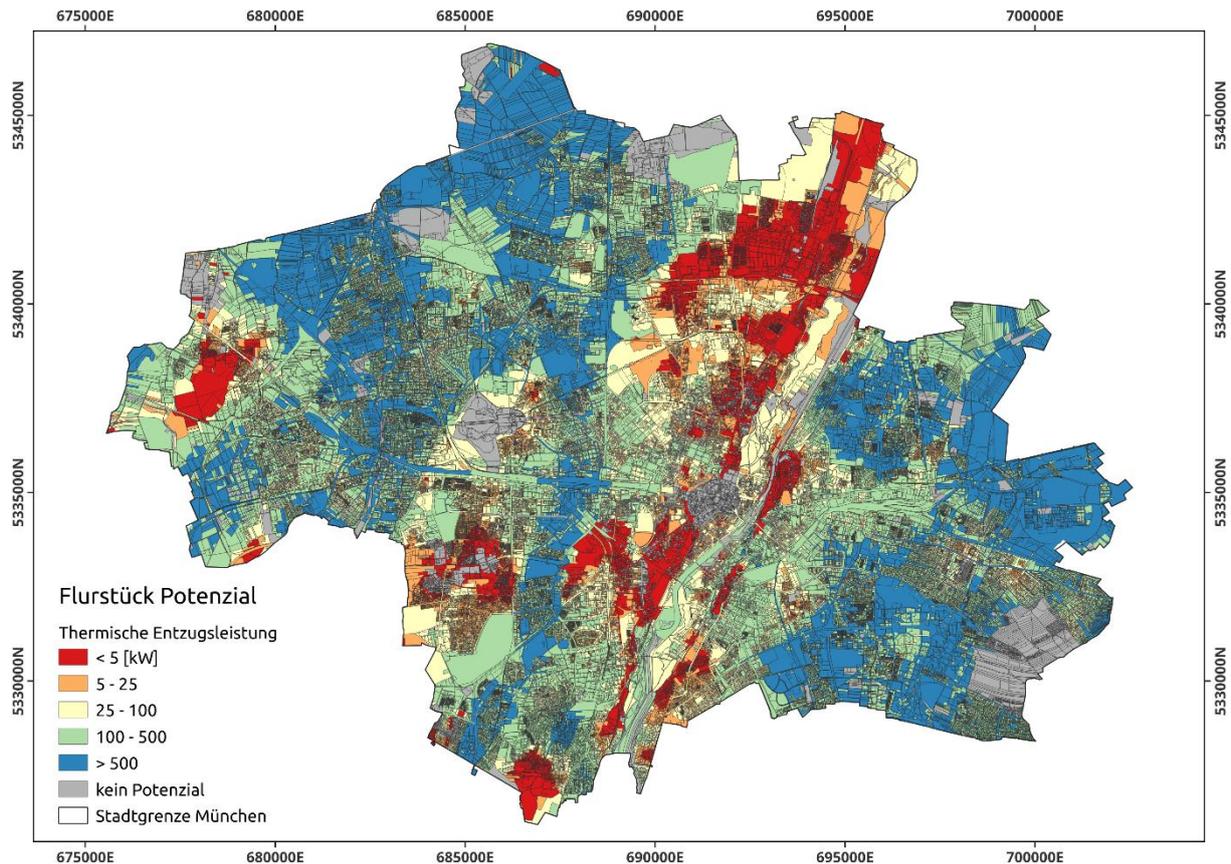


Abbildung 24: Ergebnis der flurstückscharfen Potenzialanalyse, bei der die technisch umsetzbare thermische Entzugsleistung auf dem jeweiligen Flurstück berechnet wurde.

Im Vergleich mit Abbildung 2a kann eine deutliche Abhängigkeit des Potenzials von der quartären Grundwassermächtigkeit beobachtet werden. Vor allem westlich der Isar führen tertiäre Rinnenstrukturen zu hohen Potenzialen. In Abbildung 24 kann dieser Einfluss besonders entlang der Würmtalrinne und zwischen Würm und Isar in der Waldfriedhof-Neuhausener Rinne beobachtet werden (Rinnenbeschreibung siehe Zosseder et al., 2022). Östlich der Isar ist das tertiäre Relief weniger stark ausgeprägt, was zu hohen grundwassererfüllten Mächtigkeiten und auch Potenzialen führt. Die Mächtigkeit ist vor allem entlang der westlichen Isarseite und am östlichen Isarhochufer der begrenzende Faktor, da in Bereichen mit geringer grundwassererfüllter Mächtigkeit die maximale Absenkung schneller erreicht wird. Zusätzlich liegt im Bereich der Aubinger Lohe ein Tertiärer Höhenrücken und auch die Hochflächen im Raum Pasing-Hadern und Forstenried-Solln begrenzen das Potenzial gebietsweise.

Hinsichtlich der Flurabstände muss nur in wenigen Bereichen der Stadt mit Einschränkungen gerechnet werden. Im Vergleich mit Abbildung 2d ist zu sehen, dass niedrige Flurabstände im Bereich nördlich und westlich der Aubinger Lohe, in der Fasanerie, am Hasenberg und in Johanneskirchen das Potenzial aufgrund begrenzter Wiedereinleitung verringern können. Generell muss beachtet werden, dass niedrige Flurabstände normalerweise wünschenswert sind, da sich dadurch auch die Kosten für den Brunnenbau reduzieren. Aufgrund von höheren Flurabständen (>15 m) südlich von Hadern und Obersendling sollten daher Bau- und Betriebskosten bei kleineren Grundwasserwärmepumpen in der Wirtschaftlichkeitsberechnung detailliert geprüft werden. Der Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit und des hydraulischen Gradienten kann im Vergleich mit Abbildung 2c ebenfalls lokal beobachtet werden, wirkt sich allerdings gesamtstädtisch gesehen nur untergeordnet aus.

Als entscheidender Wert für die Berechnung der thermischen Entzugsleistung, setzt sich die technisch umsetzbare Entnahmerate aus dem Minimum der drei maßgeblichen Entnahmeraten zu Absenkung, Aufstau und hydraulischem Kurzschluss zusammen (siehe Kapitel II.2). Hinsichtlich der Potenzialberechnung ist nun interessant, inwiefern die einzelnen Beschränkungen das technische Potenzial steuern. Hierbei ergab sich, dass in 79% der Flurstücke der hydraulische Kurzschluss den

begrenzenden Faktor dargestellt. In 20% der Flurstücke wirkt sich die Absenkungsbeschränkung von einem Drittel der grundwassererfüllten Mächtigkeit auf die flurstückscharfen Potenzialwerte aus und die restlichen 1% entfallen auf die Aufstaubeschränkung. Somit ist der hydraulische Kurzschluss, der hauptsächlich auf dem zu erreichenden Abstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen basiert, der dominante begrenzende Faktor für die technisch umsetzbare Entnahmerate aus Flurstückniveau.

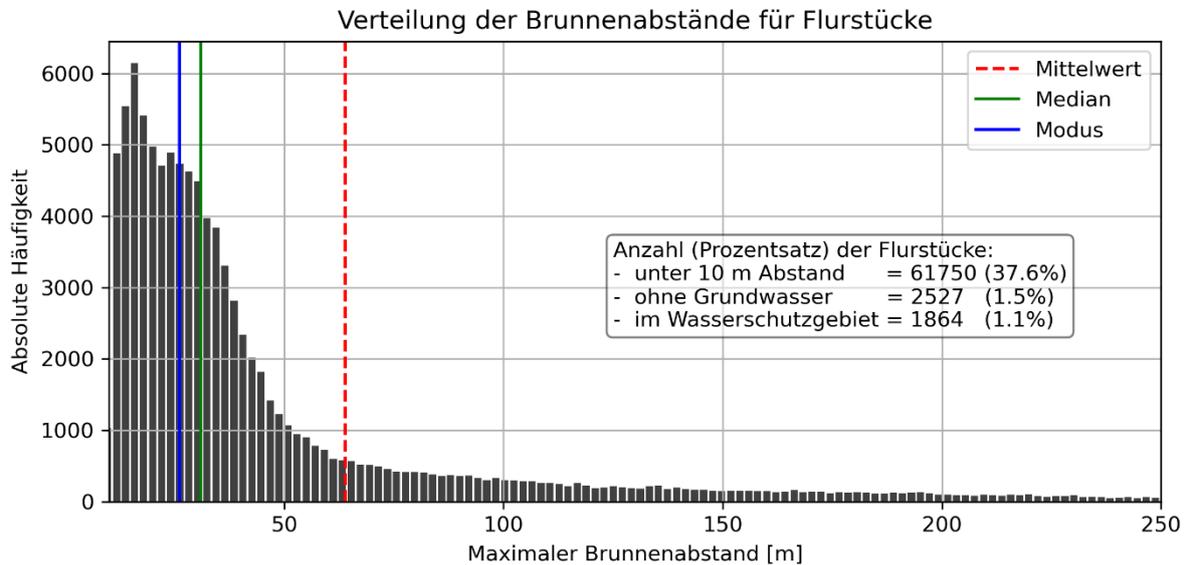


Abbildung 25: Histogramm der maximalen Brunnenabstände auf Flurstücken mit statistischen Kennwerten und einer Angabe der Häufigkeiten von zu keinen Flurstücken (unter 10 m Brunnenabstand), keiner Erkundung von quartärem Grundwasser und einer vollständigen Lage im Trinkwasserschutzgebiet.

Die stadtweite Verteilung der möglichen Brunnenabstände auf Flurstücken ist in Abbildung 25 detailliert dargestellt. Für die rechtsschiefe Verteilung ist zu beachten, dass die meisten Flurstücke, bei denen Brunnenabstände von über 100 m realisiert werden können, auf unbebaute Acker- Grün-, oder Parkflächen entfallen. Da das Histogramm ohne die Flurstücke dargestellt wurde, auf die die Box eingeht, wird deutlich, inwiefern der Platzmangel im dicht besiedelten urbanen Raum das Potenzial beschneidet. Für 38% der Flurstücke könnte kein genehmigungsfähiger Brunnenabstand von über 10 m bewerkstelligt werden und in den verbleibenden Flurstücken ist die Hälfte der Brunnenabstände geringer als 30 m (siehe Median in Abbildung 25). Dies bedeutet, dass vor allem in dicht besiedeltem Gebiet mit bevorzugt dezentraler Wärmeversorgung ein grundwassergestütztes Nahwärmenetz als Verbundlösung attraktiv ist. Eine entsprechende Analyse für die thermische Grundwassernutzung in derartigen Verbundlösungen bietet die baublockscharfe Potenzialanalyse, welche im folgenden Kapitel vorgestellt wird. Weitere potenzielle technische Lösungen für diese Gebiete können sogenannten Einbrunnen-Systeme liefern, bei denen aus nur einem Brunnen vertikal differenziert das Grundwasser entnommen und wieder eingeleitet wird. Derzeit prüft der Lehrstuhl Hydrogeologie der TUM in Kooperation mit dem RKU und des Stadtwerken München das technische Potenzial dieser Systeme zur Anwendung in München.

III.2.3 Ergebnisse der baublockscharfen Potenzialanalyse

Wie in Kapitel II.2 beschrieben, wurde auf Basis der TAP-Methode analog zur flurstückscharfen Potenzialanalyse auch eine baublockscharfe Analyse für die thermische Grundwassernutzung berechnet. Das Ergebnis für die thermische Entzugsleistung wird in Abbildung 26 stadtweit dargestellt. Die baublockscharfen Potenziale eignen sich insbesondere als Grundlage für die Machbarkeitsanalyse von grundwasserversorgten Nahwärmenetzen. Nahwärmenetze stellen neben dezentralen Grundwasserwärmepumpen zur Einzelversorgung einen weiteren wichtigen Baustein für die kommunale Wärmeplanung und Wärmewende dar. Besonders in dicht bebauten Gebieten kann durch den Zusammenschluss von Nachbarschaften innerhalb eines Nahwärmenetzes die thermische Grundwassernutzung erst möglich werden, da durch die bestehende Bebauung oft der Platz für den Bau von Förder- und Schluckbrunnen auf einzelnen Flurstücken fehlt. Analog zur Flurstücksanalyse gilt,

dass sich auch bei den Baublöcken die Gegenden mit hohem Potenzial gut vom Fernwärmegebiet abgrenzen und die Fernwärmeausbaustrategie in den dezentral versorgten Gebieten entsprechend ergänzen können.

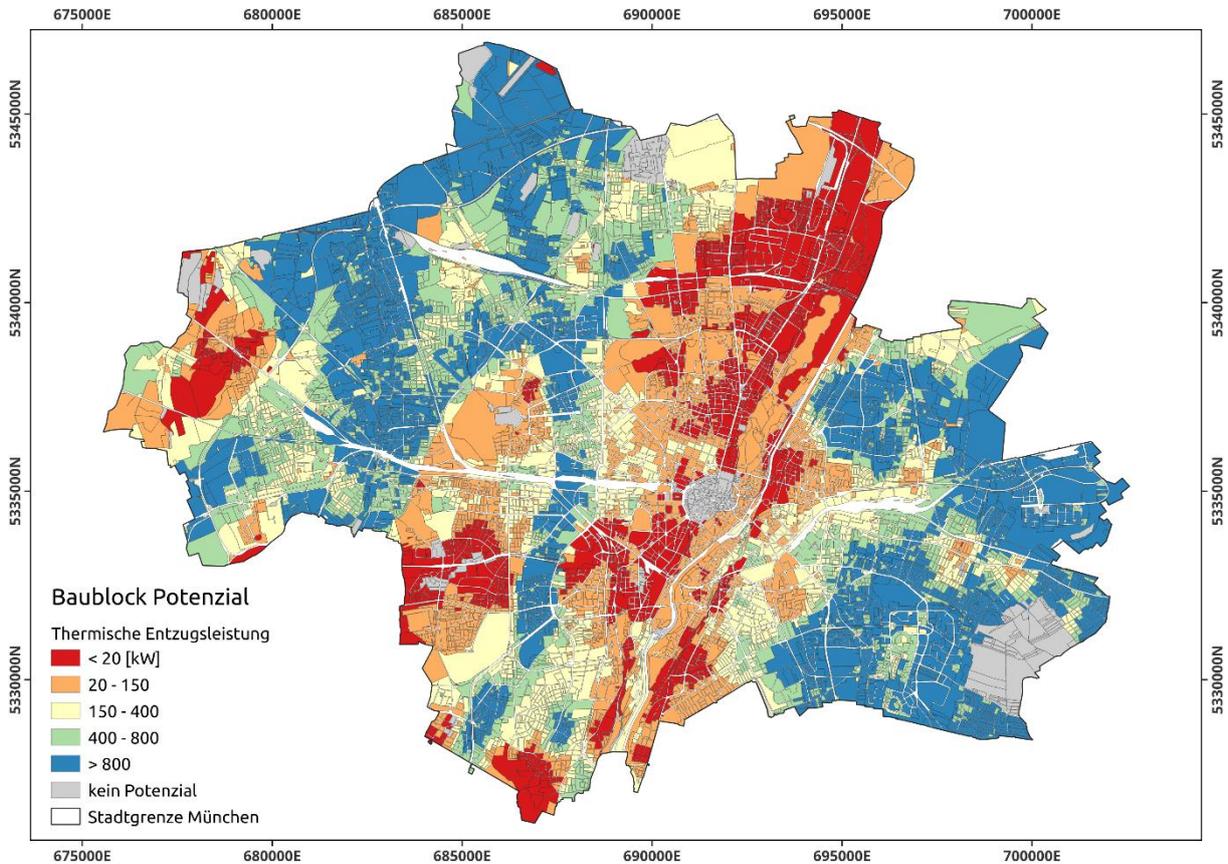


Abbildung 26: Ergebnis der baublöckscharfen Potenzialanalyse, bei der die technisch umsetzbare thermische Entzugsleistung auf dem jeweiligen Baublock berechnet wurde.

Da die Ergebnisse der Baublockanalyse auf denselben hydrogeologischen Grundlagen beruhen, wie die Flurstückanalyse, können auch hier Abhängigkeiten gegenüber der grundwassererfüllten Mächtigkeit und des Flurabstands beobachtet werden. Hinsichtlich der Potenzialberechnung ist bei den Baublöcken ebenfalls interessant, inwiefern die einzelnen Beschränkungen das technische Potenzial steuern. Es ergab sich, dass 51% der Baublöcke durch den hydraulischen Kurzschluss begrenzt werden. In 45% der Baublöcke stellt die Absenkungsbeschränkung von einem Drittel der Grundwassermächtigkeit den beschränkenden Faktor dar und die restlichen 4% entfallen auf die Aufstaubeschränkung. Der hydraulische Kurzschluss verliert somit im Vergleich mit der flurstückscharfen Analyse an Dominanz. Dieser Zusammenhang ist trivial, da auf Baublöcken größere Brunnenabstände realisiert werden können und damit die Absenkung während der Entnahme an Bedeutung gewinnt. Durch die generell höheren Entnahmeraten gewinnt auch die Begrenzung der Wiedereinleitung an Bedeutung.

Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, wirken sich die erhöhten Mächtigkeiten in der Würmtalrinne und der Waldfriedhof-Neuhausener Rinne signifikant auf die Potenzialwerte aus. Östlich der Isar führen die homogenen und höheren Mächtigkeiten ebenfalls zu gleichbleibend hohen Potenzialen. Wie oben erwähnt, haben Gebiete mit niedrigeren Mächtigkeiten in der Baublockanalyse einen stärkeren Einfluss auf die Potenzialergebnisse, da durch die größeren Brunnenabstände in Baublöcken die Absenkungsbeschränkung einen dominanteren Einfluss auf das technische Potenzial ausübt. Dementsprechend ist vor allem entlang der westlichen Isarseite und am östlichen Isarhochufer das Potenzial durch diesen Faktor eingeschränkt. Ebenso ist im Bereich der Aubinger Lohe und im Raum Pasing-Hadern und Forstenried-Solln das Potenzial begrenzt.

Die Flurabstände wirken sich räumlich analog zur Flurstückanalyse aus. Hier ist ebenfalls zu beachten, dass die schwache Einleitungsbeschränkung in der Baublockanalyse an Dominanz gewonnen hat und sich etwas stärker auswirkt. Da es sich bei den Brunnen für Nahwärmenetze generell um größere Anlagen handelt, sind auch die höheren Flurabstände im Stadtgebiet kein wirtschaftliches Ausschlusskriterium mehr, da die Bau- und Betriebskosten der Brunnen anteilig an der Gesamtanlage üblicherweise geringer ausfallen werden.

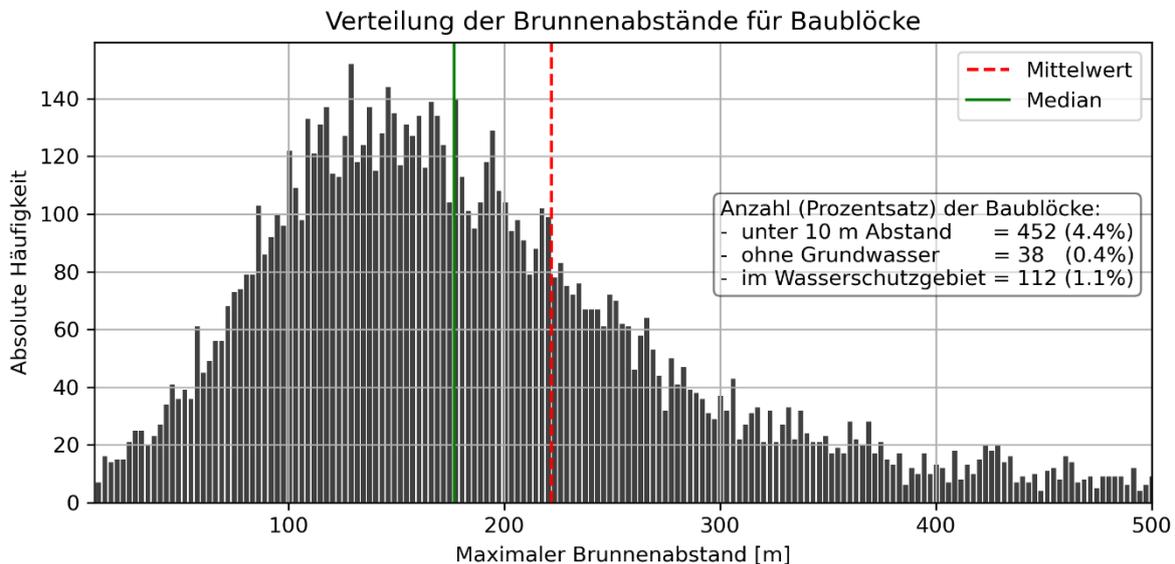


Abbildung 27: Histogramm der maximalen Brunnenabstände auf Baublöcken mit statistischen Kennwerten und einer Angabe der Häufigkeiten von zu keinen Baublöcken (unter 10 m Brunnenabstand), keiner Erkundung von quartärem Grundwasser und einer vollständigen Lage im Trinkwasserschutzgebiet.

Die stadtweite Verteilung der möglichen Brunnenabstände auf den Baublöcken ist in Abbildung 27 zu sehen. Im Vergleich mit der Auswertung zu den Flurstücken in Abbildung 25 fallen vor allem die höheren Abstände und die weniger rechtsschiefe Verteilung auf. Der Median der Brunnenabstände liegt bei ca. 175 m und nur noch ca. 4% der Baublöcke fallen durch zu geringe Brunnenabstände von unter 10 m aus der Analyse. Analog zur Flurstückanalyse entfallen auch hier sehr große Brunnenabstände auf Agrar- oder Parkflächen, die unbebaut sind.

In der Baublockanalyse wurde besonders durch die Aktivierung des größeren Platzangebots deutlich, welche Rolle die grundwassergestützte Nahwärmeversorgung zwischen der Fernwärme und der Einzelversorgung mit Grundwasserwärmepumpen einnehmen kann. Generell lässt sich gegenüber der Grundwasserwärmepumpe feststellen, dass durch die geringere Anzahl an Brunnen einfacher Freiflächen für den Brunnenbau gefunden werden können. Wenn nicht durch die Weißflächenkartierung bereits größere Bereiche ausgeschlossen wurden, konnten nach Abzug der 3 m Abstandfläche zur existierenden Bebauung stets geeignete Brunnenstandorte festgelegt werden. Da potenziell nun alle relevanten Werte vorliegen, wird im folgenden Schritt das zur Verfügung stehende Potenzial mit dem gebäudescharfen Wärmebedarf abgeglichen, um den möglichen Deckungsgrad für eine Versorgung mit thermischer Grundwassernutzung zu ermitteln.

III.2.4 Ergebnisse des Potenzialabgleichs mit dem bestehenden Wärmebedarf

Wie in Kapitel II.3 beschrieben, wurde nach der Berechnung des technischen Potenzials auf Flurstück- und Baublockbasis, ein Abgleich mit dem gebäudescharfen Bedarf vorgenommen. Das Ergebnis dieses Abgleichs ist die technisch installierbare Heizleistung, die mit Grundwasserwärmepumpen auf einem Flurstück oder mit einem Nahwärmenetz auf einem Baublock erreicht werden kann. Als grundlegende Bedarfsszenarien sind für den Abgleich, sowohl das Instandhaltungsszenario als auch Renovierungsszenarien auf Effizienzhaus (EH) 85, EH 70 und EH 55 betrachtet worden. So kann die maximale Ausbaugrenze des Ist-Zustands mit den reduzierten Wärmebedarfen durch Renovierung verglichen werden. Im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung wurden neben diesen grundlegenden Szenarien auch komplexere Multi-Agenten basierte Entwicklungsszenarien zur Ausarbeitung einer

Wärmewendestrategie untersucht. Die Entwicklungsszenarien werden in einem separaten Bericht zur Wärmestrategie der FfE näher erläutert und analysiert.

Zusätzlich umfasst der Abgleich auch die Integration der Wirtschaftlichkeitsgrenze, auf die im zweiten Teil des Kapitels II.3 näher eingegangen wird. Hierbei werden übermäßig hohe Brunnenbaukosten zur Erschließung der Wärmequelle in Abhängigkeit der Anlagengröße als Limit herangezogen. Im Detail dürfen die variablen Kosten für den Brunnenbau nicht mehr als das Doppelte der Kosten des Wärmepumpenaggregats betragen. Die Auswirkung der Wirtschaftlichkeitsgrenze im gesamten Stadtgebiet wird in Abbildung 28 dargestellt. Dazu wurde für jedes Flurstück, auf dem ein technisches Potenzial und ein Wärmebedarf vorhanden ist, das Verhältnis der variablen Invest-Kosten (c_{limit}) durch Gleichung 8 für alle Sanierungsszenarien berechnet und als Histogramm aufgetragen. Zusätzlich ist die gewählte Wirtschaftlichkeitsgrenze von 2 als vertikale Linie (rot) eingetragen. Das Ergebnis zeigt, dass stadtweit nur ein geringer Teil der Grundwasserwärmepumpen durch die gesetzte Grenze ausgeschlossen werden. Bei den meisten Anlagen sind die variablen Kosten des Brunnenbaus sogar niedriger als die Kosten für das Wärmepumpenaggregat, was durch die geringen Flurabstände in weiten Teilen der Stadt zu begründen ist (siehe Abbildung 2d). Bei einer Erhöhung des Gebäudeenergiestandards sinkt der Wärmebedarf und auch die Heizleistung, weshalb eine kleinere und günstigere Wärmepumpe eingebaut werden kann. Da die Brunnenbaukosten allerdings weitgehend durch den Flurabstand gesteuert werden, bleiben sie konstant und erhöhen sich relativ zu den Wärmepumpenkosten. Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, nimmt folglich auch der Anteil der durch die Wirtschaftlichkeitsgrenze ausgeschlossenen Anlagen bei höherem Sanierungsstandard zu. Im Detail werden im Instandhaltungsszenario 2,7 %, bei EH 85 8,7 %, bei EH 70 11,1 % und bei EH 55 12,8 % der Flurstücke durch die Grenze von 2 ausgeschlossen.

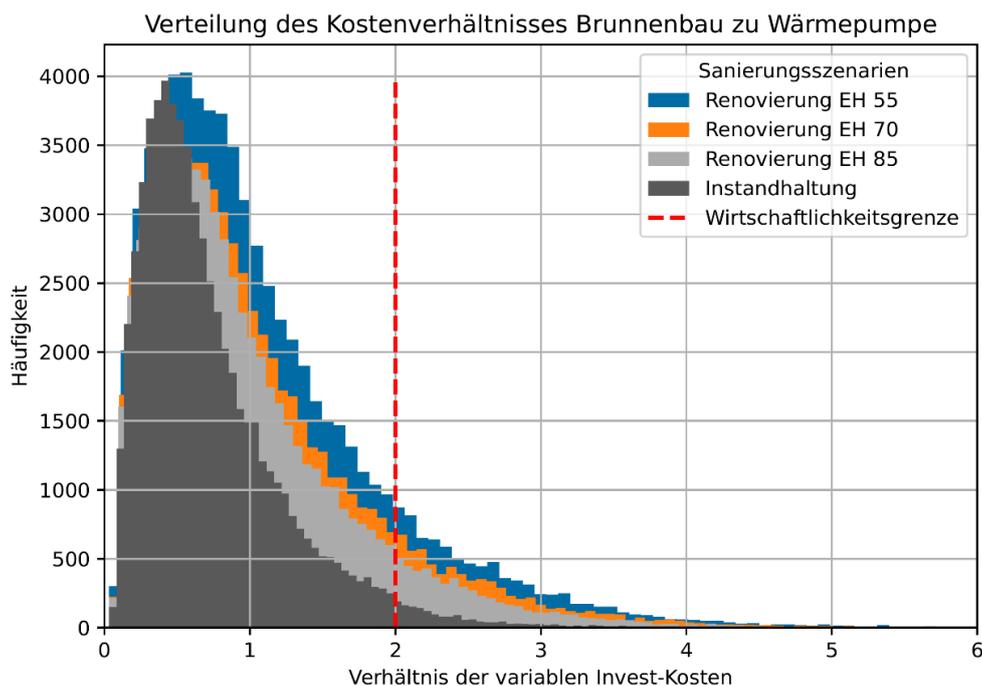


Abbildung 28: Stadtweite Verteilung des Verhältnisses der Investitionskosten von Brunnenbau zu Wärmepumpe für dezentrale Grundwasserwärmepumpen bei den unterschiedlichen Sanierungsszenarien mit der definierten Wirtschaftlichkeitsgrenze von 2 (rote gestrichelte Linie).

Die räumliche Auswirkung der Wirtschaftlichkeitsgrenze wird beispielhaft für das Instandhaltungsszenario am Stadtteil Solln in Abbildung 29 gezeigt. Der Flurabstand im gezeigten Kartenausschnitt ist mit ca. 20 m relativ hoch, wodurch kleinere Anlagen, die Einfamilienhäuser versorgen, die Grenze von 2 überschreiten (rote Flurstücke). Im Vergleich mit Abbildung 14 kann nachvollzogen werden, dass es sich hierbei um Gebäude handelt, die eine Wärmepumpenleistung von knapp unter 10 kW benötigen würden. Ähnliche Verhältnisse wie in Solln finden sich noch in Harlaching auf dem Isarhochufer entlang des Perlacher Forsts. Im Übrigen Stadtgebiet sind die Flurabstände geringer, wodurch auch eine Versorgung von Einfamilienhäusern im Potenzialabgleich aufgenommen wird.

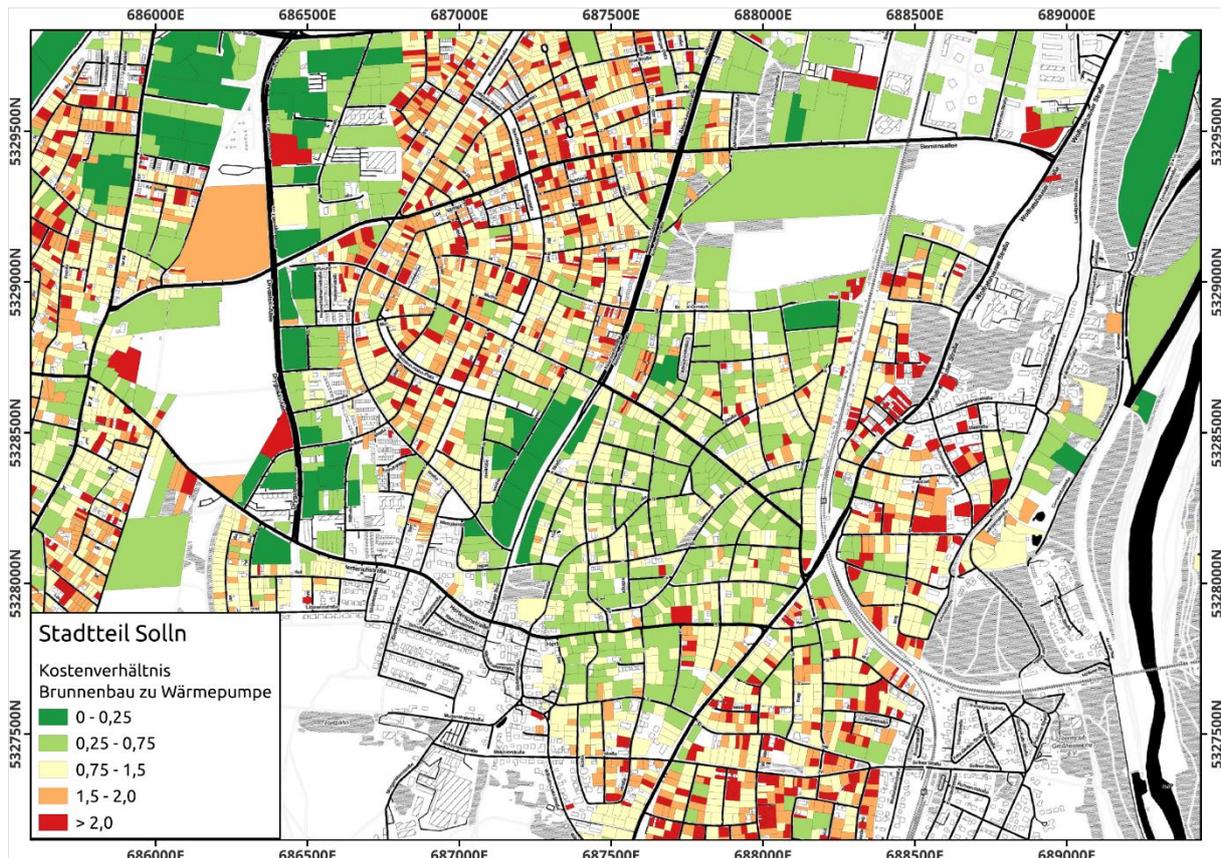


Abbildung 29: Verteilung des Kostenverhältnisses im Stadtteil Solln für das Instandhaltungsszenario, in dem sich Einfamilienhäuser mit relativ hohen Flurabständen räumlich überschneiden und daher das Wirtschaftlichkeitskriterium von 2 überschreiten.

Nach dem Ausschluss der Flurstücke mit einem Wirtschaftlichkeitskriterium größer 2 kann abschließend der technisch mögliche Deckungsgrad des Wärmebedarfs für Grundwasserwärmepumpen auf jedem Flurstück berechnet werden. Das Ergebnis für den Wärmebedarf des Instandhaltungsszenarios ist in Abbildung 30 zu sehen. Besonders auffällig sind die scharfen Grenzen, die zwischen dem Deckungsgrad 0 – 20 % (rote Flächen) und 80 – 100 % (dunkelgrüne Flächen) existieren. Die Charakteristik beruht auf den hydrogeologischen Begebenheiten und ist, wie bereits in Kapitel II.2.2 beschrieben, vor allem auf die räumliche Ausprägung der grundwassererfüllten Mächtigkeit zurückzuführen (siehe Abbildung 2a). Der Zusammenhang ist bereits bei den Ergebnissen der technischen Potenzialanalyse in Abbildung 24 zu erkennen und verstärkt sich durch den Abgleich mit dem Wärmebedarf zusätzlich. Östlich der Isar können abseits des Isar Hochufers und des Truderinger Wasserschutzgebiets die meisten Gebäude dezentral mit Grundwasserwärmepumpen versorgt werden. Lediglich um den Giesinger Bahnhof und um den Bajuwarenpark in Trudering gibt es aufgrund von einer geringeren hydraulischen Durchlässigkeit kleinräumigere Einschränkungen. Westlich der Isar können vor allem Gebiete mit niedrigen grundwassererfüllten Mächtigkeiten nicht ausreichend versorgt werden. Hier treffen die Wärmelasten größerer Gebäude auf sehr geringe Mächtigkeiten bzw. Bereiche ohne quartäres Grundwasser. Dazu zählen weite Teile von Schwabing-Freimann und Milbertshofen-Am Hart im Norden, Schwabing-West, Maxvorstadt, Altstadt-Lehel und Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt im Zentrum und Sendling im Süden. Des Weiteren existiert eine tertiäre Hochfläche im Bereich Hadern und im westlichen Laim, die großräumig eine Nutzung von Grundwasserwärmepumpen ausschließt. Demgegenüber stehen weiträumige Gebiete im Westen und Nordwesten des Stadtgebiets in denen sich nur sehr große Nutzer nicht versorgen könnten. Zusätzlich fällt auch in Abbildung 30 die tertiäre Struktur der Waldfriedhof-Neuhausener Rinne auf, die auf ihrer gesamten Breite zu einem sehr hohen Deckungsgrad führt. Generell lässt sich für das gesamte Stadtgebiet zusammenfassen, dass ein signifikanter Anteil der Gebäude in München außerhalb des Stadtkerns für eine Wärmeversorgung mit Grundwasserwärmepumpen in Frage kommt.

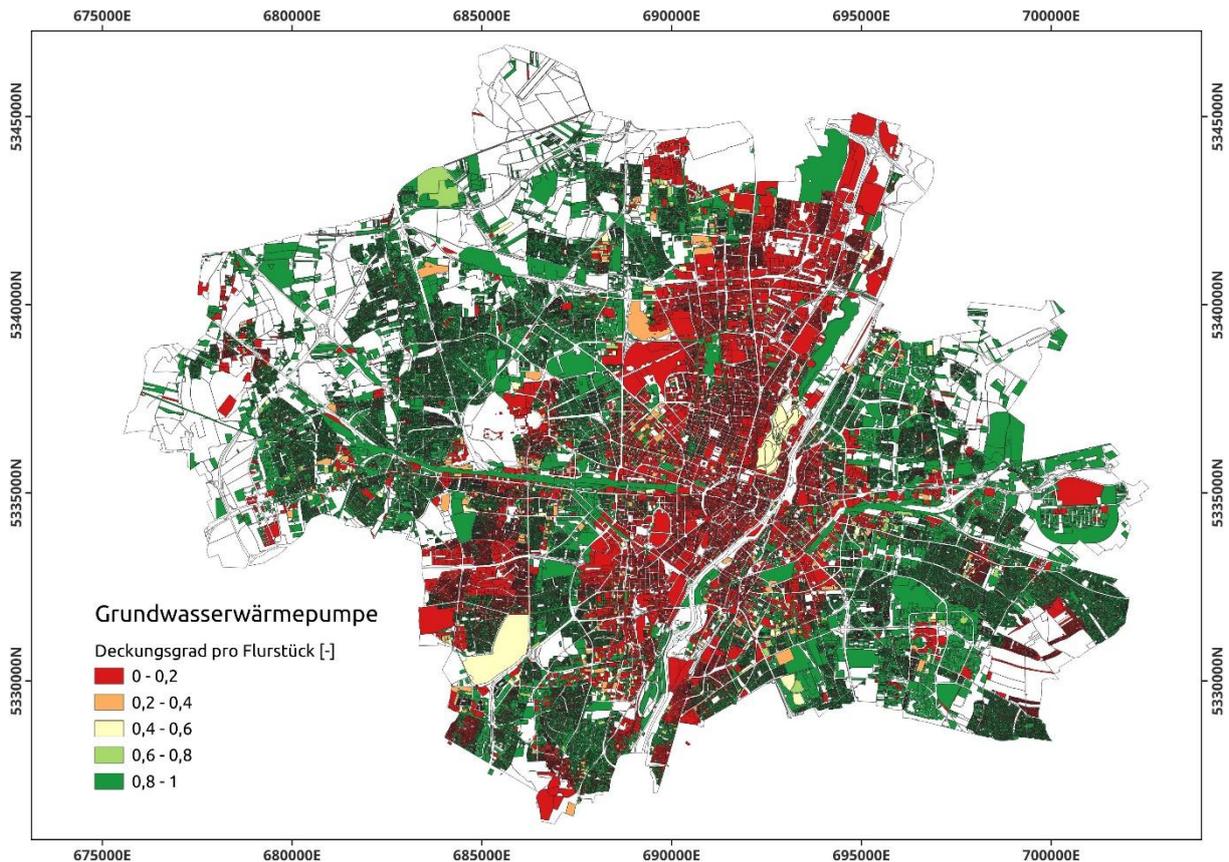


Abbildung 30: Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch einen flurstückscharfen Potenzialabgleich, bei dem die nötige Heizleistung für Raumwärme und Trinkwarmwasser des Instandhaltungsszenarios der einzelnen Gebäude auf einem Flurstück mit dem vorhandenen technischen Potenzial abgeglichen wurde.

Zusätzlich zur dezentralen Versorgung mit Grundwasserwärmepumpen wurde, wie in Kapitel II.2.3 erläutert, das Potenzial für grundwassergestützte Nahwärmenetze auf Baublockebene bestimmt und ebenfalls mit dem bestehenden Wärmebedarf auf dem jeweiligen Baublock abgeglichen. Das stadtweite Ergebnis ist in Abbildung 31 visualisiert. Analog zu den hydrogeologischen Zusammenhängen beim Abgleich für Grundwasserwärmepumpen auf Flurstückebene, sind hier ebenfalls die technischen Potenziale aus Abbildung 26 wieder zu erkennen. Da Wärmenetze besonders wirtschaftlich sind, wenn eine hohe Anschlussquote erreicht wird, sollten nur Baublöcke mit mindestens 80 % Deckungsgrad als geeignet eingestuft werden.

Zur Interpretation der Ergebnisse muss einschränkend beachtet werden, dass auf Seiten des Verteilnetzes keine Analysen durchgeführt wurden. Es muss somit im Einzelfall geklärt werden, ob eine ausreichende Belegungsdichte vorhanden ist. Folglich bleibt auch die Art der Ausführung als klassisches bzw. Kaltes Nahwärmenetz oder bei geeigneter Bebauung als Gebäudenetz offen. Derartige Umsetzungsentscheidungen unterliegen dynamischen Marktpreisen, die anhand einer jeweils aktuellen Wirtschaftlichkeitsberechnung getroffen werden müssen und somit kein Bestandteil der Wärmeplanung sind. Das Vorgehen ist entsprechend an die Ziele der kommunalen Wärmeplanung angepasst und bietet konservative und beständige Analysen. Fragen zur Ausführung oder Trassenplanung werden nicht durch die Wärmeplanung aufgegriffen und bleiben elementare Bestandteile des individuellen Planungsprozesses.

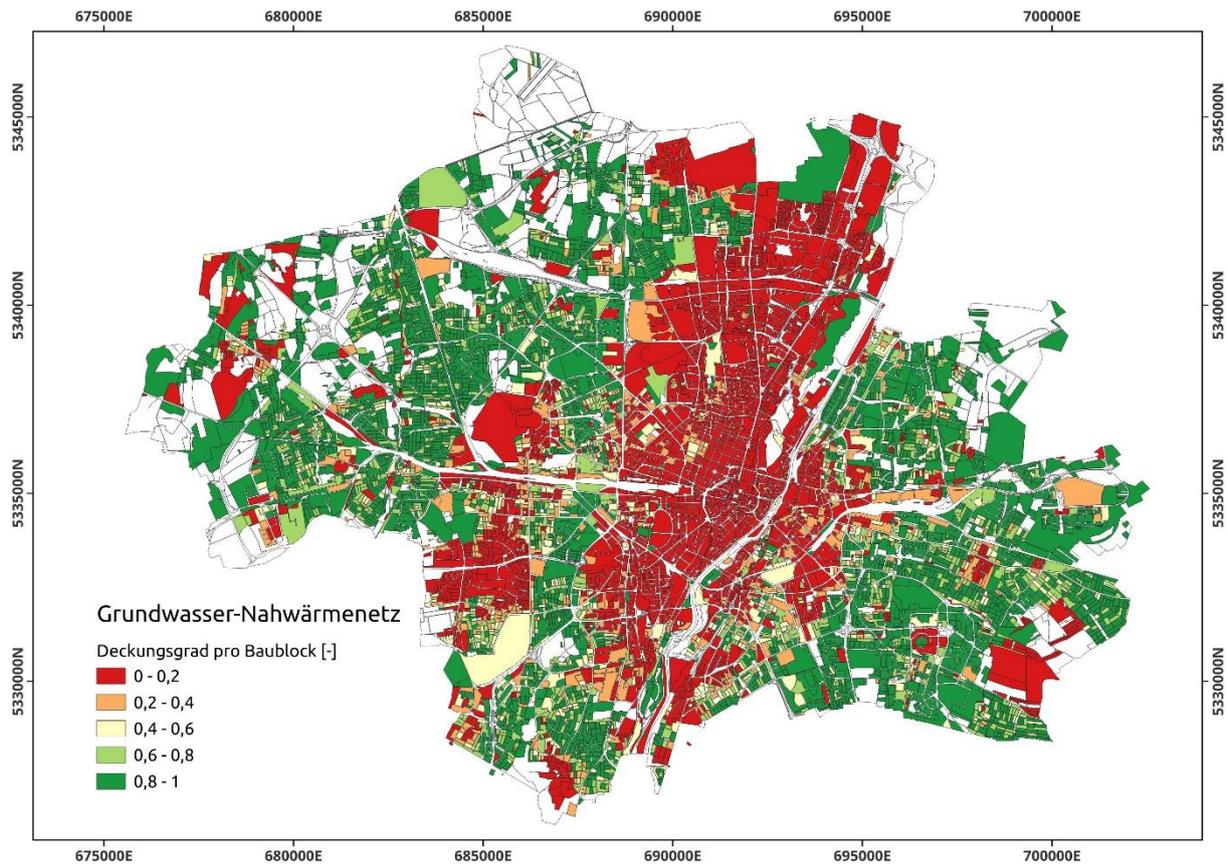


Abbildung 31: Deckungsgrad des Wärmebedarfs durch einen baublockscharfen Potenzialabgleich, bei dem die nötige Heizleistung für Raumwärme und Trinkwarmwasser des Instandhaltungsszenarios der einzelnen Gebäude auf einem Baublock mit dem vorhandenen technischen Potenzial abgeglichen wurde.

In der stadtweiten Bewertung der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass unabhängig vom Entzugssystem knapp 40 % des Wärmebedarfs durch thermische Grundwassernutzung gedeckt werden könnten. Zusätzlich zum Instandhaltungsszenario wurde der Potenzialabgleich auch mit stadtweit einheitlichen Sanierungsszenarien auf den EH 85, EH 70 und EH 55 Standard durchgeführt. In Abbildung 32 ist der jeweils versorgbare Anteil des Wärmebedarfs der beiden Entzugssysteme für die unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Für beide Entzugssysteme lässt sich feststellen, dass der versorgbare Anteil mit zunehmender Sanierung von ca. 38 % auf ca. 45 % steigt. In den Sanierungsszenarien sinkt der Wärmebedarf, wodurch das vorhandene Potenzial für Gebäude mit verbessertem Energiestandard zunehmend für eine Versorgung ausreicht. Anhand der in Abbildung 30 und Abbildung 31 zu sehenden „scharfen“ Grenzen zwischen Gebieten mit geringem Deckungsgrad (0 – 20%) und Gebieten mit hohem Deckungsgrad (80 – 100%) wirkt sich der verbesserte Energiestandard moderat positiv auf den versorgbaren Anteil aus.

Im Vergleich zwischen den beiden Entzugssystemen ist aus Abbildung 32 ersichtlich, dass sich der versorgbare Anteil nicht signifikant unterscheidet. Interessanterweise weist die Grundwasserpumpe im Abgleich des technischen Potenzials ohne Nachbarschaftsbetrachtung (negative Beeinflussung der Anlagen untereinander) für das Instandhaltungsszenario einen leicht höheren Anteil als das Grundwasser-Nahwärmenetz auf. Bei den Sanierungsszenarien liegt dann der Anteil des Grundwasser-Nahwärmenetz höher und baut seinen Vorsprung bei zunehmender Sanierung weiter aus. Dies liegt vor allen daran, dass der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen häufiger durch beengte Platzverhältnisse verhindert wird (vgl. Abbildung 25 und Abbildung 27). Somit kann der Versorgungsgrad in Grundwasser-Nahwärmenetzen stärker von der Reduktion des Wärmebedarfs durch Sanierung profitieren.

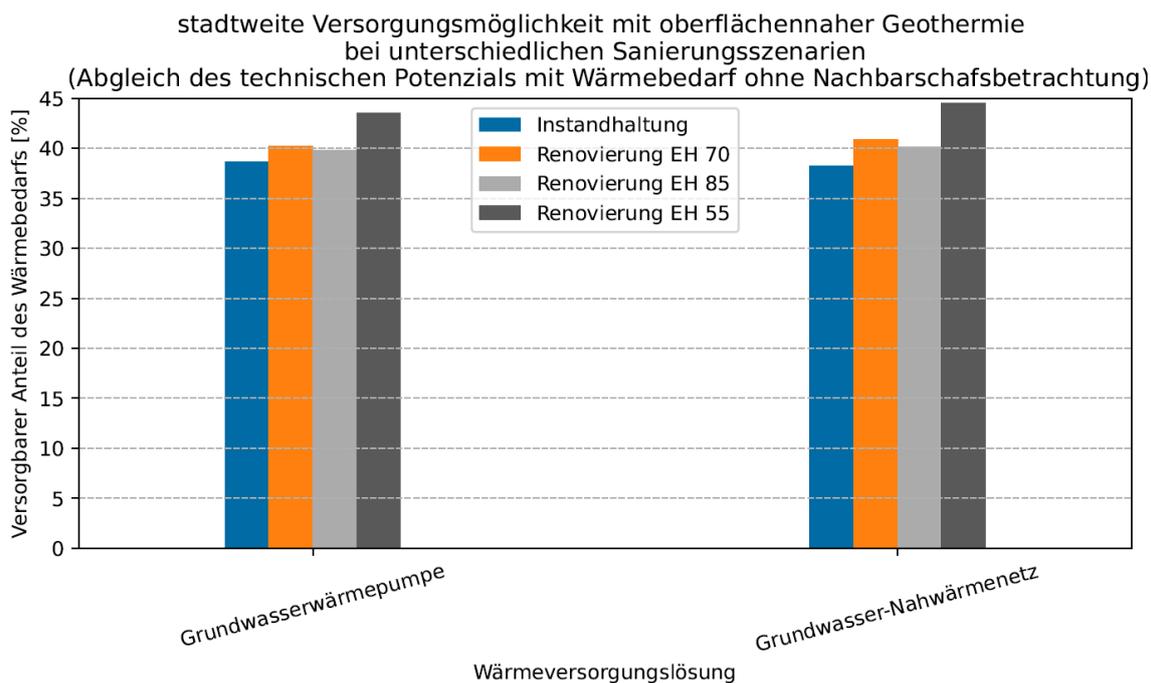


Abbildung 32: Balkendiagramm zum stadtweiten Anteil des technisch versorgbaren Wärmebedarfs je Wärmeversorgungslösung und Sanierungsszenario ohne Optimierung des räumlichen Ausbaus (keine Nachbarschaftsbetrachtung).

Einschränkend muss beachtet werden, dass der Vergleich nur für technische Potenziale durchgeführt wurde. Vor allem bei Grundwasserwärmepumpen kommen für eine gesamtstädtische Betrachtung des räumlich verfügbaren Potenzials noch Limitationen durch eine mögliche negative thermische Beeinflussung der Anlagen untereinander in Betracht. Eine Untersuchung des räumlichen Potenzials durch einen optimierten Ausbau und eine Kopplung mit dem Modell München ist Inhalt des folgenden Kapitels.

III.3 Ergebnisse der räumlichen Optimierung

Wie in Kapitel II.1 zur Erläuterung der Potenzialbegriffe beschrieben, ist nur das räumliche Potenzial geeignet, um eine gesamtstädtische Abschätzung zum Beitrag der thermischen Grundwassernutzung in der zukünftigen Wärmeversorgung treffen zu können. Zur Integration der Grundwassernutzung in die kommunale Wärmeplanung der Stadt werden sowohl für die Szenarien, die einheitlich den Wärmebedarf bei Instandhaltung und Renovierung definieren, als auch für die Multi-Agenten Simulationen, die Wärmewendeszenarien untersuchen, Optimierungsrechnungen durchgeführt (siehe Kapitel II.4.4). In diesem Kapitel werden beispielhaft die Ergebnisse der Optimierung des Instandhaltungsszenarios dargestellt und final mit den Renovierungsszenarien verglichen. Die weiteren Ergebnisse der Wärmewendeszenarien sind nicht Bestandteil dieses Berichts.

Das Ergebnis der Optimierung ist die maximale Nutzung des thermischen Potenzials im optimierten Gebiet. Hierfür wird, wie in Kapitel II.4.3 beschrieben, die Stadt in sich überlappende Optimierungsgebiete unterteilt. Die Lösung des Optimierungsproblems enthält sowohl die Information, welche Grundwasserwärmepumpen umsetzbar sind als auch wo die Brunnen für geeignete Anlagen positioniert werden müssen, um ein optimales Temperaturfeld zu erhalten, in dem sich die Anlagen nicht negativ thermisch beeinflussen. Hierbei werden auch bereits existierende Anlagen als Randbedingung berücksichtigt (siehe Kapitel II.4.2). Die Berechnung des Temperaturfelds wird mit der LAHM-Methode unter der vereinfachenden konservativen Annahme eines stationären Zustands durchgeführt (siehe Kapitel II.4.1).



Abbildung 33: Beispielhaftes optimiertes Ausbauszenario mit Temperaturfeldern der 1K-Kältefahnen in einer Nachbarschaft, welches sowohl eine optimale Brunnenpositionierung als auch die Berücksichtigung der bestehenden thermischen Heiz-Nutzungen darstellt.

Die Realisation eines optimierten Ausbaus für ein Beispielgebiet mit zur Darstellung randomisierten Wärmebedarfen ist in Abbildung 33 zu sehen. Es sind sowohl die vorab existierenden Entnahme- und Schluckbrunnen zu sehen, die einen vorgegebenen Rahmen für den möglichen Ausbau bilden, als auch die hypothetischen Brunnenstandorte für zusätzlich mögliche Brunnenpaare auf Flurstücken, die nach der Weißflächenkartierung und dem Abgleich mit dem technischen Potenzial bereits als geeignet eingestuft wurden (siehe Kapitel II.2). Zusätzlich sind die 1K-Temperaturanomalien der bei stationären Bedingungen entstehenden Kältefahnen abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die räumliche Nebenbedingung zum Ausschluss negativer thermischer Beeinflussung erfüllt ist, da keiner der optimierten Entnahmebrunnen (kleine rote Punkte) innerhalb einer Kältefahne (hellblaue Flächen) liegt. Eine berechtigte Ausnahme besteht bei den existierenden Entnahmebrunnen. Diese können zwar nicht durch die Kältefahnen neuer Schluckbrunnen beeinflusst werden, sehr wohl aber durch die Kältefahnen ihrer eigenen oder anderer bestehenden Schluckbrunnen. Im Zentrum und im Nordosten der Nachbarschaft kann dieser Zusammenhang beobachtet werden. Dass die bestehenden Anlagen aber dennoch so umgesetzt wurden, kann als Indiz für den konservativen Charakter der Temperaturfeldberechnung oder den ineffizienten Betrieb der Wärmepumpen gewertet werden.

Bei der Interpretation der nicht versorgten Flurstücke in Abbildung 33 muss zusätzlich beachtet werden, dass das Fehlen eines Brunnenpaares auch durch ein zu geringes Platzangebot zustande kommen kann. Generell lassen sich aber auch zweifelsfrei Flurstücke identifizieren, auf denen ausreichend Platz zur Verfügung steht und die Optimierung somit auf die Umsetzung einer Anlage zugunsten der räumlichen Potenzialmaximierung verzichtet hat. Analog zum gezeigten Beispiel wurde für alle in Abbildung 19 dargestellten Gebiete ein optimiertes Ausbauszenario berechnet. In den Optimierungsräumen wurde anschließend der Randbereich entfernt und im zentralen Aussageraum geprüft, wie hoch der Anteil der installierten Grundwasserwärmepumpen gegenüber den technisch möglichen Anlagen nach Weißflächenkartierung und Potenzialabgleich war (siehe Kapitel II.4.3). Aus den Optimierungsergebnissen wurde je Aussageraum das Verhältnis von installierten zu möglichen Anlagen gebildet und so der Anteil der installierbaren Leistung berechnet. Die Werte zwischen den

unterschiedlichen Aussageräumen wurden mit einer radialen Basisfunktion im gesamten Stadtgebiet interpoliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 34 dargestellt.

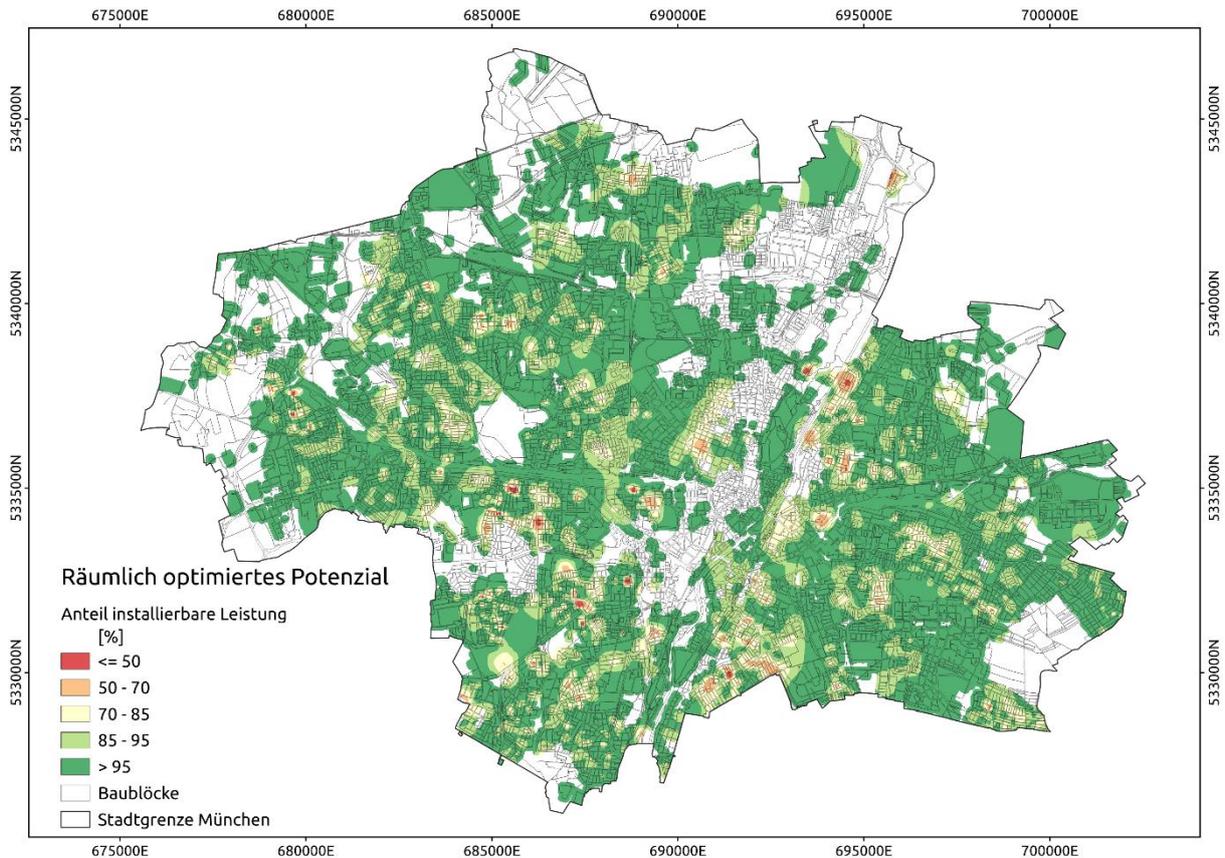


Abbildung 34: Stadtweites Ergebnis für die Umsetzbarkeit von Grundwasserwärmepumpen im Instandhaltungsszenario und der Annahme eines optimierten Ausbaus. Für die technisch versorgbaren Flurstücke ist der mögliche Anteil der installierbaren Leistung räumlich interpoliert dargestellt.

Grundlegend kann festgehalten werden, dass in weiten Teilen der Stadt durch die Optimierung des Ausbaus von Grundwasserwärmepumpen ein sehr hoher Anteil der technisch möglichen Anlagen (>95%) auch installiert werden kann. Lokal begrenzte geringere Anteile sind vor allem auf die Lage von bestehenden Nutzungen zurückzuführen, die im Abstrom ihrer Schluckbrunnen neue Entnahmebrunnen und im Zustrom ihrer Entnahmebrunnen neue Schluckbrunnen verhindern. Eine großflächigere Verringerung der installierbaren Leistung kann meistens auf Bereiche mit geringerem technischem Potenzial zurückgeführt werden. Hier bilden sich tendenziell größere Kältefahnen, da meist eine geringe Grundwassermächtigkeit ausschlaggebend für das geringe Potenzial ist. Durch den größeren thermischen Fußabdruck können in folglich in der Fläche weniger Anlagen installiert werden als in Gebieten mit höherer Grundwassermächtigkeit.

Die Optimierung des Ausbaus wurde nur für dezentrale Grundwasserwärmepumpen durchgeführt. Bei Grundwasser-Nahwärmenetzen sind die Freiheitsgrade zum Positionieren von Brunnen generell größer. Im Baublock müssen für Gemeinschaftsanlagen keine Abstandsflächen zu Flurstücksgrenzen eingehalten werden und eine Nutzung des öffentlichen Grunds ist ebenso möglich. Dadurch ergeben sich tendenziell höhere installierbare Anteile als bei Grundwasserwärmepumpen und Auswirkung auf das gesamtstädtische Potenzial wäre nicht mehr signifikant.

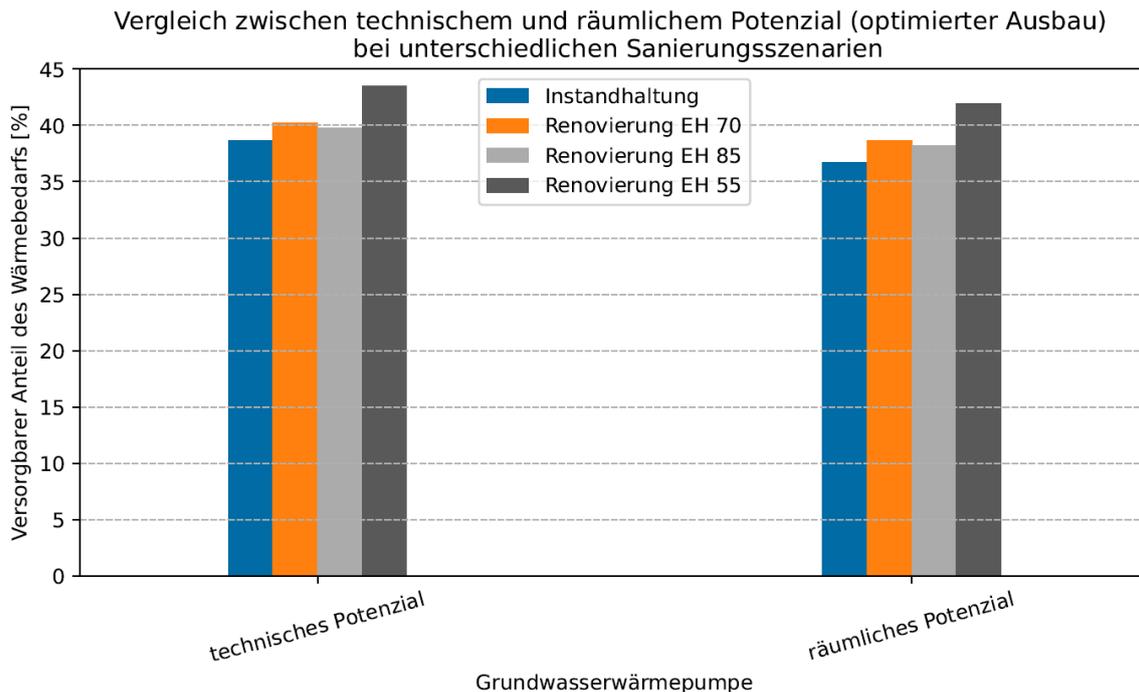


Abbildung 35: Balkendiagramm zur Gegenüberstellung des technisch und räumlich versorgbaren Wärmebedarfs für Grundwasserwärmepumpen je Sanierungsszenario (Optimierung des räumlichen Ausbaus).

Die gesamtstädtische Auswirkung der Potenzialreduktion durch die räumliche Optimierung bei Grundwasserwärmepumpen ist in Abbildung 35 zu sehen. Der versorgbare Anteil des Wärmebedarfs verringert sich bei dem Instandhaltungsszenario mit 1,9% am stärksten. Bei den unterschiedlichen Sanierungsszenarien liegt die Verringerung recht einheitlich bei ca. 1,6%. Durch die Förderung eines optimierten Ausbaus in der Praxis kann folglich ein signifikant größeres räumliches Potenzial erschlossen werden, als durch einen ungerichteten Ausbau. So kann die thermische Grundwassernutzung nicht nur im Sinne der Wärmewende einen größeren Beitrag für eine regenerative Wärmeversorgung leisten, sondern der anthropogenen Erwärmung des Grundwassers durch die urbane Wärmeinsel kann auch effizienter entgegengewirkt werden.

IV Inwertsetzung für die kommunale Wärmeplanung

Der Einsatz der vorgestellten Methoden und entstandenen Datensätze kann auf vielfältige Weise den Zielen der kommunalen Wärmeplanung dienen. Grundlegend sollen die erarbeiteten Potenzialanalysen zur Abgrenzung von Eignungsgebieten herangezogen werden, die in der kommunalen Wärmeplanung als Leitplanken zur Empfehlung verschiedener Versorgungstechnologien genutzt werden. In Bezug auf die thermische Grundwassernutzung muss hervorgehoben werden, dass Eignungsgebiete keine statischen Ergebnisse sein dürfen, sondern bei veränderten Rahmenbedingungen (Installation neuer Nutzungen, Veränderung der Grundwasserdynamik, etc.) fortgeschrieben werden müssen. Ein Vorschlag zur Definition von Eignungsgebieten und zur Einordnung der thermischen Grundwassernutzung zwischen den alternativen Technologien wird im folgenden Kapitel gegeben. Abschließend wird eine Zusammenfassung gegeben und die Inwertsetzung der Ergebnisse im breiteren Umfeld der Wärmeplanung diskutiert.

IV.1 Definition von Eignungsgebieten

Wie eingangs erläutert, dienen Eignungsgebiete in der kommunalen Wärmeplanung der generellen Orientierung über verschiedene Versorgungsmöglichkeiten und sollten die Abschätzung einer initialen Machbarkeit erleichtern. Da zum Zeitpunkt der Berichtsfassung die Bundesgesetzgebung zum Gebäudeenergiegesetz und zum Wärmeplanungsgesetz noch nicht abgeschlossen ist, bleibt vorerst unklar, welche rechtlichen Auswirkungen Eignungsgebiete ggf. in einer Wärmesatzung entfalten können. Diese rechtlichen Themen werden allerdings noch im Detail durch eine parallel laufende Studie der Kanzlei AVR aufgearbeitet (Muffler & Spieler 2023, Sandrock et al. 2023). Insbesondere muss festgehalten werden, dass durch die Ausweisung von Eignungsgebieten keine Außenrechtsverbindlichkeiten oder Versorgungsansprüche abgeleitet werden können. Auch eine individuelle Fachplanung wird weder durch Eignungsgebiete noch durch die vorgestellten Potenzialanalysen ersetzt und ist zwingend für den Bau und die Genehmigung einer thermischen Grundwassernutzung erforderlich.

Generell ist festgelegt worden, dass die Wärmeplanung auf dem Skalenniveau der Baublockebene arbeiten soll. Auf dieser Grundlage wird vorgeschlagen einen Baublock als geeignet einzustufen, wenn mindestens 80% des Wärmebedarfs (Instandhaltungsszenarios) durch das vorhandene technische Potenzial gedeckt werden können. Der Grenzwert von 80% wurde gewählt, um robuster gegenüber Ausreißern beim Wärmebedarf durch beispielsweise Sondernutzungen zu sein und eine gewisse Flexibilität gegenüber anderen Technologien zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen sollte sowohl für Grundwasserwärmepumpen als auch für Grundwasser-Nahwärmenetze einheitlich definiert werden. Dies setzt voraus, dass die Deckungsgrade für Grundwasserwärmepumpen von Flurstück- auf Baublockebene aggregiert werden müssen. Insbesondere bei Grundwasserwärmepumpen muss hervorgehoben werden, dass das technische Potenzial dem räumlichen Potenzial für die Definition von Eignungsgebieten vorzuziehen ist, da hier ausgehend vom Status-quo einzelnen Interessierten die Entscheidung für oder gegen eine Grundwasserwärmepumpe erleichtert werden soll. Einem potenziellen Investor auf einem Flurstück, das in der Optimierung eines maximalen Ausbaus nicht zum Zug gekommen ist, keine Eignung zu bescheinigen, würde dessen Motivation, zur Wärmewende beizutragen, unterminieren. Außerdem gilt in der Genehmigungspraxis aktuell das „first come – first served“ Prinzip. Ebenso ist ungewiss, ob sich die Nachbarn, die sich laut Optimierung für eine Grundwasserwärmepumpe entscheiden sollen, dies in der Realität auch wirklich tun.

Da die Eignungsgebiete für jede Versorgungstechnologie unabhängig festgelegt werden, können an einigen Stellen der Stadt mehrere verschiedene Technologien genutzt werden. Aufgabe der Wärmeplanung ist es zusätzlich, bei Überschneidungen eine Priorisierung von Technologien zu erarbeiten. Hierbei wird für die Eingliederung der thermischen Grundwassernutzung in die alternativen Technologien folgendes Ranking vorgeschlagen:

1. Fernwärmenetz (inkl. zukünftigem Ausbau)
2. Dezentrale Grundwasserwärmepumpen
3. Semi-zentrale Grundwasser-Nahwärmenetze
4. Erdwärmekollektoren (Grabenkollektor)
5. Luftwärmepumpen

Dem Fernwärmenetz sollte stadtweit der Vorzug gegeben werden, da die Fernwärme perspektivisch emissionsarm durch tiefe Geothermie versorgt wird und eine Verdichtung und partielle Erweiterung (bei gleichzeitiger Dekarbonisierung) einen Beitrag zur Refinanzierung des Netzes und zur Resilienz der Wärmeversorgung darstellt. In den dezentralen Bereichen sollten die Entzugssysteme der oberflächennahen Geothermie gegenüber der Luftwärmepumpe priorisiert werden. Dies ist vor allem in der tendenziell höheren Effizienz begründet. Da die kommunale Wärmeplanung vor allem den Gebäudebestand fokussiert, sind die Vorlauftemperaturen im Heizkreis höher als im Neubau und auch das Verhältnis zwischen Heizwärme und Trinkwarmwasserbereitung liegt im Schwerpunkt bei der Heizwärme. Die Heizlast ist demnach im Winter an höchsten und verstärkt sich, je kälter die Außenluft wird. Die Effizienz von Luftwärmepumpen verringert sich durch die Vergrößerung des nötigen Temperaturhubs stetig, wodurch mehr Strom benötigt wird. Zudem ist es üblich, einen elektrischen Heizstab für besonders niedrige Temperaturen einzubauen, um die abnehmende Heizleistung der Wärmepumpe zu kompensieren. In einer zukünftig klimaneutralen Stromversorgung werden wir

allerdings vor allem auf die Erzeugung durch Windkraft und Photovoltaik angewiesen sein, welche im Winter nur in geringem Maße zur Verfügung stehen oder durch das höhere Risiko einer sogenannten Dunkelflaute sogar vollkommen wegfallen kann. Daher ist es volkswirtschaftlich sinnvoll, im Wärmepumpensektor auf die effizientesten Wärmequellen zu setzen, um den Strombedarf und die Lastspitzen im Winter so gering wie möglich zu halten. Die Grundwassertemperatur liegt auch am kältesten Tag des Jahres im stadtweiten Durchschnitt bei ca. 12,5°C.

Innerhalb der oberflächennahen Geothermie wird ebenfalls aus Effizienzgründen die thermischen Grundwassernutzung gegenüber dem Grabenkollektor bevorzugt. Dezentrale Grundwasserwärmepumpen werden gegenüber Nahwärmenetzen bevorzugt, da hier die Umsetzung einfacher ist und weniger Akteure beteiligt sind. Zusätzlich sind Grundwasser-Nahwärmenetze weniger leicht zu standardisieren. Beispielsweise werden auf Seiten des Verteilnetzes in der Potenzialanalyse keine Vorgaben gemacht. Die Ausführung als klassisches bzw. Kaltes Nahwärmenetz oder bei geeigneter Bebauung als Gebäudenetz bleibt also offen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Analysen im Wärmeplan konservativ, flexibel und beständig zu gestalten. Fragen zur Ausführung oder Trassenplanung sind Bestandteil des Planungsprozesses. Diesbezügliche Umsetzungsentscheidungen unterliegen zum Teil hoch dynamischen Marktpreisen, die anhand einer jeweils aktuellen Wirtschaftlichkeitsberechnung getroffen werden müssen und somit im Wärmeplan ausgeklammert werden. Zusätzlich muss bedacht werden, dass ein für dezentrale Grundwasserwärmepumpen ausgewiesenes Gebiet nicht ausschließt, dass sich auch hier Nahwärmenetze etablieren (zum Bsp. wegen besonders gut gelingender Kooperation der Akteure vor Ort). Nahwärmenetze bieten besonders in dicht bebauten Gegenden die Chance, Gebäude ohne ausreichend Platz für den Brunnenbau auf dem eigenen Grundstück mit Grundwasser zu versorgen.

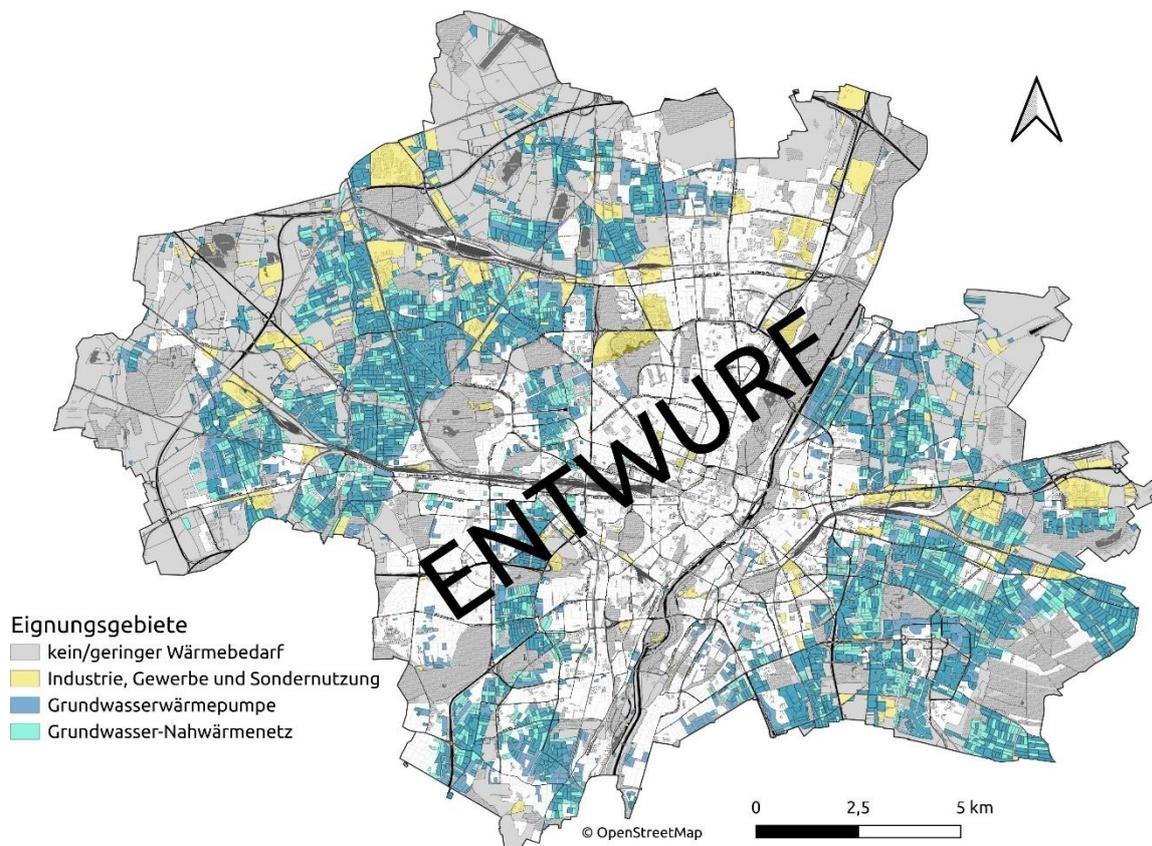


Abbildung 36: Entwurf zur Definition von Eignungsgebieten für Grundwasserwärmepumpen und Grundwasser-Nahwärmenetzen in Baublöcken bei denen der Deckungsgrad bei mindestens 80% des aktuellen Wärmebedarfs liegt.

Auf Basis der oben getroffenen Priorisierung ergibt sich die in Abbildung 36 dargestellte Verteilung der Eignungsgebiete für Grundwasserwärmepumpen und Grundwasser-Nahwärmenetze. Wie bereits in Kapitel III.2 erläutert, ergänzt sich das Potenzial der thermischen Grundwassernutzung gut mit dem vor allem im Stadtzentrum gelegenen Fernwärmenetz und der aktuelle Bearbeitungsstand der Wärmeplanung zeigt, dass zukünftig große Teile der Stadt durch eine klimaneutrale und effiziente Wärmeversorgung abgedeckt werden könnten. Aufgabe der kommunalen Wärmeplanung wird es mittelfristig sein, die gewonnenen Erkenntnisse auch für eine schnelle und zielgerichtete Transformation des Wärmesektors zu nutzen. Beispiele für eine mögliche Aktivierung von Quartieren und Planern werden im folgenden Kapitel diskutiert.

IV.2 Synthese und Ausblick

Die Integration der thermischen Grundwassernutzung in die kommunale Wärmeplanung der Landeshauptstadt München (LHM) konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Modellumgebungen des Geo.KW-Projekts und des Modell München sind vollständig gekoppelt worden, um eine hochaufgelöste und angepasste Berücksichtigung der Grundwasserpotenziale in der Steuerung der Wärmewende zu ermöglichen. Insbesondere konnten die wissenschaftlichen Methoden zur Potenzialanalyse auf Basis der detaillierten und hochwertigen Datensätze der LHM, TUM und der SWM genutzt werden, um angewandte und praxisnahe Ergebnisse zu liefern. Diese Ergebnisse können nun direkt von der strategischen Ebene über die Quartiersebene bis zur Projektebene für verschiedenste Zwecke eingesetzt werden.

Vor allem im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser setzt das RKU auf die aufsuchende Energieberatung zur Aktivierung von Quartieren. Hier können besonders die technischen Potenzialanalysen für Grundwasserwärmepumpen auf Flurstückebene zur Entwicklung von Beraterunterlagen genutzt werden. Im Zusammenspiel mit weiteren Fachdaten und marktüblichen Preisen können Energieberater so erste Aussagen zur initialen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Versorgungstechnologien treffen. Zudem kann durch die angepasste Ausarbeitung von Beraterunterlagen die kommunale Wärmeplanung hier bereits eine strategisch lenkende Wirkung im Quartier entfalten.

Im größeren Geschosswohnungsbau nutzt die LHM integrierte Quartierskonzepte, die durch die KfW-Bank gefördert werden. Diese Konzepte sollen Maßnahmen zur Verbesserung der energetischen, städtebaulichen und verkehrlichen Situation anstoßen und begleiten. Da in diesen tendenziell dicht bebauten Quartieren Verbundlösungen zur Wärmeversorgung attraktiver werden, können die Analysen zu Grundwasser-Nahwärmenetzen angewendet werden. Üblicherweise wird dann im Rahmen des Quartierskonzepts auch eine Auslegung des Wärmenetzes mit Trassenplanung durchgeführt. Hier sind zum einen die Gebäudedaten aus dem Modell München hilfreich, um hochaufgelöste Gebäudesimulationen anzustoßen und zum anderen können die Ergebnisse der Weißflächenkartierung direkt für eine grundlegende Trassenerkundung herangezogen werden. Auf diesem Detailniveau kann die Potenzialanalyse auf Baublockebene nur einen ersten Anhaltspunkt für die mögliche Umsetzbarkeit liefern. Durch die Verstetigung der Methoden am RKU können Abschätzungen für individuelle Brunnenkonfigurationen inklusive der Berücksichtigung von existierenden Nutzungen im Umfeld getroffen werden und die Arbeit in Quartierskonzepten unterstützen.

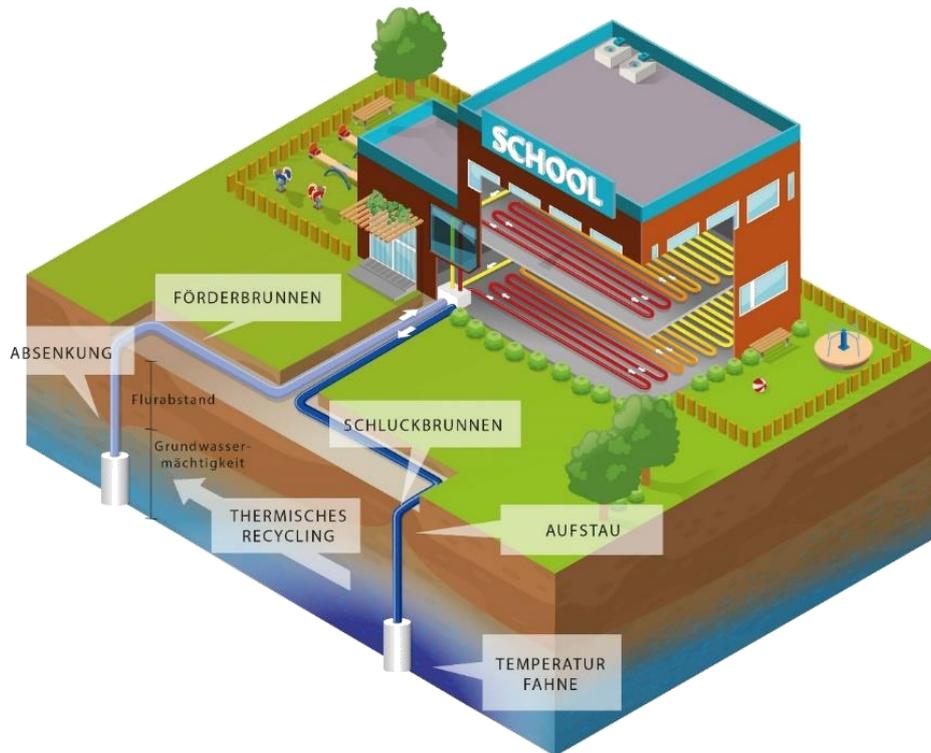
Im breiteren Kontext der Wärmeplanung können die Methoden zur Potenzialanalyse ebenfalls in Bebauungsplanverfahren für den Neubau eingesetzt werden. Hier kann früh im Prozess noch vor dem städtebaulichen Wettbewerb und dem eigentlichen Bebauungsplanverfahren schon über eine Ersteinschätzung zur Wärmeversorgung die Möglichkeit der thermischen Grundwassernutzung geprüft werden und etwaige Freiflächen für Brunnenstandorte oder Energiezentralen bereits im städtebaulichen Wettbewerb als planerische Leitplanken eingebracht werden. Zudem können später im Verfahren relevante Planungsgrundlagen für detailliertere Energiekonzepte übergeben werden, um die Möglichkeiten der thermischen Grundwassernutzung auch für den Neubau hervorzuheben und die Umsetzung von effizienten und innovativen Lösungen zu forcieren.

Abschließend unterstreichen die Ergebnisse eindrücklich, welche Vorteile ein aktives thermisches Management des Grundwasserleiters in Zukunft bringen werden. Die Berücksichtigung von optimierten Ausbauszenarien schon während der Planung kann einen wertvollen Beitrag zur effizienten thermischen

Nutzung des Grundwassers im Sinne der Wärmewende leisten. Dieser steuernde Prozess kann schon frühzeitig auf der Ebene der Fachplanung etabliert werden und sollte sich im wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren fortsetzen. Im Geo.KW-Projekt wurde hierfür bereits eine Webapp als Informationsplattform für Fachplaner und Genehmigungsbehörden entwickelt, die die Bewilligungspraxis bereits jetzt vereinfacht. Eine Weiterentwicklung und Anpassung der Webapp im Sinne der Wärmeplanung ist bereits durch das RKU auf den Weg gebracht worden und verspricht eine effektive Inwertsetzung der Ergebnisse auf den verschiedenen Ebenen des Quartiersmanagements.

Anhang

A.1 Datenbeschreibung



Version: 3

Erstellungsdatum: 29.12.2022

Datensätze:

1. Potenzialevaluierung auf Flurstückbasis: muc_flurstueck_tap
2. Brunnenstandorte auf Flurstückbasis: muc_flurstueck_wells_tap
3. Potenzialevaluierung auf Baublockbasis: muc_baublock_tap
4. Brunnenstandorte auf Baublockbasis: muc_baublock_wells_tap

Änderungen gegenüber Vorgängerversionen:

- Grenzscharfe Integration von Ausschlussgebieten
 - Tunnel: Straße, U-Bahn und S-Bahn inkl. 2.Stammstrecke und U9
 - Unterirdische Gebäude, Tiefgeschosse und Tiefgaragen inkl. bewilligte
 - Vorübergehende Integration der Fernwärmeleitung (Stand 2011)
 - Naturdenkmäler
 - Überschwemmungsgebiete und Gewässer inkl. überbaute Gewässer
 - Naturschutzgebiete und geschützte Biotope
 - Trinkwasserschutzgebiete
- Berechnung der Verdampferleistung nach VDI 4640 mit konstantem COP von 4
- Export der Freiflächenkartierung unter Berücksichtigung der o.g. Ausschlussgebiete
- Fehlerkorrektur bei der Brunnenpositionierung

Datensätze:

muc_flurstueck_tap.gpkg und muc_baublock_tap.gpkg

Layer:

tap_potential

Attribute:

flurstueck_id; baublock

- ID Spalte aus den übermittelten Daten aus dem Model München

pump_limit_drawdown_m3_s

- Maximale Pumprate des Förderbrunnens in m³/s
- Definiert als Pumprate bei der 1/3 der natürlichen Grundwassermächtigkeit abgesenkt wird
- Berechnung nach Formel 1 (Kapitel 2.3.1) aus der Publikation (siehe unten):

$$V_1 = 0,195 k_f M^2$$

V_1	$m^3 s^{-1}$	Pumprate für den Absenkungsgrenzwert von $M/3$
k_f	ms^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit

- Hydrogeologische Hintergrunddaten zur Berechnung:
hydraulische Durchlässigkeit, Grundwassermächtigkeit (GEPO Daten)

pump_limit_injection_m3_s

- Maximale Versickerungsrate des Schluckbrunnens in m³/s
- Definiert als Pumprate bei der ein maximaler Aufstau von 0,5 m unter GOK erreicht wird
- Berechnung nach Formel 4 (Kapitel 2.3.3) aus der Publikation (siehe unten):

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

V_2	$m^3 s^{-1}$	Einletrate für die Aufstaugrenze ($s - 0,5m$)
k_f	ms^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
s	m	Flurabstand
i	-	hydraulischer Gradient

- Hydrogeologische Hintergrunddaten:
hydraulische Durchlässigkeit, Grundwassermächtigkeit, Flurabstand, hydraulischer Gradient (GEPO Daten)

pump_limit_breakthrough_m3_s

- Maximale Pumprate im Brunnenpaar in m³/s
- Definiert als Pumprate bei der noch kein hydraulischer Kurzschluss zustande kommt
- Berechnung nach Formel 2 (Kapitel 2.3.2) aus der Publikation (siehe unten):

$$V_3 = \frac{\pi}{1,96} v_D M x_w$$

V_3	$m^3 s^{-1}$	Entnahmerate ohne hydraulischen Kurzschluss
v_D	ms^{-1}	Darcy-Geschwindigkeit
M	m	grundwassererfüllte Mächtigkeit
x_w	m	Abstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen

- Hydrogeologische Hintergrunddaten:
Darcy Geschwindigkeit, Grundwassermächtigkeit, Brunnenabstand (*max_well_distance_m*)

max_well_distance_m

- Auf einem Flurstück/Baublock möglicher Brunnenabstand
- Definiert als maximaler Abstand in Grundwasserfließrichtung unter Berücksichtigung der Abstandsflächen und Ausschlussflächen (siehe: *buffered_geom*)
- Hydrogeologische Hintergrunddaten: Grundwasserfließrichtung
- Keine Brunnenabstände unter 10m zugelassen

tech_m3_s

- Technisch umsetzbare Entnahmerate im Brunnenpaar in m³/s
- Definiert als Minimum der 3 Pumpraten (*pump_limit_drawdown_m3_s*, *pump_limit_breakthrough_m3_s*, *pump_limit_injection_m3_s*):

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

V_{max}	$m^3 s^{-1}$	Technisch umsetzbare Entnahmerate
-----------	--------------	-----------------------------------

geo_power_5k_kw

- Leistung aus der geothermischen Quelle (Grundwasser) in kW
- Berechnet sich aus der technisch umsetzbaren Entnahmerate, der Wärmekapazität von Wasser und einer konstanten Temperaturspreizung von 5K:

$$P_{th} = V_{max} c_{pw} \rho_w T$$

P_{th}	W	Thermische Entzugsleistung
c_{pw}	$J kg^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
ρ_w	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser
T	K	maximale Temperaturspreizung

hp_power_cop4_kw

- Theoretische Verdampferleistung einer Wärmepumpe mit konstantem COP von 4 in kW
- Berechnet sich aus Leistung aus der geothermischen Quelle und einem konstanten COP von 4 in Anlehnung an die VDI 4640

$$P_h = \frac{P_{th}}{1 - \frac{1}{cop}}$$

P_{th}	W	Thermische Entzugsleistung
P_t	W	Durchschnittliche Heizleistung
cop	-	Durchschnittliche Effizienz der Wärmepumpe

temperature

- Temperatur Grundwasser (1m u Grundwasserstand April 2014: GEPO Daten)

small_plot_bool (NULL; 1)

- Kleines Flurstück/Baublock, das/der nicht zur Nutzung mit einem Brunnenpaar geeignet sind
- Möglicher Brunnenabstand unter 10m nach Abzug der Abstandsflächen und Ausschlussflächen

no_gw_bool (NULL; 1)

- Flurstück/Baublock unter dem kein quartäres Grundwasser erkundet wurde
- Auf dem gesamten Flurstück/Baublock: Grundwassermächtigkeit = 0
- Keine Brunnenpositionierung innerhalb von diesen Flurstücken/Baublöcken (Durchschnittswert für Mächtigkeit, sobald Werte über 0 auf dem Flurstück/Baublock vorhanden sind)

dwpa_bool (NULL; 1)

- Flurstück/Baublock liegt im Wasserschutzgebiet
- Schwerpunkt des Flurstücks/Baublocks liegt im oder schneidet ein Trinkwasserschutzgebiet

buffered_geom

- Flurstück/Baublock Geometrie excl. Der Ausschlussgebiete und 3m Abstandsflächen von Gebäuden und Grundstücksgrenzen bei Flurstücken
- Berücksichtigte Ausschlusskriterien:
 - Tunnel: Straße, U-Bahn und S-Bahn inkl. 2.Stammstrecke und U9
 - Unterirdische Gebäude, Tiefgeschosse und Tiefgaragen inkl. bewilligte
 - Vorübergehende Integration der Fernwärmeleitung (Stand 2011)
 - Naturdenkmäler
 - Überschwemmungsgebiete und Gewässer inkl. überbaute Gewässer
 - Naturschutzgebiete und geschützte Biotope
 - Trinkwasserschutzgebiete

geometry

- Flurstück/Baublock Geometrie aus dem ursprünglich übermittelten Daten aus dem Model München

Datensätze:

muc_flurstueck_wells_tap; muc_baublock_wells_tap

Layer:

well_locations

Attribute:

flurstueck_id; baublock

- ID Spalte aus den übermittelten Daten aus dem Model München

well_type (extraction_well; injection_well)

- Brunnenpositionen auf dem Flurstück/Baublock gemäß der Abstandsflächen, Ausschlussflächen und der mittleren Grundwasserfließrichtung

Quelle zu den Formelverweisen (frei zugänglich):

https://www.researchgate.net/publication/332575467_TAP_-_Thermal_aquifer_Potential_A_quantitative_method_to_assess_the_spatial_potential_for_the_thermal_use_of_groundwater

A.2 Literaturverzeichnis

- Arnold, M. (2006): Use of District Cooling from Groundwater Passage Lines for a Computer Center in Munich.- Stadtwerke München GmbH – Netzstrategie. Final Project Report funded by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety and the Bavarian State Ministry for Economy, Infrastructure, Transport and Technology, 43 S.
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft Landesentwicklung und Energie. (2019). Energiegipfel Bayern 2018 / 2019, (September), 80.
- Böttcher, F., Casasso, A., Götzl, G., & Zosseder, K. (2019). TAP - Thermal aquifer Potential: A quantitative method to assess the spatial potential for the thermal use of groundwater. *Renewable Energy*, 142(April). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.086>
- Böttcher, F., & Zosseder, K. (2021). Thermal influences on groundwater in urban environments – A multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich. *Science of The Total Environment*, 810(January 2022), 152193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152193>
- Funk, D., Groß, G., & Trute, P. (2014). Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München. Landeshauptstadt München - Referat für Gesundheit und Umwelt. Munich.
- Halilovic, S., Böttcher, F., Kramer, S. C., Piggott, M. D., & Zosseder, K. (2022). Well layout optimization for groundwater heat pump systems using the adjoint approach. *Energy Conversion and Management*, 268(June), 116033. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116033>
- Halilovic, S., Böttcher, F., Zosseder, K., & Hamacher, T. (2022). Optimizing the spatial arrangement of groundwater heat pumps and their well locations. *Under Review*, 24.
- Kleinertz, B. et al. (2023). Wärmestrategie München - Verbesserung der Daten- und Analysegrundlage für die kommunale Wärmeplanung, Forschungsstelle für Energiewirtschaft mbH, München.
- Muffler, L. & Spieler, M. (2023) Rechtsgutachten zur kommunalen Wärmeplanung für die Landeshauptstadt München – Instrumente und ausgewählte Rechtsfragen einer Wärmewendestrategie, AVR Rechtsanwälte, München.
- Sandrock, M. et al. (2023). Studie zur Wärmewendestrategie München. Hamburg: HIC Hamburg Institut Consulting GmbH.
- Umweltministerium Baden-Württemberg. (2009). Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen (1st ed.). Stuttgart, Germany.
- Zosseder, K., Kerl, M., Albarrán-Ordás, A., Gossler, M., Kiecak, A., & Chavez-Kus, L. (2022). Die hydraulischen Grundwasserverhältnisse des quartären und des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters im Großraum München. *Geologica Bavarica*, 122(Umwelt Spezial), 199. Retrieved from <https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/91122.htm>