

Entwicklung einer Methodik zur koordinierten Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme in urbanen Räumen

Manage_GeoCity

J. Pucker-Singer,
T. Harum,
E. Meißner, et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

35/2018

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Entwicklung einer Methodik zur koordinierten Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme in urbanen Räumen

Manage_GeoCity

DI (FH) DI Johanna Pucker-Singer, DI Kurt Könighofer,
Dr. DI Gerfried Jungmeier
JOANNEUM RESEARCH, LIFE

Till Harum, DI Gunnar Domberger, Dr. Andreas Dalla-Via,
Dr. Albrecht Leis
JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES

DI Ernst Meißner, DI (FH) Julia Tartler
Grazer Energieagentur

Graz, Dezember 2016

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	11
Abstract.....	14
1 Einleitung.....	17
1.1 Aufgabenstellung und Projektziel.....	17
1.2 Stand der Technik – Systeme zur Nutzung und Speicherung von erneuerbarer Energie im Untergrund.....	17
1.2.1 Grundlagen des Erdwärmepotenzials.....	18
1.2.2 Technologien für den Wärmeentzug aus dem Untergrund.....	20
1.2.3 Anwendungskonzepte für die Wärmenutzung	25
1.2.4 Saisonale Speicherung und Regeneration von Wärme im Untergrund	27
1.3 Verwendete Methoden.....	30
1.3.1 Vorgangsweise im Projekt.....	30
1.3.2 Definition von unterirdischen Gunstzonen in der Modellregion	31
1.3.3 Simulation von Grundwasserströmungen und Wärmetransport im Untergrund	31
1.3.4 Wärme- und Kühlbedarfsanalyse	42
1.3.5 Ökologische Bewertung.....	53
1.3.6 Ökonomische Bewertung	59
2 Ergebnisse	62
2.1 Unterirdische Gunstzonen in der Modellregion Graz.....	62
2.2 Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz.....	63
2.2.1 Auswahl und Definition.....	63
2.2.2 Fallbeispiel „Innenstadt - West“	67
2.2.3 Fallbeispiel „Hafnerstraße“	72
2.2.4 Fallbeispiel „Olympiawiese“	79
2.3 Bewertung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz	86
2.3.1 Fallbeispiel „Innenstadt - West“	86
2.3.2 Fallbeispiel „Hafnerstraße“	102
2.3.3 Fallbeispiel „Olympiawiese“	110
2.4 Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Geothermie.....	125
2.4.1 Neue Energieversorgung – Rahmenbedingungen.....	127
2.4.2 Untergrundeigenschaften	127

2.4.3	Systemauswahl	127
2.4.4	Anlagendimensionierung	128
2.4.5	Prüfung	130
2.4.6	Optimierung und Umsetzung	130
3	Schlussfolgerungen	131
4	Ausblick und Empfehlungen	135
5	Verzeichnisse	137
5.1	Abbildungsverzeichnis	137
5.2	Tabellenverzeichnis	141
5.3	Literaturverzeichnis	143
6	Anhang	150
6.1	Anhang 1 - GIS-Datengrundlagen	150
6.1.1	Digitales Geländemodell, digitales Oberflächenmodell (Rasterdatensatz)	150
6.1.2	Luftbilder, Satellitenaufnahmen	150
6.1.3	Basiskarten	150
6.1.4	Bestehende Infrastruktur	150
6.1.5	Raumplanung, Stadt- und Siedlungsentwicklung	150
6.1.6	Stadtklima	153
6.1.7	Gebäudebestand	153
6.1.8	Bestehende Energieversorgung	153
6.1.9	Grundlagen für die Darstellung des geothermischen Potenzials	153
6.1.10	Naturräumliche Gegebenheiten	154
6.1.11	Grundlagen für die Darstellung des solarthermischen Potenzials	154
6.2	Anhang 2 – Ergebnistabellen ökologische Bewertung	157
6.2.1	Fallbeispiel „Innenstadt – West“	157
6.2.2	Fallbeispiel „Hafnerstraße“	158
6.2.3	Fallbeispiele „Olympiawiese“	158

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Durch zahlreiche Wärmequellen in Stadtgebieten (z.B. Abwärme städtischer Bebauungen im Untergrund) kommt es zu einer Aufwärmung des Grundwassers und des Untergrunds („subsurface heat island“). In manchen Fällen ist die Aufwärmung bereits so hoch, dass negative Auswirkungen auf die Grundwasserqualität möglich sind. Andererseits stellt diese Aufwärmung des Untergrunds ein Potenzial für die geothermische Wärme- und Kältenutzung dar. Bei entsprechender Nutzung (z.B. Wärmeentzug für Heizzwecke) kann ein Abkühleffekt des Untergrunds erzielt werden. Vor allem in urbanen Gebieten besteht das Problem, dass eine unkoordinierte Nutzung durch zahlreiche kleine Einzelanlagen sehr rasch zu einer gegenseitigen Beeinflussung und somit zu einer ineffizienten und nicht nachhaltigen Bewirtschaftung führen kann. In manchen Städten führt diese Situation bereits zur Diskussion eines Verbots des Einsatzes von grundwasserbürtiger Erdwärme vor allem für Kühlzwecke. Durch eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung der verschiedenen Erdwärmequellen unter Berücksichtigung etwaiger thermischer Vorbelastung des Untergrundes und der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen kann diese Situation verbessert und eine effiziente und nachhaltige Nutzung der im Untergrund von Stadtgebieten vorhandenen Erdwärme ermöglicht werden.

Inhalte und Zielsetzungen

Das Projektziel war die Entwicklung einer Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme für Wärme- und Kühlanwendungen in urbanen Räumen. Dabei wurden mittels Fallbeispielen in der Modellregion Graz Grundwasserströmungen, unterschiedliche geothermische Verhältnisse des Untergrundes, Wärme- und Kühlbedarf, Wärmeeintrag von Solar- und Abwärme und die Möglichkeiten der saisonalen Speicherung von Wärme im Untergrund berücksichtigt.

Methodische Vorgehensweise

Die Entwicklung der Methodik erfolgte anhand des urbanen und periurbanen Raums der Modellregion Graz, auf Grund der guten Datenlage für den Untergrund. Für die Modellregion wurden unterirdische Gunstzonen für oberflächennahe Erdwärme ohne Wasserentnahme und grundwasserbürtige Erdwärme ausgewiesen.

In diesen Gunstzonen wurden drei Fallbeispiele identifiziert, für die eine Wärme- und Kühlbedarfsanalyse durchgeführt wurde. Das vorliegende Wärme- und Kältepotenzial des Untergrunds wurde dem Wärme- und Kühlbedarf gegenübergestellt. Die Fallbeispiele wurden technisch, ökonomisch und ökologisch bewertet und für ausgewählte Anwendungsgebiete in den Gunstzonen hochgerechnet.

Für die Fallbeispiele wurden Simulationen durchgeführt. Diese verwenden ein auf ein bestehendes instationäres Grundwasserströmungsmodell aufgesetztes Wärmehaushaltsmodell. Dabei wird die Beeinflussung der Untergrundtemperaturen durch Wärmeentnahme

und –speicherung und die Beeinflussung der Gunstzone analysiert. Ein zentrales Thema war die Berücksichtigung der thermischen und wasserwirtschaftlichen Bestandssituation und die Analyse der diesbezüglichen Verbesserungsmöglichkeiten und Nutzungsoptimierung.

Vorgehensweisen, Annahmen und Ergebnisse wurden in zwei Projektbeiratssitzungen mit Stakeholdern aus der Verwaltung (Stadt, Land) und Energieversorgern abgestimmt.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen wurde eine Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung der oberflächennahen Erdwärme entwickelt. Die Methodik beinhaltet eine Vorgehensweise zur verbesserten Umsetzung und Nutzungsoptimierung von Erdwärmeprojekten und ist auf andere städtische Gebiete übertragbar.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ergebnis des Projektes ist die Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme für Wärme- und Kühlanwendungen in urbanen Räumen, die die Grundlage für zukünftige Nutzungs- und Bewirtschaftungspläne für Städte und Stadtgebieten bildet. Sie gliedert sich in 6 Abschnitte: (1) Neue Energieversorgung – Ausgangssituation, (2) Untergrundeigenschaften, (3) Systemauswahl, (4) Anlagendimensionierung, (5) Prüfung, (6) Optimierung und Umsetzung. Diese Methodik ermöglicht die Übertragbarkeit zentraler Bewirtschaftungsmechanismen auf andere urbane Gebiete.

Die Arbeiten zu den drei Fallbeispielen, die für die Modellregion Graz untersucht wurden, ergaben, dass grundsätzlich Grunddaten für die Bestimmung des Wärme- und Kühlbedarfs in Stadtgebieten aus verschiedenen Quellen vorhanden sind, jedoch mit unterschiedlicher Aktualität und Qualität.

Die Simulationsergebnisse für zwei Fallbeispiele mit grundwasserbürtiger Geothermie zeigen, dass in unterirdischen Wärmeinseln in urbanen Gebieten durch optimierte Nutzungskonzepte, in denen Wärmepumpen für Heizzwecke eingesetzt werden, eine deutliche und weitreichende Abkühlung des Grundwassers erreicht werden kann. Die Ergebnisse der Simulation für das Fallbeispiel ohne Wasserentnahme zeigen, dass die räumlichen Auswirkungen von einem Erdwärmesondenfeld im Untergrund begrenzt sind. In einer Entfernung von 50 m zum Erdwärmesondenfeld sind die Temperaturänderungen nicht mehr signifikant. Die durchgeführten hydrochemischen Modellierungen ergaben, dass Temperaturschwankungen im Bereich von $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$ nur sehr geringfügige Veränderungen in der Hydrochemie bewirken. Allerdings sollte die maximal genehmigte Temperaturspanne immer auf den physikalisch, chemischen und biologischen Zustand des jeweiligen Grundwasserleiters abgestimmt sein.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung der Fallbeispiele zeigen, dass für Systeme mit Wärmepumpe die Art der Strombereitstellung einen wesentlichen Einfluss auf die gesamten Treibhausgasemissionen hat. Für die Varianten mit österreichischem Strommix (mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energie) liegt die Treibhausgasreduktion im Vergleich zu anderen Heizsystemen mit fossiler Energie zwischen 75% und 85%. Wird für die Strombereitstellung

ein Erdgas Gas- und Dampfkraftwerk angenommen, ist die Einsparung deutlich geringer bzw. kann keine Einsparung erzielt werden.

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Fallbeispiele (Berechnung der jährlichen Wärmegestehungskosten) zeigen im Vergleich zu Wärmegestehungskosten aus Großgaskessel von etwa 40 €/MWh, dass eine Optimierung der Energiekonzepte für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit unbedingt notwendig ist. Dies betrifft einerseits die Investitionskosten (Anzahl und Tiefe der Erdwärmesonden, kostengünstige Wärmequellen für Regeneration, Detaildaten für Auslegung der Wärmepumpen) und andererseits die erforderlichen Temperaturen für die Wärmeversorgung der Gebäude. Diese Temperaturen (etwa 85 bis 95 °C bei Fernwärmeeinspeisung und bestehenden Gebäuden, etwa 35 °C bei Neubauten) haben entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpen und damit auf die Stromkosten.

Ausblick

Zukünftige Forschungsfragen sind u.a. die Erstellung einer zentralen „Energiebedarfsdatenbank“ als Grundlage für die städtische Energieraumplanung, die Berücksichtigung der Wärmeeinbringung durch tiefe Einbauten in der Grundwassermodellierung, Untersuchungen zur Grundwasserneubildung in urbanen Gebieten und begleitende Forschungsarbeiten bei der Errichtung von saisonalen Speichern im Untergrund (z.B. Messungen der Untergrundtemperaturen und die Kalibrierung von Simulationsmodellen).

Die Ergebnisse zu den Fallbeispielen bilden die Basis für zukünftige Demonstrationsvorhaben. Der nächste Schritt in Richtung Demonstrationsvorhaben ist die Untersuchung von weiteren Varianten zur technischen Anlagenauslegung und deren Optimierung.

Abstract

Starting point/Motivation

Due to the numerous heat sources in urban areas (e.g. underground construction) ground water temperatures and subsurface temperatures increase („subsurface heat island“). In some cases this temperature increase has negative impacts on the ground water quality. On the other hand these relatively high subsurface temperatures offer a potential for the use of shallow geothermal energy for heating and cooling. If this heat source is used properly (e.g. heat extraction for heating purposes), a cooling effect of the underground can be achieved. Especially in urban areas the uncoordinated use of underground heat by a lot of small installations could lead to mutual interferences. The energy use might become inefficient and unsustainable. Some cities already discuss the prohibition of the energetic use of groundwater for cooling purposes.

This situation can be improved by a coordinated use and management of different geothermal heat sources, taking into account the thermal preload of the subsurface and framework conditions of water management. Furthermore a coordinated management of geothermal heat sources leads to an efficient and sustainable use of shallow geothermal energy from the subsurface of urban areas.

Contents and Objectives

The aim of the project was to develop a methodology for the coordinated use and management of shallow geothermal energy for heating and cooling as well as seasonal storage in urban areas. Using case studies in the model region Graz the following aspects are considered: ground water flow, different geologic conditions, heating and cooling demand, heat input from solar collectors and industrial waste heat, and the possibilities of seasonal heat storage in the subsurface.

Methods

The development of the methodology was based on the urban areas of the model region Graz, due to the existing data basis for the subsurface. Subsurface favorable geothermal areas for the use of geothermal energy with and without groundwater were identified.

Case studies within these subsurface favorable geothermal areas were selected. For these case studies the heating and cooling demand were analyzed. The energy demand and the subsurface energy potential were compared and the possibilities of seasonal storage investigated. The case studies were techno-economically and environmentally evaluated and for selected areas extrapolated.

Simulation was performed for these selected areas by use of an existing instationary ground water flow model combined with a heat model. The influence on subsurface temperatures by heat extraction and storage was analyzed and the influence on the subsurface favorable geothermal areas investigated. Considering the current management of geothermal and water resources, optimization measures and utilization concepts were developed.

Based on the results of the model region Graz the methodology for the coordinated use and management of shallow geothermal energy was developed. The methodology comprises a procedure for an improved implementation and optimized utilization of shallow geothermal energy projects. Its basic system is flexible enough to enable a transfer of the methodology to other urban areas.

In the project advisory board the methodology, assumptions and results were discussed and presented to relevant stakeholders (e.g. city planners, energy utilities, administrative authorities).

Results

The overall aim of the project was the development of the methodology for a coordinated use and management of shallow geothermal energy for heating and cooling, which is the basis for future use and management plans for cities and urban regions. The methodology is divided into 6 sections: (1) New energy system – starting point, (2) subsurface characteristics, (3) System definition, (4) System dimensioning, (5) Evaluation, (6) Optimization and Implementation.

The work on three case examples in the model region Graz showed, that basic data, which is needed to determine heating and cooling demand of urban areas, are available from different sources. However, data quality varies.

The simulation results on two case studies using groundwater as geothermal source show, that the groundwater in subsurface urban heat islands can be cooled down by using heat pumps for heating. The simulation results on the case study with bore hole heat exchangers show that the spatial influence on subsurface temperature is limited. Temperature changes are insignificant 50 meters away from the bore hole heat exchanger field. Hydrochemical modelling showed that temperature changes in the range of $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$ lead to very minor changes in the hydro chemistry. However, the maximum permitted temperature range should account for the physical, chemical and biological state of the affected ground water.

Results from the environmental analysis show, that the type of electricity generation strongly influences total greenhouse gas emissions of geothermal heat pump systems. In the scenarios where the Austrian electricity (including a high share of renewables) was used a greenhouse gas emissions reduction from 75% to 85% is reached compared to other heating systems with fossil energy. If the electricity is generated by a combined cycle natural gas power plant the reduction is less or even no reduction can be achieved.

The results on the economic evaluation (calculation of yearly heat generation costs) of the case studies show, that compared to the heat generation in large scale natural gas boilers (40 €/MWh) an optimization of the energy concept is needed. These refers to the reduction of investment costs (amount and depth of bore hole heat exchangers, cheap heat sources for loading the subsurface, detailed data for the design of the heat pumps) and the temperature level needed in the building. The temperature level of the heat supply in the building (approx..

85 to 95°C for injection into the district heating grid and existing buildings, approx.. 35°C for new buildings) significantly influence the efficiency of the heat pump and the electricity costs.

Prospects / Suggestions for future research

Future research questions are the development of a central „energy demand database“ as basis for spatial energy planning, implementation of heat input from subsurface buildings in ground water modelling, investigation of new ground water formation in urban areas and accompanying research work at underground seasonal storage projects (e.g. monitoring underground temperatures and calibrating simulation models).

Die results on the case studies are the basis for future demonstration activities. The next step is the investigation of additional possibilities for the technical system design and its optimization.

1 Einleitung

Die Einleitung beinhaltet die Beschreibung der Aufgabenstellung und Projektziele. Es wird der Stand der Technik zu Systemen zur Nutzung und Speicherung von erneuerbarer Energie im Untergrund dargestellt. Weiters werden die im Projekt angewandten Methoden beschrieben.

1.1 Aufgabenstellung und Projektziel

Durch zahlreiche unterirdische Wärmequellen in Stadtgebieten (z.B. Abwärme städtischer Bebauungen im Untergrund wie Tiefgaragen, Kanalsysteme, Fernwärmenetze oder Tunnels) kommt es zu einer Aufwärmung des Grundwassers und des Untergrundes. Diese Erwärmung des oberflächennahen Untergrunds in Stadtgebieten wird auch als „Subsurface Heat Island“ bezeichnet (Ferguson, 2007; Menberg, 2013; Taniguchi, 2007; Zhu, 2014).

In manchen Fällen ist die Aufwärmung bereits so hoch, dass ein Risiko für negative Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität besteht. Andererseits stellt diese Aufwärmung des Untergrunds ein Potenzial für die geothermische Wärme- und Kältenutzung dar. Bei entsprechender Nutzung, wie Wärmeentzug für Heizzwecke, kann ein Abkühleffekt des Untergrunds erzielt werden. Vor allem in urbanen Gebieten besteht das Problem, dass eine unkoordinierte Nutzung durch zahlreiche kleine Einzelanlagen sehr rasch zu einer gegenseitigen Beeinflussung und somit zu einer ineffizienten und nicht nachhaltigen Bewirtschaftung führen kann.

Durch eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung der verschiedenen Erdwärmequellen unter Berücksichtigung etwaiger thermischer Vorbelastung des Untergrundes und der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen kann diese Situation verbessert und eine effiziente und langfristige Nutzung der im Untergrund von Stadtgebieten vorhandenen Erdwärme ermöglicht werden.

Daraus ergab sich als Projektziel, die Entwicklung einer Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme für Wärme- und Kühlanwendungen in urbanen Räumen. Dabei wurden Grundwasserströmungen, unterschiedliche geothermische Verhältnisse des Untergrunds, Wärme- und Kühlbedarf, Wärmeeintrag von Solar- und Abwärme und die Möglichkeit der saisonalen Speicherung von Wärme im Untergrund berücksichtigt.

1.2 Stand der Technik – Systeme zur Nutzung und Speicherung von erneuerbarer Energie im Untergrund

In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Technik der Nutzung und Speicherung von erneuerbarer Energie im Untergrund beschrieben. Es werden Grundlagen für die Bewertung des Erdwärmepotenzials dargestellt und die für das Projekt relevanten Technologien für den Wärmeentzug aus dem Untergrund angeführt. Weiters wird auf Anwendungskonzepte für die Wärmenutzung und die saisonale Speicherung von Wärme im Untergrund eingegangen.

1.2.1 Grundlagen des Erdwärmepotenzials

Grundsätzlich kann man das Erdwärmepotenzial nach Tiefenlage und Nutzungsart einteilen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Erdwärmepotenzial – Tiefenlage und Nutzungsmöglichkeiten

Mit der Tiefenlage einer Erdwärmequelle hängt meist direkt das verfügbare Temperaturniveau zusammen. Dieses bestimmt die Nutzung der Erdwärmequelle, dabei unterscheidet man zwischen

- indirekter Nutzung: niedrige Temperatur erfordert den Einsatz von Wärmepumpen
- direkter Nutzung: Temperatur ist ausreichend für Kühlung bzw. ausreichend hoch für Heizung

Folgende Tiefenbereiche können definiert werden:

- Oberflächennahe Erdwärme (0 ~ 300 m): Temperaturbereich bis maximal ~20 °C; für Heizzwecke ist meist eine Erhöhung des Temperaturniveaus erforderlich (indirekte Nutzung); direkte Nutzung zur Kühlung ist in der Regel möglich.
- Mitteltiefe Erdwärme (200 – 800 m): dieser Begriff wird manchmal verwendet, ist aber nicht allgemein etabliert.
- Tiefe Erdwärme (> 800 m): Direkte Thermalwassernutzung bzw. Erdwärmesondennutzung mit Hilfe von Tiefbohrungen.

Neben der oben angeführten Einteilung, gibt es zusätzlich den Begriff der „Tunnelthermie“, der die thermische Nutzung von Tunnelwasser beschreibt. Tunnelthermie kann in urbanen Bereichen dann von Bedeutung sein, wenn sich Tunnel (Straßentunnel, Bahntunnel, U-Bahntunnel) im Stadtgebiet befinden und eine ausreichende Wassermenge abfließt. Weiters besitzt die mitteltiefe Erdwärme eventuell auch in der Nähe von Tunneln Relevanz, da in diesen Bereichen oft Erkundungsbohrungen mit großen Tiefen vorhanden sind bzw. abgeteuft werden und diese einer geothermischen Nachnutzung zugeführt werden könnten. Eine energetische Nachnutzung dieser Erkundungsbohrungen kann z.B. mittels Erdwärmesonden erfolgen.

Der Fokus des Projektes Manage_GeoCity liegt auf der oberflächennahen Erdwärme. Mitteltiefe Erdwärme und tiefe Erdwärme werden im Projekt nicht betrachtet.

1.2.1.1 Oberflächennahe Erdwärme

Die oberflächennahe Erdwärmennutzung ist vor allem durch das erzielbare Temperaturniveau beschreibbar. Abbildung 2 beschreibt die Temperaturzunahme mit der Tiefe, woraus sich die zu erwartenden Temperaturverhältnisse ergeben und zeigt die Zusammenhänge mit den jahreszeitlich bedingten Schwankungen in der seichtesten Bodenzone (bis etwa 20 m unter Gelände).

Bei der Nutzung der oberflächennahen Erdwärme sind die thermischen Untergrundeigenschaften ebenso von Bedeutung wie das verfügbare Flächendargebot. Speziell die Flächenverfügbarkeit ist in urbanen Bereichen oft ein Kriterium für die Umsetzbarkeit von oberflächennahen Erdwärme-Projekten.

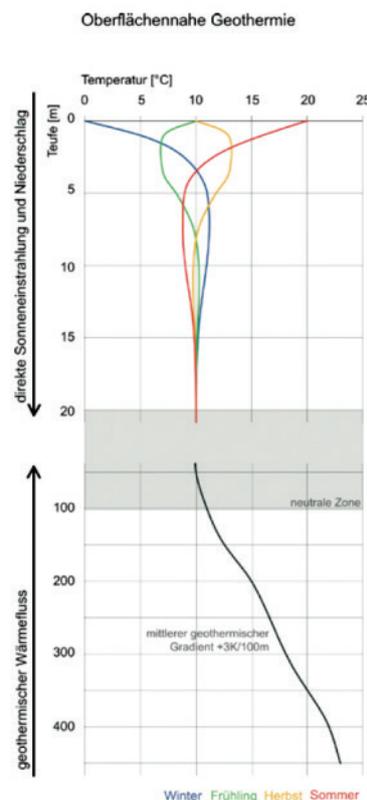


Abbildung 2: Temperaturzunahme mit der Tiefe (Bockelmann et al., 2011)

1.2.1.2 Erdwärme als erneuerbare Energiequelle

Erdwärme wird weitgehend der Gruppe der erneuerbaren Energieformen zugeordnet. Zum Beispiel beinhaltet die Kategorie „Erneuerbare“ in der österreichischen Energiebilanz auch Geothermie (Statistik Austria, 2016a). Bei strenger Auslegung des Begriffes fällt jedoch auf, dass diese Zuordnung in manchen Fällen nicht uneingeschränkt zutrifft.

Grund dafür ist der sehr geringe natürliche Wärmestrom ($0,06 - 0,1 \text{ W/m}^2$) vom Erdinneren an die Erdoberfläche. Es kann daher bei mangelnder Anlagenauslegung nur in einem

eingeschränkten Maße von erneuerbarer Energie und einer nachhaltigen Nutzung der Erdwärme gesprochen werden. Es ist daher außerordentlich wichtig, dass für Erdwärmeanlagen Bewirtschaftungsstrategien entwickelt und beachtet werden, die eine langfristig nachhaltige und optimale Nutzung des vorhandenen geothermischen Potenzials ermöglichen. Diese grundsätzliche Anforderung ist in jedem Fall schon bei der Anlagenplanung zu beachten.

1.2.2 Technologien für den Wärmeentzug aus dem Untergrund

Grundsätzlich ist der Entzug von Erdwärme möglich, indem Wasser (Grundwasser) aus dem Untergrund entnommen wird und andererseits indem nur die im Gestein vorhandene Wärme des Untergrundes genutzt wird. Dementsprechend sind verschiedene Technologien für den Entzug von Wärme aus dem Untergrund einzusetzen.

1.2.2.1 Entzug von Wärme ohne Wasserentnahme

Der Entzug von Erdwärme ohne dabei Grundwasser aus dem Untergrund zu entnehmen ist jene Nutzungsart, die hinsichtlich der Standorteigenschaften die geringsten Anforderungen stellt, da dazu keine Wasserführung im Untergrund erforderlich ist. Folgende Technologien zum Entzug der Erdwärme ohne Wasserentnahme aus dem Untergrund, können im Bereich der geologisch-lithologischen Rahmenbedingungen in Österreich eingesetzt werden:

- Erdwärmesonden, Erdwärmesondenfelder
- Erdwärmerohre – „Heat Pipes“¹
- Energiepfähle bei Baugründungen
- Massivabsorber, Bodenabsorber
- Flächenkollektoren

Innerhalb des Projektes Manage_GeoCity werden Erdwärmesonden, Energiepfähle und vergleichbare Baugründungen näher betrachtet. Bodenabsorber und Flächenkollektoren werden nicht berücksichtigt, da diese stark von der Oberflächentemperatur beeinflusst werden und nur untergeordnet geothermische Standorteigenschaften erfordern. Der Einsatz von Heat Pipes wurde auch nicht detaillierter untersucht, da zu dieser Technologie derzeit noch wenige Praxiserfahrungen vorliegen.

¹ „Heat Pipes“ stellen hocheffiziente Wärmetauscher dar, die im Betrieb keine oder nur wenig mechanische Fremdenergie brauchen. Sie nutzen nicht die Wärmeleitung sondern eine wärmetragende Substanz, die verdampft und an anderer Stelle kondensiert wird. Sie sind deshalb auch geeignet Wärme aus Erdreich bzw. Grundwasser abzuleiten und auch einzutragen.

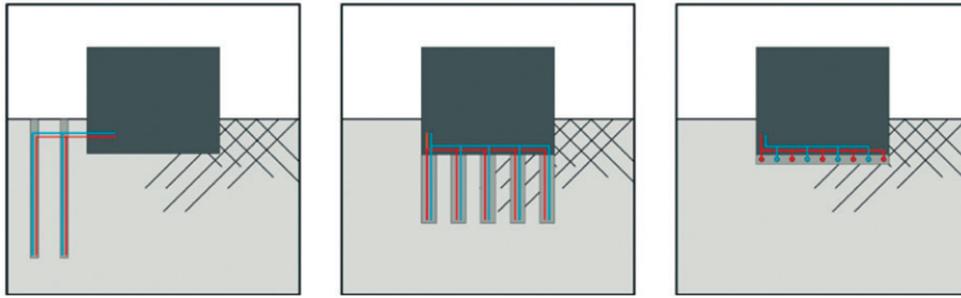


Abbildung 3: Prinzipien für den Erdwärmeentzug ohne Wasserentnahme aus dem Untergrund: Erdwärmesonden, Energiepfähle, Bodenabsorber/Kollektoren (Bockelmann et al., 2011)

Erdwärmesonden

Erdwärmesonden entziehen Erdwärme mittels vertikalen Wärmetauschern (Abbildung 4). Erdwärmesonden werden in unterschiedlichen Bauformen, Tiefen und Anordnungen errichtet. In Österreich ist die meist angewandte Form die Einfach-U-Sonde bzw. Doppel-U-Sonde (Abbildung 5). Des Weiteren gibt es noch verschiedene Formen von Koaxialsonden, die jedoch in Österreich nur selten eingesetzt werden.

Die Bohrungen werden nach Einbringen der Erdwärmesonde meist mit einer Bentonit-Zement-Mischung verfüllt, sodass ein möglichst guter Wärmeübergang vom Untergrund zu den Erdwärmesonden und letztendlich zum Wärme-/Kühlsystem stattfindet. Der Bau eines Erdwärmesondenfeldes ist in Abbildung 6 dokumentiert.

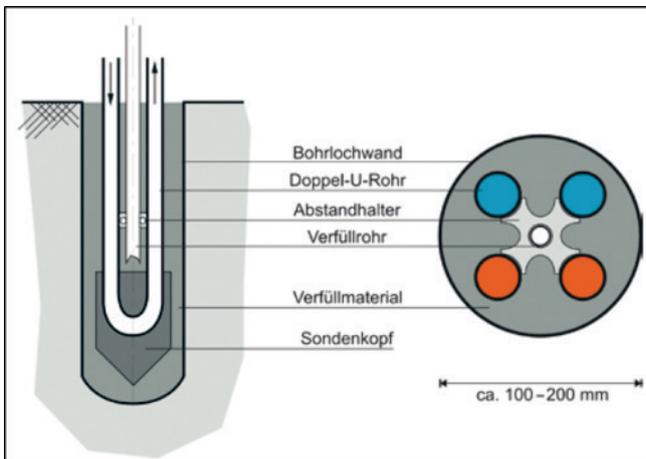


Abbildung 4: Prinzip einer Erdwärmesonde (Bockelmann et al., 2011)

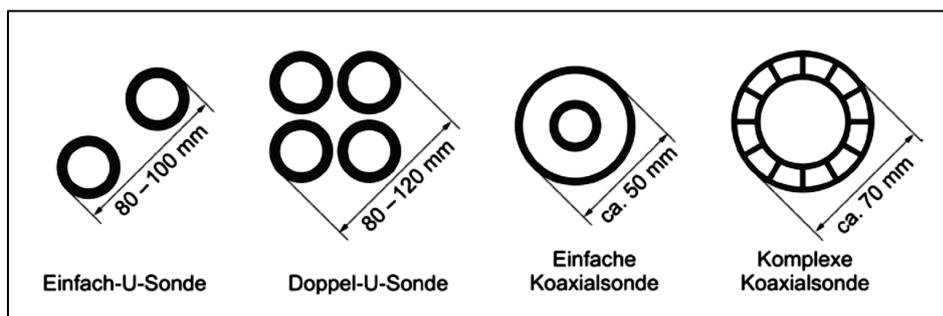


Abbildung 5: Wichtigsten Bauformen einer Erdwärmesonde (Bockelmann et al., 2011)



Abbildung 6: Bau eines Erdwärmesondenfeldes (Fotos: G. Domberger)

Die Wärmeausbeute von Erdwärmesonden hängt maßgeblich von den thermischen Eigenschaften des Untergrundes und der technischen Qualität der Erdwärmesonden ab. Das Vorhandensein grundwasserführender Schichten kann die Effizienz von Erdwärmesonden begünstigen.

Kennzahlen zu Wärmeentzug sind für Erdwärmesonden in Tabelle 1 dargestellt. Weiters sind in Tabelle 1 Kennzahlen zum Wärmeeintrag über freie Kühlung für Erdwärmesonden, Energiepfähle, Bodenabsorber und Brunnen dargestellt, für den Fall, dass der Untergrund als saisonaler Speicher genutzt wird. In diesem Fall wird sowohl Wärme entnommen, als auch eingespeichert.

Tabelle 1: Kennzahlen zu Wärmeentzug und Wärmeeintrag verschiedener Nutzungstechnologien von oberflächennaher Erdwärme (Bockelmann et al., 2011)

				Leistung	
				Wärmeentzug über Wärmepumpe	Wärmeeintrag über freie Kühlung
Reiner Wärmeentzug nach VDI 4640 Anlagen < 30 kW Betriebsstunden 800 h / 2400 h	Erdsonden	schlechter Untergrund (trockenes Sediment) $\lambda < 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	[W/m]	25/20	–
		Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment $\lambda = 1,5\text{--}3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	[W/m]	60/50	–
		Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit $\lambda > 3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	[W/m]	84/70	–
Saisonaler Speicher	Erdsonden		[W/m]	40–80	20–60
	Energiepfähle	$\varnothing < 60 \text{ cm}$	[W/m]	40–80	20–60
		$\varnothing > 60 \text{ cm}$	[W/m ²]	40–80	20–50
	Bodenabsorber		[W/m ²]	20–50	10–30
Brunnen		[kW/(m ³ /h)]	5–6	k.A.	

Tiefe Erdwärmesonden

Tiefe Erdwärmesonden sind nach der Darstellung in Kapitel 1.2.1 meist der mitteltiefen Erdwärme zuzuordnen. Bei tiefen Erdwärmesonden handelt es sich um etwa 300 – 800 m tiefe Erdwärmesonden, die aufgrund der Tiefe ein höheres Temperaturniveau aufweisen als Erdwärmesonden bis 300 m Tiefe. Meist sind tiefe Erdwärmesonden aufgrund der mit der Tiefe überproportional zunehmenden Bohrkosten wirtschaftlich schwer darstellbar. Diese werden oftmals nur errichtet, wenn wenig verfügbare Grundfläche vorhanden ist, was im Bereich von urbanen Gebieten oft der Fall sein kann.

Energiepfähle bei Baugründungen

Energiepfähle sind aus bautechnischer Sicht erforderliche Baugründungspfähle, die neben ihrer bauerforderlichen Hauptfunktion zusätzlich als Wärmetauscher im Untergrund fungieren. Dementsprechend geben die bautechnischen Planungen in den meisten Fällen die Dimensionen des Wärmetauschers vor. Die wärmeübertragende Fläche der Energiepfähle ist also meist durch gründungsstatische Gesichtspunkte wie Abmessungen und Anzahl der Pfähle begrenzt bzw. vorgegeben. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 7 ersichtlich.

Oft sind Baupfähle aufgrund baustatischer Gegebenheiten ohnehin erforderlich, wodurch sich im Vergleich zu Erdwärmesonden oft wesentlich günstigere wirtschaftliche Rahmenbedingungen ergeben können, da die zusätzlichen Bohrkosten für die Errichtung von Erdwärmesonden entfallen.

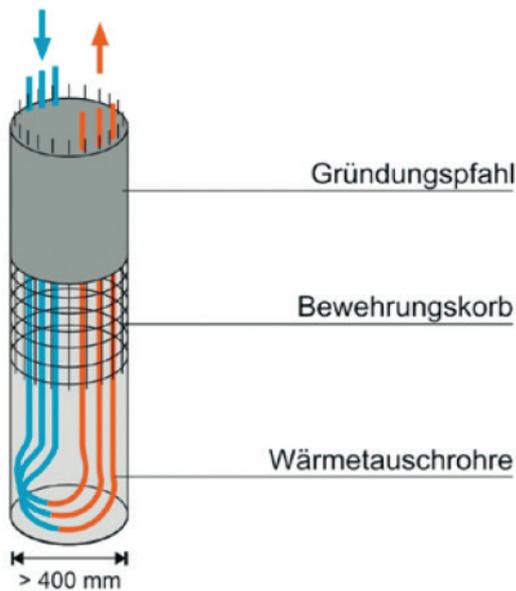


Abbildung 7: Prinzipskizze eines Energiepfahls (Bockelmann et al., 2011)

1.2.2.2 Entzug von Wärme mit Wasserentnahme

Beim Entzug von Wärme aus dem Untergrund mit Wasserentnahme wird in den meisten Fällen Grundwasser genutzt. Das Grundwasser wird aus dem Untergrund entnommen, thermisch genutzt und in nahezu allen Fällen in den Untergrund rückgeführt (siehe [Abbildung 8](#)). Die thermische Nutzung des Grundwassers kann dabei zur Beheizung bzw. Kühlung erfolgen.

Das abgekühlte bzw. erwärmte Grundwasser ist aus wasserwirtschaftlichen und wasserrechtlichen Gründen in jedem Fall wieder in den Untergrund zurückzuführen. Nur in wenigen hydrogeologisch begründbaren Fällen kann das thermisch genutzte Wasser auch in einen Vorfluter (Fluss, See) eingeleitet werden.

Für diese Nutzungsmethode von Erdwärme ist ein ausreichend ergiebiger Grundwasserleiter erforderlich, der die benötigte Wassermenge in der technisch notwendigen Qualität und Temperatur zu Verfügung stellt.

Die Grundwasserentnahme erfolgt aus einem Entnahmehrunden, die Rückführung des genutzten Wassers in den Untergrund mit Hilfe eines Schluckbrunnens oder einer Versickerungsanlage.

Um eine thermische Beeinflussung zwischen dem Entnahmehrunden und dem Schluckbrunnen zu vermeiden, ist auf deren erforderliche Minimaldistanz und die natürliche Strömungsrichtung des Grundwassers zu achten. Für einen nachhaltigen Betrieb sind detaillierte planerische Arbeiten unumgänglich. Der notwendige Abstand zwischen einem Entnahmehrunden und einem Schluckbrunnen erfordert relativ große Grundstücke, welche im Bereich von urbanen Gebieten oft nur schwer verfügbar sind, was ein Hemmnis dieser Wärmeentzugsvariante darstellt.

Die Qualität des Grundwassers spielt bei dessen thermischer Nutzung ebenfalls eine wichtige Rolle. Beispielweise können Korrosion, Verockerungen und Versinterungen zu andauernden

bzw. wiederkehrenden technischen Problemen im Betrieb führen, was die Wirtschaftlichkeit dieser Projekte oft maßgeblich negativ beeinflusst.

Ein wesentlicher Kostenfaktor im Betrieb einer Grundwasseranlage entsteht aus der eingesetzten Pumpenergie. Die Pumpenergie kann eine maßgebliche Größe für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage darstellen und muss daher bei der Auswahl der Gunstzonen einbezogen werden. Dazu ist die Analyse des Flurabstandes des Grundwassers zielführend. Der Flurabstand ist definiert als der Abstand des Grundwasserspiegels zur jeweiligen Geländeoberfläche.

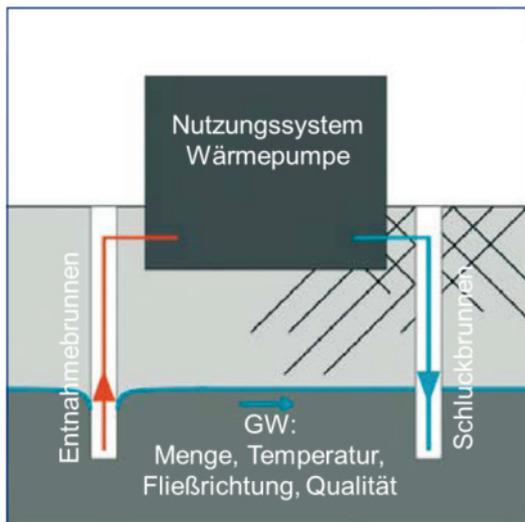


Abbildung 8: Thermische Nutzung von Grundwasser (Bockelmann et al., 2011)

1.2.3 Anwendungskonzepte für die Wärmenutzung

Bei der Nutzung der Erdwärme unterscheidet man zwischen indirekter Nutzung (niedrige Temperatur erfordert den Einsatz von Wärmepumpen) und direkter Nutzung (Temperatur ausreichend für Kühlung bzw. ausreichend hoch für Heizung mittels Wärmetauscher).

In Tabelle 2 beschreibt Möglichkeiten der indirekten und direkten Nutzung mit und ohne Wasserentnahme in der im Projekt untersuchten Modellregion Graz. Die dazugehörigen Anwendungskonzepte sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 2: Möglichkeiten der indirekten und direkten Erdwärmenutzung mit und ohne Wasserentnahme für die Modellregion Graz

	Ohne Wasserentnahme	Mit Wasserentnahme
Indirekte Wärmenutzung	Für Heizung und Kühlung in Graz möglich. Im Projekt wird der Einsatz von Erdwärmesonden in Kombination mit Wärmepumpen untersucht. Bereits bestehende Nutzungen in Graz ist z.B. der Einsatz von Energiepfählen im Gebiet Reininghaus. Anwendungskonzept: Abbildung 9, links	Die indirekte Nutzung des Grundwassers in Graz ist mittels Wärmepumpen für Heizzwecke möglich. Für Kühlung ist eine indirekte Nutzung mit Einschränkungen möglich. Die Erhöhung der Grundwassertemperatur im Sommer stellt in Teilgebieten bereits ein Problem dar. Anwendungskonzept: Abbildung 10, links
Direkte Wärmenutzung	Technisch ist eine direkte Nutzung mittels „Heat Pipes“ möglich. Die direkte Erdwärmenutzung ohne Wasserentnahme wird für Heizung und Kühlung in Graz im Rahmen des Projektes nicht betrachtet, da die im Untergrund vorhandenen Temperaturen zu gering sind. Anwendungskonzept: Abbildung 9, rechts	Die Grundwassertemperaturen in Graz (gemessene Werte etwa von 10°C bis 17°C) ermöglichen keine direkte Nutzung für Heizzwecke. Für Kühlung ist eine direkte Nutzung mit Einschränkungen möglich. Die Erhöhung der Grundwassertemperatur im Sommer stellt in Teilgebieten bereits ein Problem dar. Anwendungskonzept: Abbildung 10, rechts

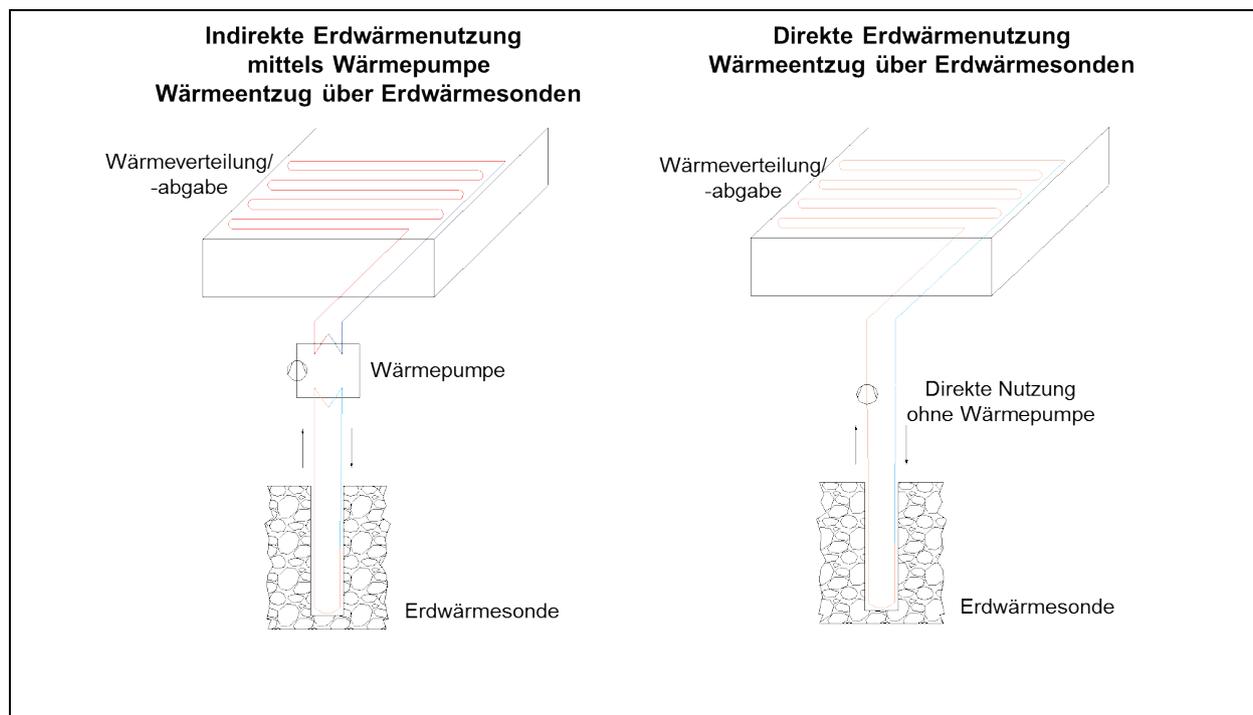


Abbildung 9: Anwendungskonzept zur Nutzung von Erdwärme ohne Wasserentnahme

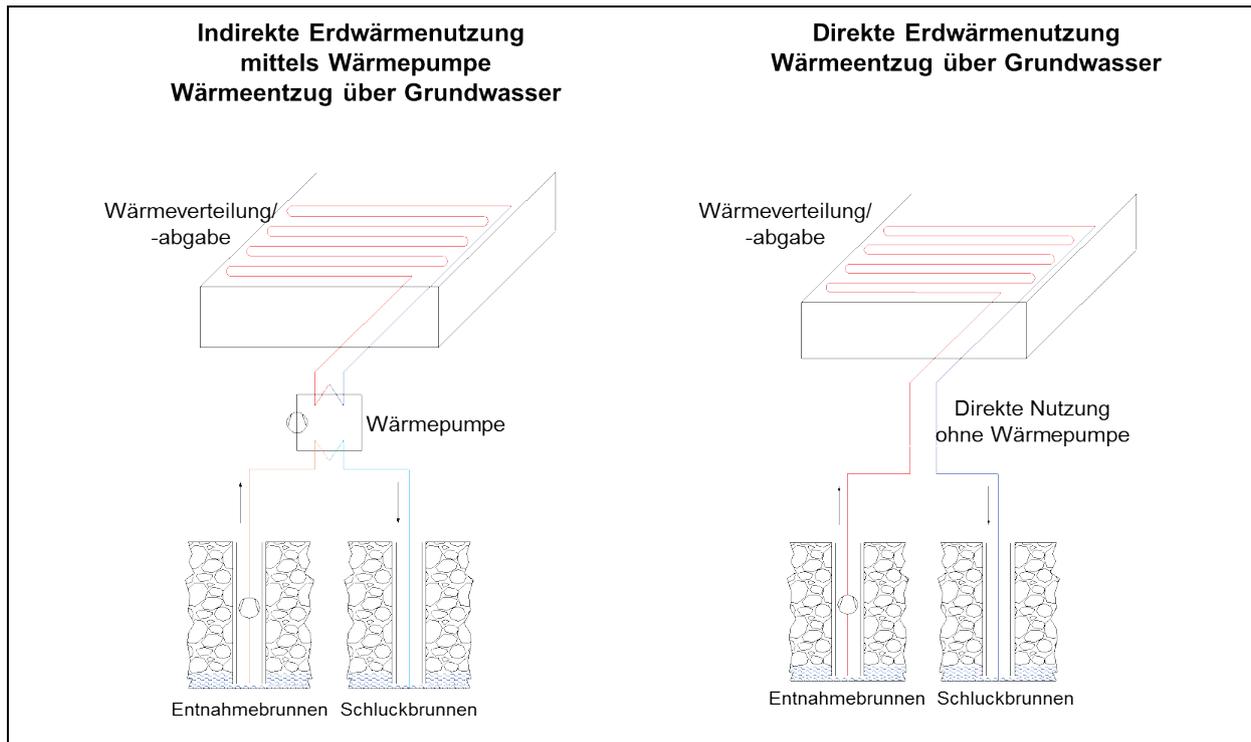


Abbildung 10: Anwendungskonzept zur Nutzung von Erdwärme mit Wasserentnahme

1.2.4 Saisonale Speicherung und Regeneration von Wärme im Untergrund

Grundsätzlich besteht bei geothermischen Nutzungen ohne Wasserentnahme aus dem Untergrund in den meisten Fällen eine Diskrepanz zwischen der entnommenen Energie und jener Energie, die durch den natürlichen Erdwärmefluss regeneriert wird. Vor allem betrifft dies die in Kapitel 1.2.2.1 dargestellten Methoden, wie z.B. Erdwärmesonden.

Erdwärmesonden (Tiefe bis etwa 300 m) nutzen die höhere Temperatur des Untergrundes zur Bereitstellung einer gleichbleibenden höheren Temperatur (= Quelltemperatur) zur Nutzung mittels Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden. In Abhängigkeit von den Untergrundeigenschaften ist zu beachten, wie hoch die entzogene Wärmemenge für eine derartige Nutzung übers Jahr ist, und ob dieser Wärmeentzug durch das natürliche Nachfließen der Untergrundwärme abgedeckt werden kann.

Um die Erdwärme effizient zu nutzen, sollte die Quelltemperatur für die Auslegung der Wärmepumpe über die Nutzungsdauer möglichst hoch sein und nicht im Laufe der Jahre absinken. Darauf ist insbesondere bei Erdwärmesondenfelder zu achten, da die Nachbarsonden das Nachfließen der Wärme behindern. Um ein Absinken der Quelltemperatur für die Wärmenutzung im Winter zu verhindern, kann Wärme in den Sommermonaten dem Untergrund über die Erdwärmesonden zugeführt werden. Dies kann auf unterschiedliche Art erfolgen:

- Nutzung der Kühlwärme aus Gebäuden (Wohnbauten, Bürogebäude etc.) (siehe [Abbildung 11](#))
- Aktive Zuführung von Wärme aus vorhandener Wärme: Abwärme aus Betrieben, Solarwärme aus Solaranlagen

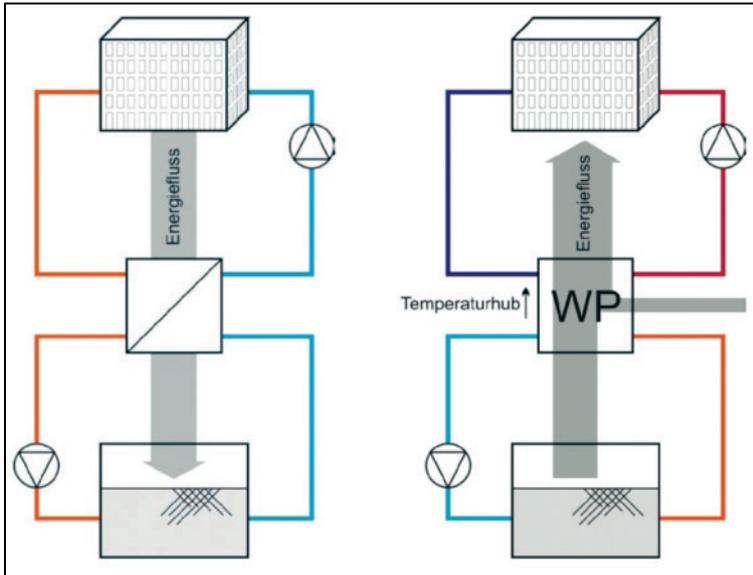


Abbildung 11: Wärmeflüsse bei saisonaler Speicherung im Sommerbetrieb (Gebäudekühlung) und im Winterbetrieb (Gebäudeheizung) (Bockelmann et al., 2011)

Wird nur die Kühlenergie von Gebäuden genutzt, wird diese Zuführung von Kühlwärme als „Free-Cooling“ bzw. „Geo-Cooling“ bezeichnet. Da die dabei in den Untergrund einzubringende Wärme begrenzt ist, muss genau untersucht werden, ob „Free-Cooling“ für einen nachhaltigen Betrieb ausreichend ist.

Die aktive Zuführung von Wärme in den Untergrund wird als „Regeneration“ oder als „Saisonspeicherung“ bezeichnet. Von „Regeneration“ wird gesprochen, wenn im Sommer weniger Wärme in das Erdwärmesondenfeld geladen als im Winter entzogen wird. Von „Saisonspeicherung“ spricht man, wenn im Sommer mehr Wärme in den Untergrund eingebracht als im Winter herausgenommen wird (siehe [Abbildung 12](#)).

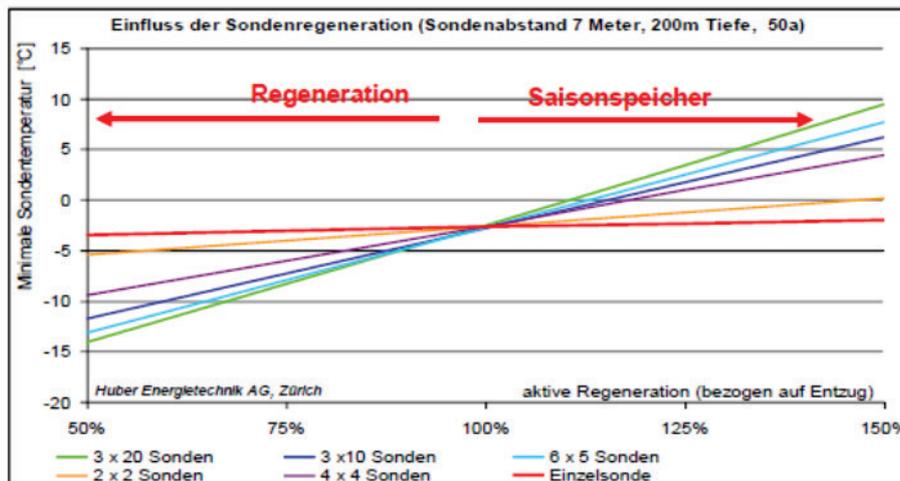


Abbildung 12: Regeneration und Saisonspeicherung bei Erdwärmesonden (Huber Energietechnik AG, aus Naef, 2015)

Eine Übersicht zu den möglichen Wärmequellen für Regeneration bzw. Speicherung zeigt [Abbildung 13](#).

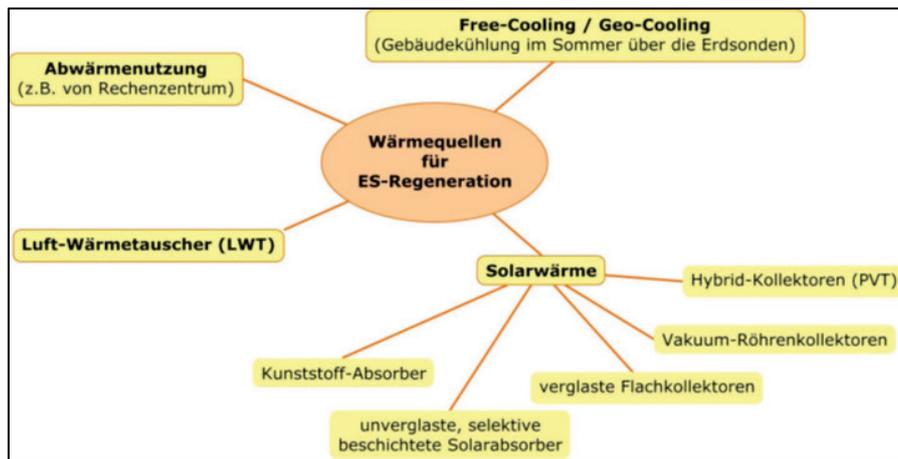
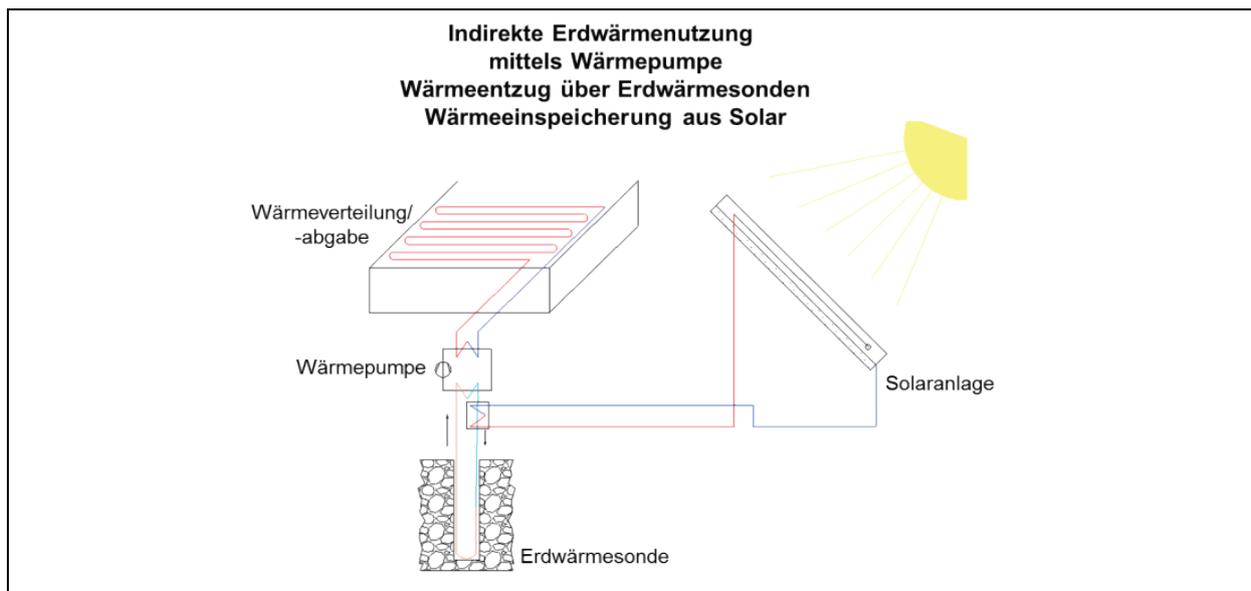


Abbildung 13: Übersicht von Wärmequellen zur Regeneration von Erdsondenfeldern bzw. Saisonspeicherung (Naef, 2015)

Die Ergebnisse der Studie „RegenOpt, Schlussbericht 05/2015“ (Stadt Zürich, 2015) zeigen, dass eine aktive Regeneration von Erdwärmesondenfelder im dicht verbauten Gebieten gegen eine starke Erdwärmesonden-Auskühlung notwendig ist. Die Kostenunterschiede zwischen den betrachteten Regenerationsmethoden (Luft-Wärmetauscher, verglaste Kollektoren, unverglaste Kollektoren selektiv und nicht selektiv, PVT²-Kollektoren) sind gering. Die Nutzung von „Free-Cooling“ liegt für das betrachtete Gebäude hauptsächlich im Komfortgewinn und nicht in der Regeneration (nur etwa 15% der entzogenen Energie). Für eine langfristig nachhaltige Nutzung ist jedenfalls eine Regeneration vorzusehen.

In Abbildung 14 ist das Anwendungskonzept für eine indirekte Erdwärmenutzung mit Erdwärmesonden in Kombination mit einer Solaranlage dargestellt, wobei die solare Wärme im Untergrund gespeichert wird. Falls verfügbar kann auch Abwärme von Betrieben zur Speicherung im Untergrund verwendet werden.



² PVT-Kollektoren: Kombinierte Photovoltaik- und Solarthermiekollektoren

1.3 Verwendete Methoden

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die im Projekt gewählte Vorgangsweise und die durchgeführten Arbeitsschritte gegeben. Weiters werden die angewandten Methoden für

- die Definition von unterirdischen Gunstzonen in der Modellregion,
- die Simulation von Grundwasserströmungen und Wärmetransport im Untergrund
- die Wärme- und Kühlbedarfsanalyse,
- die ökologischen Bewertung und
- die ökonomischen Bewertung

beschrieben.

1.3.1 Vorgangsweise im Projekt

Die Entwicklung der Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme erfolgte anhand des urbanen und periurbanen Raums der Modellregion Graz. Für die Modellregion wurden unterirdische Gunstzonen für oberflächennahe Erdwärme ohne Wasserentnahme, grundwasserbürtige Erdwärme und deren Kombinationen ausgewiesen. Die Ergebnisse dazu sind in Abschnitt „2.1 Unterirdische Gunstzonen in der Modellregion Graz“ dargestellt.

In diesen Gunstzonen wurden Fallbeispiele identifiziert, für die eine Wärme- und Kühlbedarfsanalyse durchgeführt wurde. Aufbauend auf dem erhobenen Wärme- und Kühlbedarf wurde für diese Fallbeispiele ein mögliches Wärmeversorgungskonzept auf Basis von oberflächennaher Erdwärme definiert (siehe Abschnitt „2.2 Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz“).

Für die Fallbeispiele wurde eine ökonomische und ökologische Bewertung durchgeführt. Weiters wurden die Auswirkungen auf den Untergrund mittels Simulationen untersucht. Dafür wurde ein auf ein bestehendes instationäres Grundwasserströmungsmodell aufgesetztes Wärmehaushaltsmodell eingesetzt. Damit wurde die Beeinflussung der Untergrundtemperaturen durch Wärmeentnahme und –speicherung analysiert. Ein zentrales Thema war die Berücksichtigung der thermischen und wasserwirtschaftlichen Bestandssituation und die Analyse der Nutzungsoptimierung. Die Ergebnisse der ökonomischen und ökologischen Bewertung und der Auswirkungen auf den Untergrund sind im Abschnitt „2.3 Bewertung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz“ beschrieben.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen für die Fallbeispiele wurde eine Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme entwickelt. Die Methodik beinhaltet eine Vorgehensweise zur verbesserten Umsetzung und Nutzungsoptimierung von Erdwärmeprojekten. Die Methodik ist im Abschnitt „2.4 Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Geothermie“ beschrieben.

Die Projektergebnisse wurden bei zwei Projektbeiräten mit Stakeholdern diskutiert.

1.3.2 Definition von unterirdischen Gunstzonen in der Modellregion

In der Modellregion Grazer liegt aufgrund von sehr umfangreichen früheren Untersuchungen ein großes Datenmaterial über den Untergrund und im speziellen den Grundwasserkörper „Grazer Feld“ vor. Auf Basis dieser Daten erfolgte die Definition von Gunstzonen für verschiedene Nutzungsformen der oberflächennahen Geothermie nach den nachfolgend angeführten Kriterien:

Trockene Geothermie

- Untergrundeigenschaften
- Auswirkungen des Wärmeentzugs aus dem Untergrund über die Nutzungsdauer (thermische Simulation)

Grundwassernutzung mittels Wärmepumpen

- Ergiebigkeit des Grundwasserkörpers (Mächtigkeit, Durchlässigkeit kf-Wert)
- Flurabstände
- Strömungsrichtung und –geschwindigkeit (aus bestehendem Grundwassermodell)
- Thermische Einflüsse (Wärmetransport im Untergrund, Berücksichtigung von Voruntersuchungen der Temperaturverteilung (siehe [Abbildung 23](#)). Das Stadtgebiet von Graz hat das typische urbane Problem von Wärmeinseln im Grundwasser.
- Qualitative Einflüsse durch Reinjektion (hydrochemische Modellierung)
- Kombinierte Nutzung (Heizung, Kühlung)
- Verbotszonen
 - Wasserschutzgebiete ([Abbildung 20](#))
 - „Verbotsgebiete“ für Sommererwärmung des Grundwassers (Kühlung/Klimatisierung): Wärmeinsel im Altstadtbereich ([Abbildung 24](#))
 - Gebiete mit eingeschränkter Nutzung (Schongebiete, speziell bewilligungspflichtig Nutzung, siehe [Abbildung 22](#))
- Vermeidung der Beeinflussung fremder Wasserrechte (Wasserbuch im GIS Steiermark, siehe [Abbildung 21](#))
- Vermeidung einer Verschlechterung des Zustands (EU-Wasserrahmenrichtlinie, österreichische Qualitätszielverordnung Grundwasser)

Kombinierte Nutzung

- Möglichkeiten der Speicherung

1.3.3 Simulation von Grundwasserströmungen und Wärmetransport im Untergrund

Bei der energetischen Nutzung von oberflächennaher Geothermie müssen mögliche Interessenskonflikte mit dem Grundwasser- und Trinkwasserschutz durch den Einsatz von Nutzungskonzepten und Managementtools vermieden werden, vor allem in Hinblick auf das Verschlechterungsverbot der EU- Wasserrahmenrichtlinie. Hier können Simulations- und

Modellierungsverfahren eingesetzt werden, um z.B. die Beeinflussung der Untergrundtemperatur zu untersuchen:

Früher wurden hierfür stark vereinfachte Verfahren eingesetzt. Die Arbeit von Ingerle (1988) beschreibt eine einfache analytische Methode für die Abschätzung der durch geothermische Nutzung beeinflussten Grundwassertemperatur, die von Rauch (1992) weiter entwickelt wurde.

Im Bereich der numerischen Modellierung der Grundwasserströmung hat sich in hydrogeologisch komplexen Umgebungen in den letzten Jahren die Anwendung der Finite Elemente Methode deutlich durchgesetzt. Gerade die Implementierung komplexer Randbedingungen und deren Abhängigkeit von wechselnden hydrogeologischen Rahmenbedingungen werden dadurch deutlich erleichtert. In der Modellregion Grazer Feld besteht ein auf einen längeren Zeitraum (1993-2013) instationär kalibriertes regionales numerisches Modell der Grundwasserströmung (Harum et al., 2007, 2011, 2015; Modellsystem FEFLOW, Diersch, 2009) – ein Finite Elemente Simulationsprogramm mit ausgereiften Datenbank-Schnittstellen und angebundener Ergebnisvisualisierung durch ARCGIS. Die Modellgeometrie und das Elementenetz sind in Abbildung 15 dargestellt.

FEFLOW ist in der Lage „single-species“ und „multi-species“ Stofftransport sowie Wärmetransport zu simulieren. Dazu nutzt es die Differentialgleichungen des Stoff- und Wärmetransports als Grundlage.

Im Folgenden sei eine kurze Zusammenfassung des regionalen Grundwassermodells Grazer Feld dargestellt:

- FEFLOW: 2D horizontales instationäres Strömungsmodell, Diskretisierung durch Dreiecks-Finite Elemente, Anpassung an diverse Vorhaben
- Zeitraum: 1993 bis 2013
- Zeitschritt: 1 Tag
- Vordefinierte Randbedingungen (Wasserspiegellagen Augerinne und Mur, Leakage, Grundwasserneubildung, Entnahmen)
- Kalibrierung: Erreichung einer möglichst guten Anpassung der berechneten an die gemessenen Grundwasserstandsganglinien durch Variation der Systemparameter Durchlässigkeit, nutzbares Porenvolumen und Leakage.
- Aufsatz instationärer Wärmetransport in zwei Fallbeispielen

In Abbildung 15 bis Abbildung 18 sind beispielhaft relevante Ergebnisdaten aus dem Grundwassermodell dargestellt. Zur Kontrolle der simulierten Grundwassertemperaturen und Definition der Randbedingungen für die Fallbeispiele wird das Messstellennetz der Hydrographischen Landesabteilung herangezogen.

Auf dieses Modell kann der Wärmetransport aufgesetzt werden und soll die Basis für die Untersuchung der koordinierten Nutzung und Bewirtschaftung in diesem Projektvorhaben sein. Es wurden für zwei Fallbeispiele mit Grundwasser Teilmodelle ausgeschnitten und auf diese der Wärmetransport aufgesetzt.

Eine sehr umfangreiche und detaillierte Untersuchung der Einflussfaktoren auf den Wärmetransport seicht liegender Grundwasserleiter erfolgte durch Händel (2010). Händel et al. (2013) entwickelten zusätzlich einen mit FEFLOW verlinkten „Multi Layer Model Tool“, der den thermischen Austausch zwischen der Atmosphäre und dem Grundwasserkörper reproduzieren kann.

Andere Beispiele für die regionale Modellierung des Wärmetransports finden sich in Kupfersberger (2009) und Epting et al. (2013), letztere Arbeit für einen Aquifer im Stadtgebiet von Basel. Weitere neuere Arbeiten, die sich mit der Modellierung des Wärmetransports befassen sind u.a: Engeler et al. (2011), Nam & Ooka (2010), Méndez et al (2010), Ma & Zheng (2010), Hidalgo et al. (2009), Ferguson (2007) und Zhou & Zhou (2009).

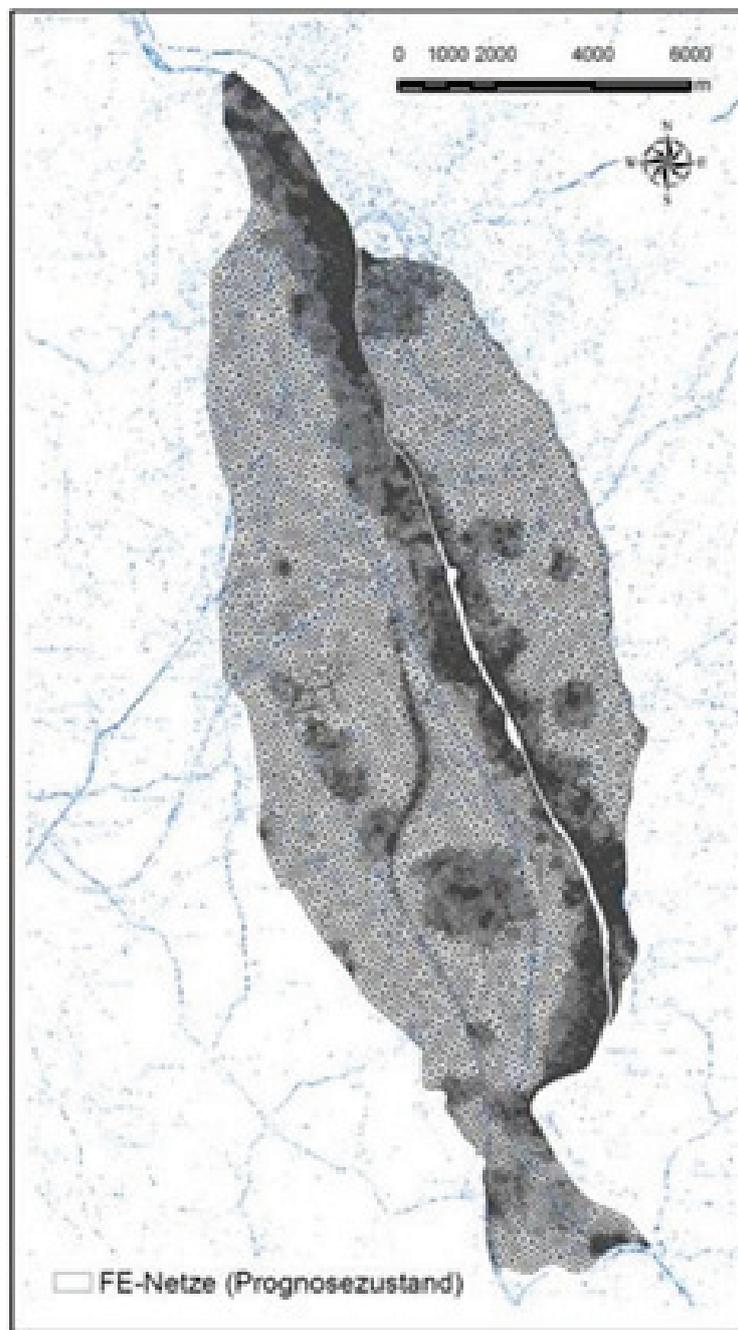


Abbildung 15: Modellgeometrie und Elementenetz des Grundwassermodells „Grazer Feld“



Abbildung 16: Grundwassermodell „Grazer Feld“ – Nordteil, Grundwasserisohypsen (Strömungsrichtung im rechten Winkel dazu)

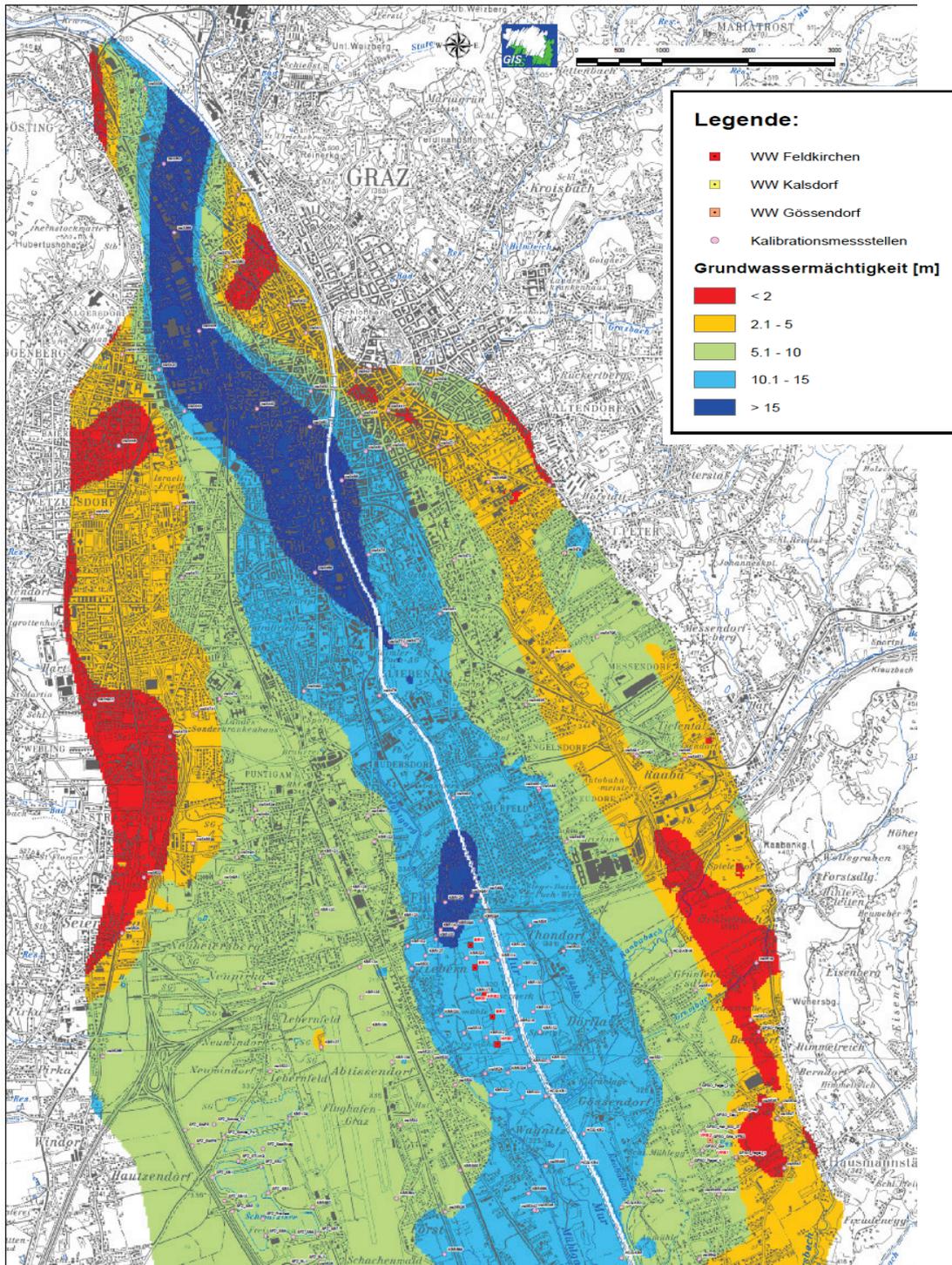


Abbildung 17: Grundwassermodell „Grazer Feld“ – Nordteil, Grundwassermächtigkeiten

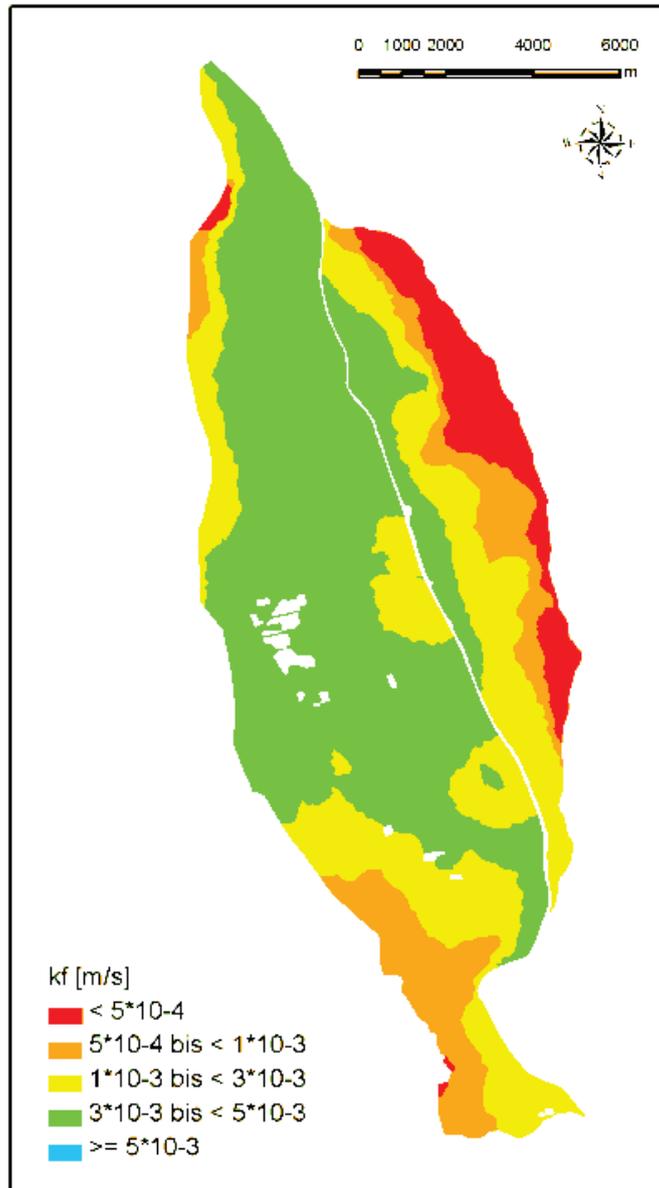


Abbildung 18: Grundwassermodell „Grazer Feld“ – Nordteil, Durchlässigkeiten

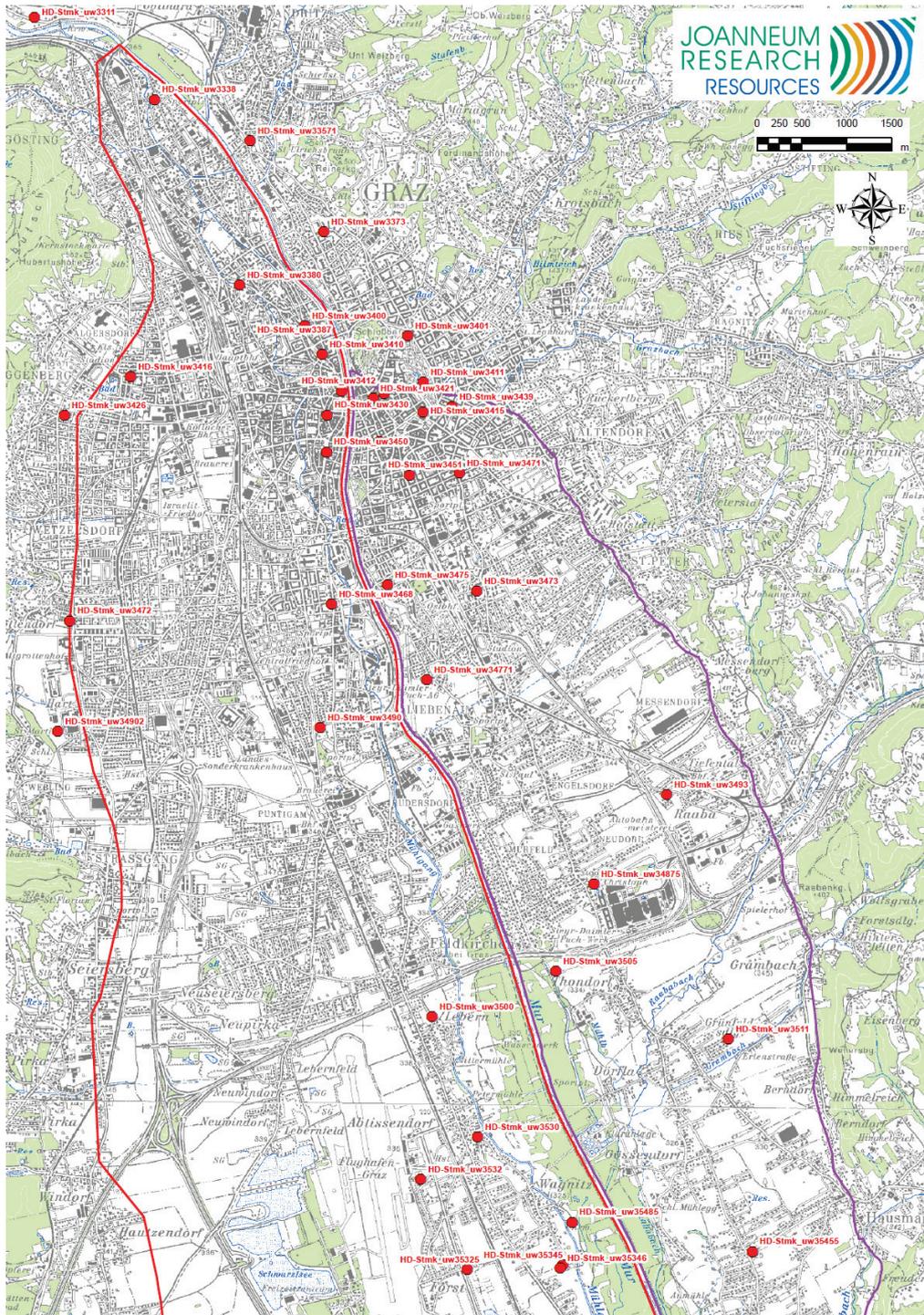


Abbildung 19: Grundwassertemperaturmessnetz der Hydrographischen Landesabteilung im Raum Graz

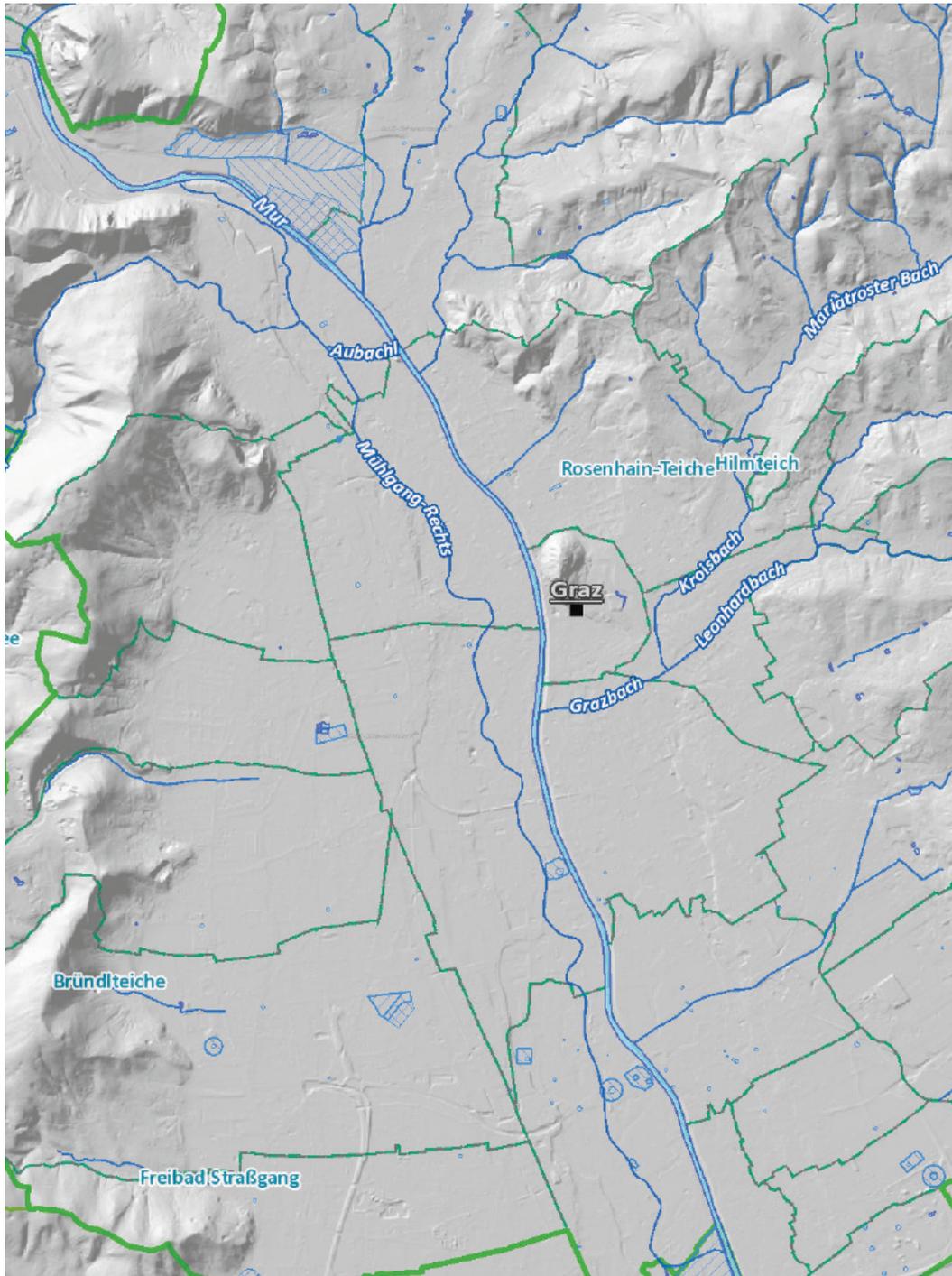


Abbildung 20: Trinkwasserschutzgebiete im Raum Graz (GIS Steiermark, 2015)

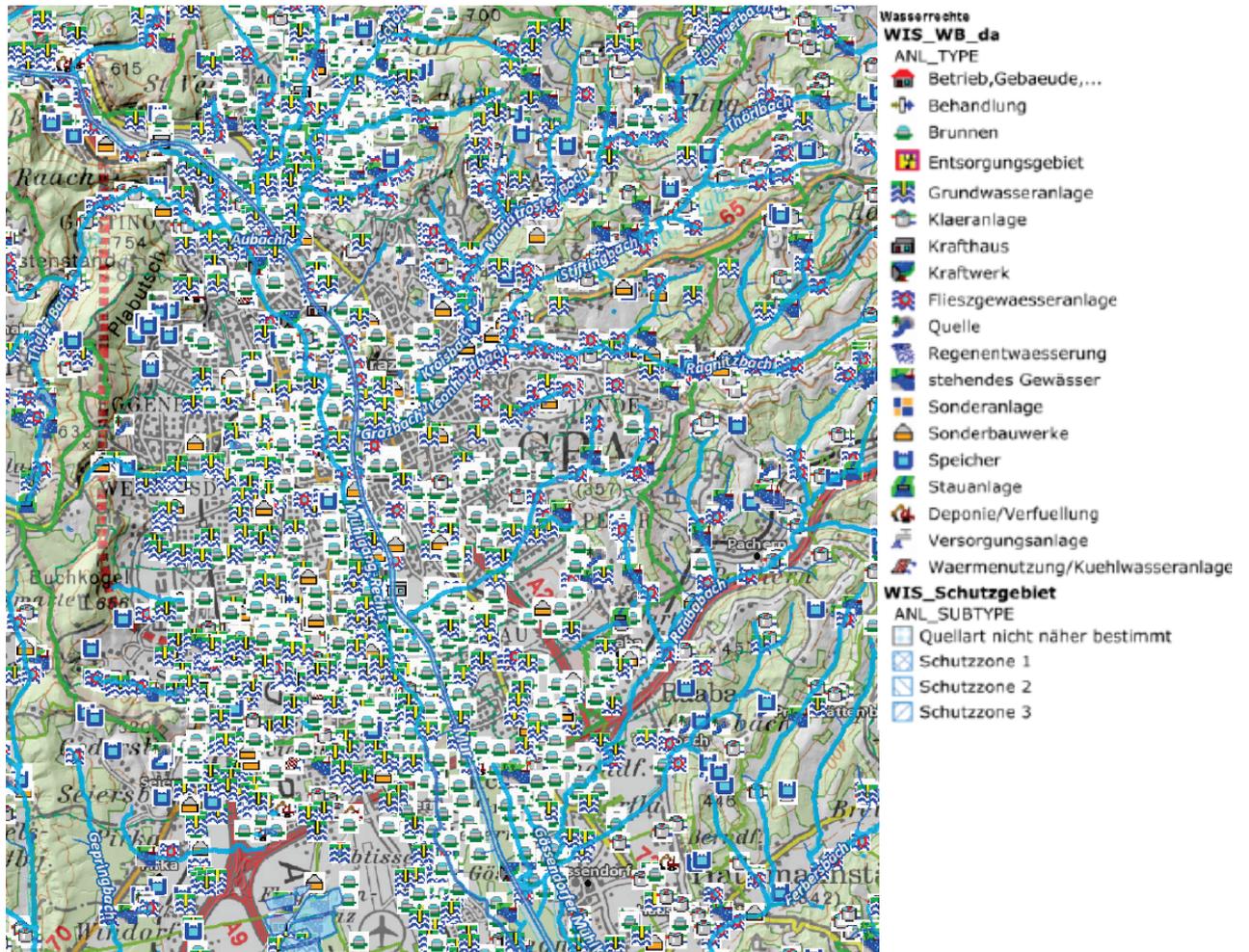


Abbildung 21: Wasserrechte (GIS Steiermark, 2015)

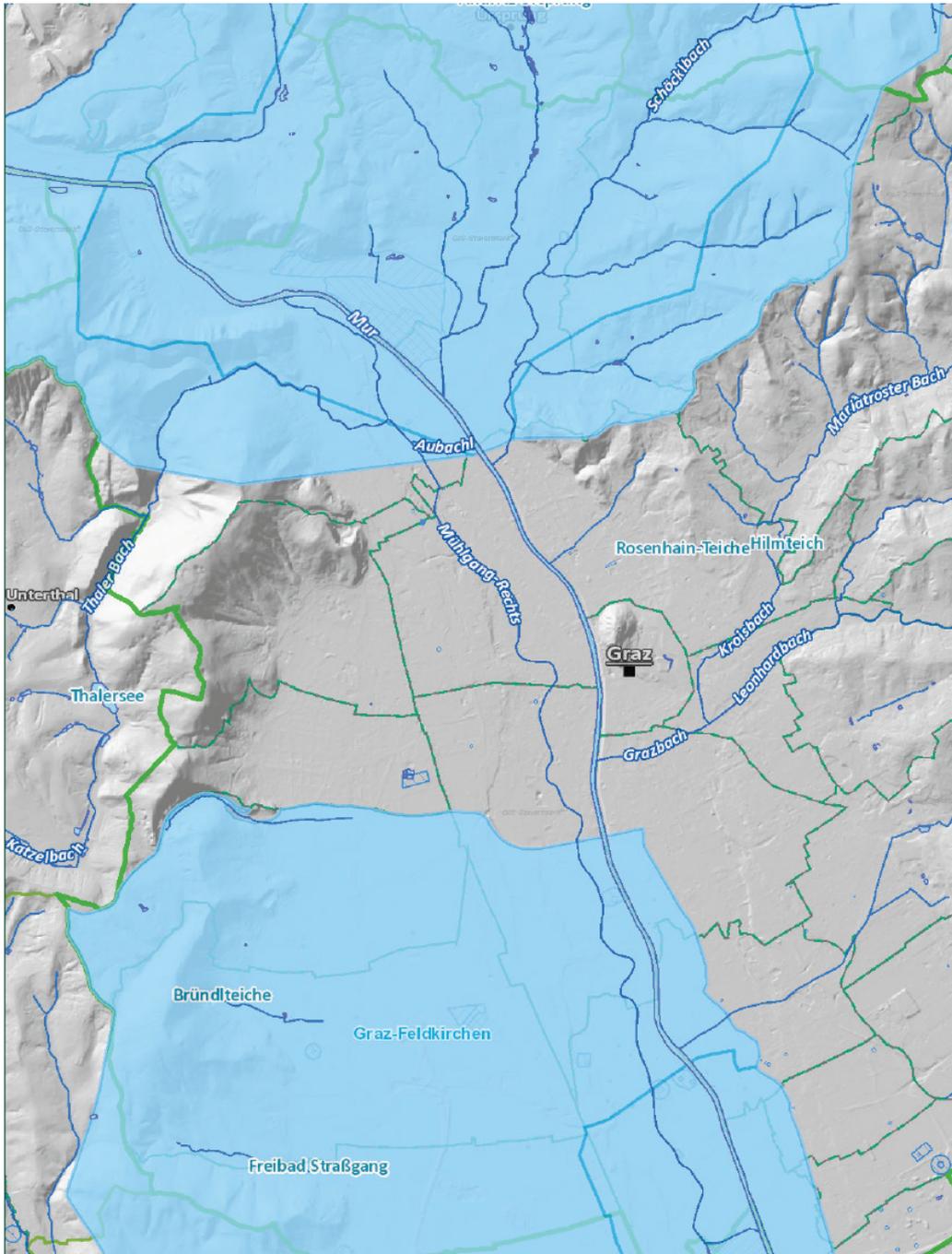


Abbildung 22: Trinkwasserschongebiete im Raum Graz (GIS Steiermark, 2015).

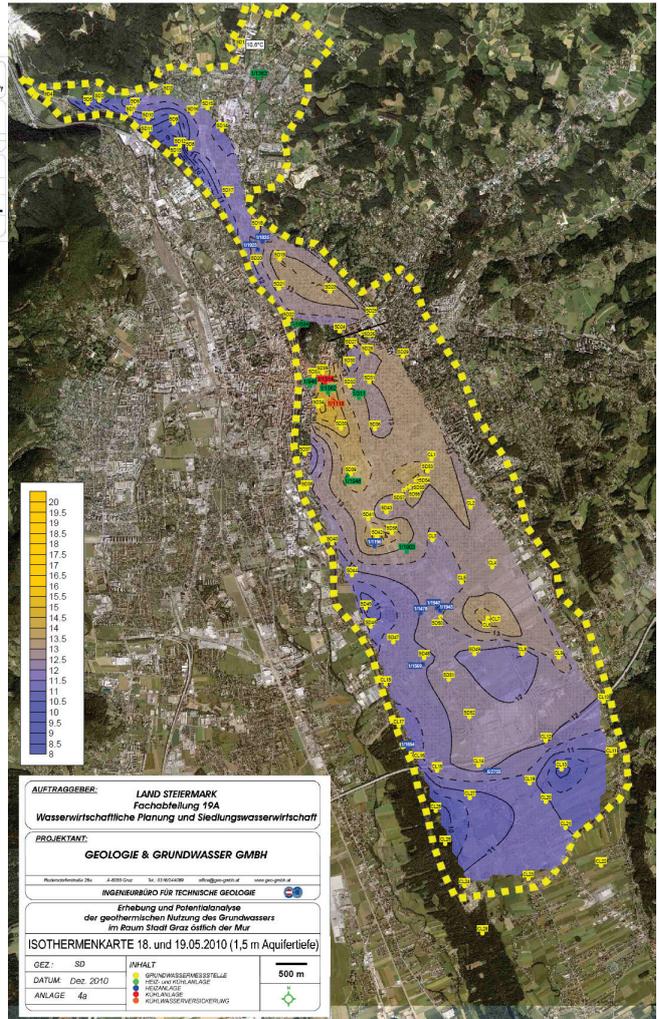
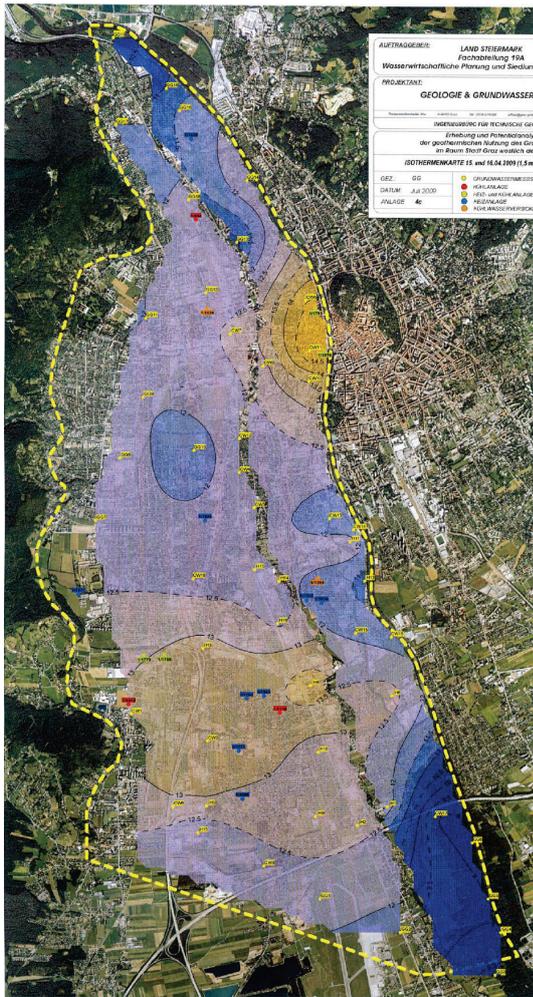


Abbildung 23: Thermische Situation Grundwasser Graz-West und Graz-Ost (Geologie & Grundwasser GmbH 2009 und 2012).

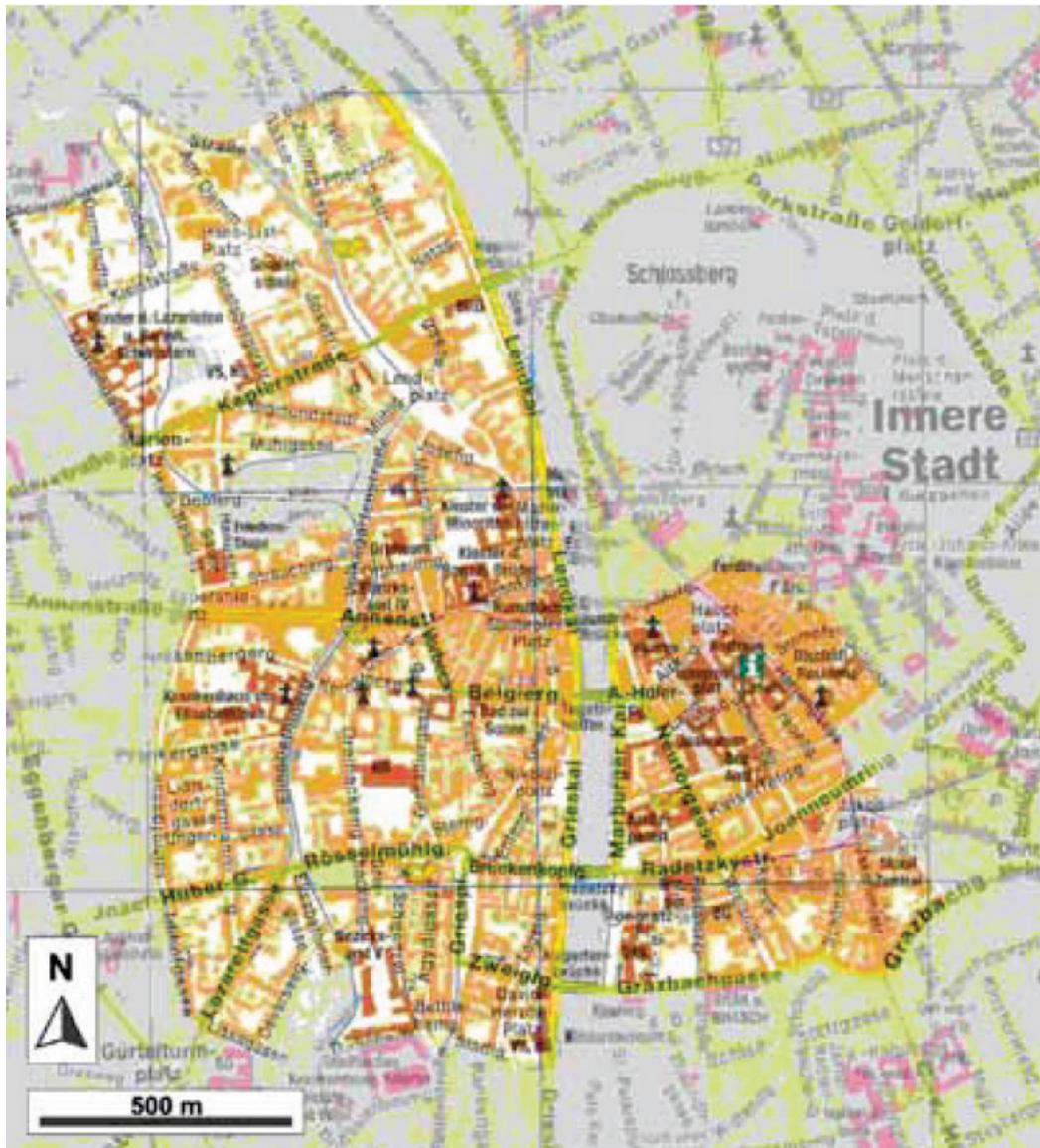


Abbildung 24: Vorgeschlagene Verbotzone im Stadtzentrum von Graz für Anlagen, bei denen Grundwasser zur Gebäudekühlung verwendet wird (G. Giuliani et al., 2012)

1.3.4 Wärme- und Kühlbedarfsanalyse

1.3.4.1 Methodik

Es stehen verschiedene Quellen zur Ermittlung des Wärme- und Kühlbedarfes von Stadtgebieten zur Verfügung. Teilweise sind diese Daten der Allgemeinheit zugänglich wie z.B. veröffentlichte Studien, digitaler Atlas, Flächenwidmungspläne um einige zu nennen. Teilweise stehen diese Daten nur einem eingeschränkten Kreis zur Verfügung. So unterliegen zum Beispiel statistische Daten aus dem Adressen-Gebäude- und Wohnungsregister (AGWR) genau definierten Zugriffsbestimmungen (Statistik Austria, 2016):

Zugang zum AGWR

Zugriffsberechtigungen

Das GWR-Gesetz räumt folgenden Stellen eine Nutzung der Daten des Adress-GWR-Online für Verwaltungszwecke ein:

- Die **Gemeinden** können die **gemeindeeigenen Daten** verwenden.
- Das **BMWF**, das **BMG**, das **BMLFUW**, das **BMF**, das **BMJ** und das **Bundesdenkmalamt** haben einen **Lesezugriff auf ausgewählte GWR-Daten**.
- Die **Länder** erhalten einen Zugriff auf alle Daten ihres Landes sobald landesrechtliche Vorschriften geschaffen wurden.
- Dem **Zentrale Melderegister** werden die **Wohnungsadressen** zur Verfügung gestellt.

Aus Datenschutzgründen ist **kein öffentlicher Zugriff auf Einzeldaten** möglich. Auswertungen aus dem Gebäude- und Wohnungsregister dürfen nur unter Berücksichtigung der **statistischen Geheimhaltungspflicht** vorgenommen und veröffentlicht werden.

Abbildung 25: Zugang zum AGWR (Statistik Austria, 2016)

Dargestellt werden nachfolgend jene Quellen, die im Rahmen des Projektes aus energietechnischer Sicht geprüft und verwendet wurden.

Wärme- und Kühlbedarf:

- AGWR – Adressen-Gebäude und Wohnungsregister
- Energieausweisdatenbank Land Steiermark - ZEUS
- Austrian Heatmap (Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2015)
- „Tabula – Typologie österreichischer Wohngebäude“ (Amtmann& Groß, 2011)
- Branchenauswertung KMU Scheck: Dienstleistungsunternehmen und produzierende Betriebe (Mandl & Kapusta, 2011)
- Energieausweise in öffentlichen Gebäuden
- Erstellte Sanierungskonzepte und Energieausweise vergleichbarer Objekte
- reale Verbrauchswerte in den Objekten
- Flächenwidmungsplan und Stadtentwicklungskonzept Stadt Graz

Wärmequellen:

- Abwärmekataster
- Solardachkataster der Stadt Graz

Die Ermittlung des Wärme- und Kühlbedarfes sollte unter Verwendung von vorhandenen statistischen Daten erfolgen. Diese Daten wurden auf Eignung für die Verwendung im Projekt geprüft. Merkmale dafür sind vorrangig Aktualität und Geocodierung der Daten.

Die Herausforderungen im Projekt waren:

- Datenbereitstellung in erforderlichem Detaillierungsgrad
- Art der Objektnutzung bzw. gemischte Nutzung: Wohnen, Industrie, Gewerbe & Dienstleistungen etc,
- „Verortung“ der Informationen: örtliche Zuordnung der Objekte (Adresse/Raster) zu den Gunstzonen und Fallbeispielen
- Wärme- und Kühlbedarf für Objekte
- Zeitliche Detaillierung der Bedarfsdaten (Jahresverlauf)

Im Rahmen des Projektes wurde der Kühlbedarf für Wohngebäude nicht berücksichtigt. Es wurde davon ausgegangen, dass Wohnbauten mit ausreichend sommerlichem Wärmeschutz ausgestattet sind und eine aktive Kühlung nicht erforderlich ist. Der Kühlbedarf für Raumkühlung in Bürogebäuden wurde jedoch berücksichtigt. Verwendet wurde der ausgewiesene Kühlbedarf aus Energieausweisen vergleichbarer Objekte (Baualter, Bauteilaufbauten, Sanierungsgrad...).

In Abbildung 26 ist der Ablauf für die Wärmebedarfsermittlung dargestellt. Eine Unterscheidung ist für den Bereich Wohnen und Gewerbe/Industrie erforderlich.

Für die Betrachtung von Neubaugebieten wurde die verfügbare Fläche im jeweiligen Fallbeispiel herangezogen. Flächenwidmungsplan und Bebauungsdichte sind die Grundlage. Unter Annahme eines Versiegelungsgrades bzw. Anteiles für Verkehrsflächen kann die mögliche Wohnfläche ermittelt werden. Der Wärmebedarf im Neubau kann über die Neubauanforderungen laut Baugesetz (in der Steiermark derzeit OIB Richtlinie 6) und/oder über die Anforderungen für die Gewährung einer Wohnbauförderung erfolgen. Letztere hat in der Steiermark die strengeren Anforderungen und wurde herangezogen.

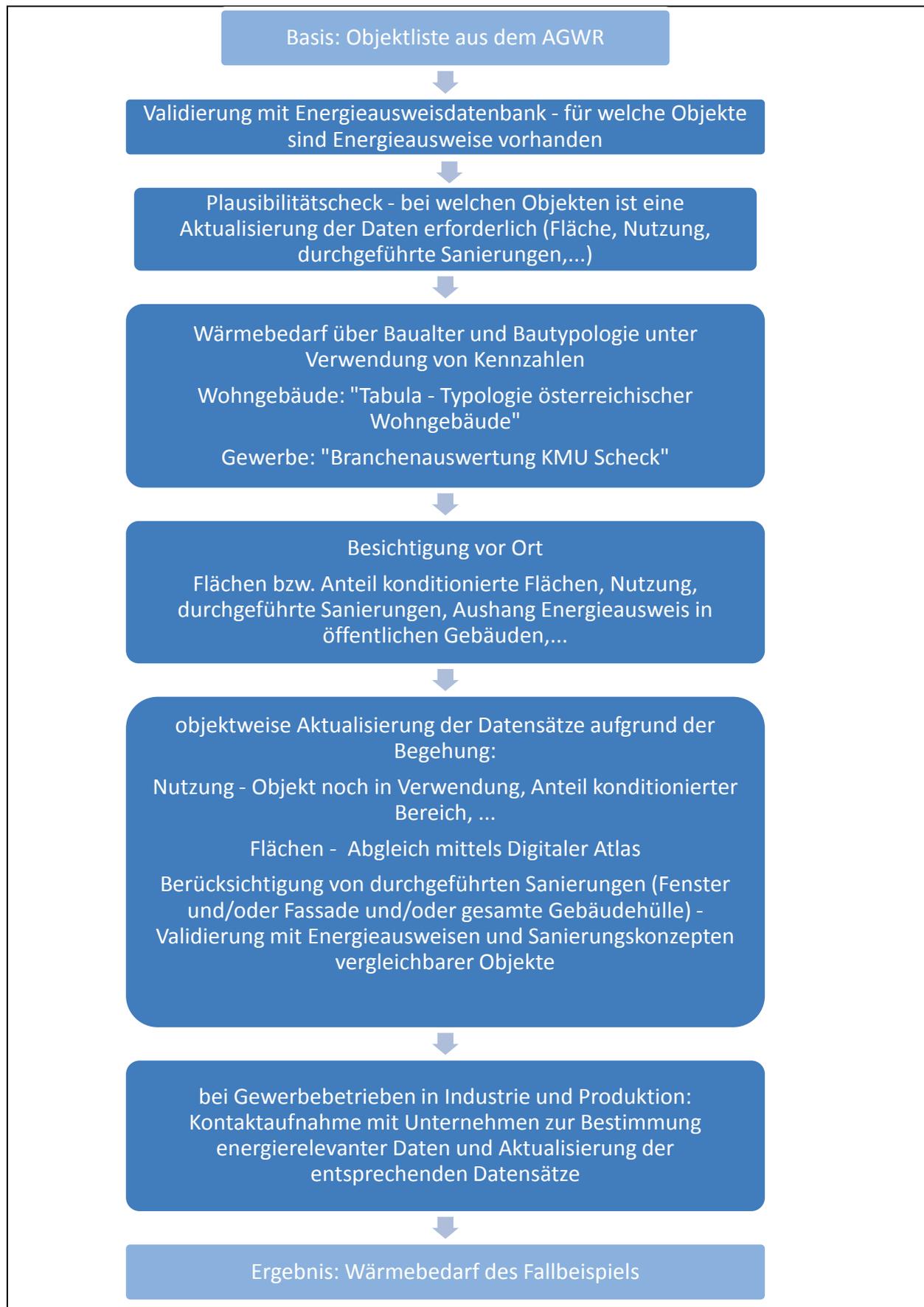


Abbildung 26: Prozess der Wärmebedarfsermittlung für die Fallbeispiele

1.3.4.2 Datengrundlagen

In der Folge werden die Datengrundlagen, die zur Bestimmung des Wärme- und Kühlbedarfs geprüft und bei positiver Beurteilung zur Berechnung genutzt wurden, beschrieben:

AGWR (Adressen, Gebäude- und Wohnungsregister) – Verwaltungsbericht Gebäude

Die Daten aus dem AGWR stellen die zentrale Basis für die Ermittlung des Wärme- und Kühlbedarfes dar. Die Anzahl der Objekte im betrachteten Gebiet kann über die Geocodierung automatisiert ausgegeben werden. Die für die Ermittlung des Wärme- und Kühlbedarfes zugehörigen Merkmale wurden betrachtet.

- Adresse
- Fläche
- Nutzung
- Bauperiode
- Wärmeversorgung
- Energiekennzahl
- Weitere energierelevante Gebäudemerkmale

Eine detaillierte Beschreibung zum AGWR befindet sich auf der Homepage der Statistik Austria (2013).

Der Datensatz vom Grazer Stadtgebiet wurde vom LOI-Partner, dem Umweltamt der Stadt Graz, zur anonymisierten Verwendung im Projekt zur Verfügung gestellt. Es erfolgte keine Freigabe zur öffentlichen Darstellung von Auswertungen im Endbericht.

Eine erste Plausibilitätsprüfung ergab, dass eine vertiefende Betrachtung der Objekte vor Ort erforderlich ist, weil Angaben teilweise unvollständig und offensichtlich nicht plausibel sind:

- keine Flächenangaben für Nutzungskategorien (Defaultwert 4m² bzw. 20m² Nutzfläche)
- kaum Energiekennzahlen ausgewiesen
- Aktualität der Daten nicht immer gegeben (Aktualisierung des AGWR nur im Anlassfall)

Die teilweise mangelhafte Datenqualität ist bekannt und liegt einerseits an nicht immer vollständigen Datensätzen aus der Erstbefüllung des Registers (2004) und andererseits an der Aktualisierung der Datensätze. Die Aktualisierung bzw. Neuerstellung erfolgt im Anlassfall in einem 2-stufigen Verfahren:

1. Baubewilligung (Aktualisierung bekannter Daten)

2. Fertigstellung

Anlass wäre zum Beispiel ein Umbau/Zubau/Abriss. Bekannte Merkmale werden in diesem Fall aktualisiert. Änderungen in der Nutzung bzw. Leerstand sind oft nicht erfasst, da hier kein Anlassfall zur Aktualisierung lt. AGWR besteht.

10.3 GEBÄUDEEIGENSCHAFT GEMÄß EU-GEBÄUDEKLASSIFIKATION

Insgesamt werden folgende Gebäudeeigenschaften unterschieden

- Gebäude mit einer Wohnung
- Gebäude mit 2 oder mehr Wohnungen
- Wohngebäude für Gemeinschaften
- Hotels und ähnliche Gebäude
- Bürogebäude
- Groß- und Einzelhandelsgebäude
- Gebäude des Verkehrs- und Nachrichtenwesens
- Industrie- und Lagergebäude
- Gebäude für Kultur- und Freizeitzwecke sowie das Bildungs- und Gesundheitswesen
- landwirtschaftliches Nutzgebäude
- freistehende Privatgarage
- Kirchen, sonstige Sakralbauten
- Pseudobaulichkeit
- sonstiges Bauwerk

Abbildung 27: Gebäudeeigenschaften im AGWR (Statistik Austria, 2014)

Nachfolgend werden die zusätzlich verwendeten Datenquellen angeführt und die Eignung zur Nutzung im Projekt beschrieben.

Energieausweisdatenbank Land Steiermark - ZEUS

Das Land Steiermark nutzt die Energieausweisdatenbank „ZEUS“. Derzeit gibt es noch keine Schnittstelle zur Verknüpfung mit dem AGWR. Die Verpflichtung zum Hochladen erstellter Energieausweise in die ZEUS- Energieausweisdatenbank ist im steiermärkischen Baugesetz seit April 2015 verankert. Die Abdeckung des Grazer Stadtgebietes ist derzeit noch sehr gering. Die Datensätze sind nicht geocodiert und die Auswertung vorhandener Daten kostenpflichtig. Die Datenquelle wurde für die Fallbeispiele geprüft, jedoch aufgrund der sehr geringen Anzahl verfügbarer Daten und den oben genannten Gründen nicht genutzt.

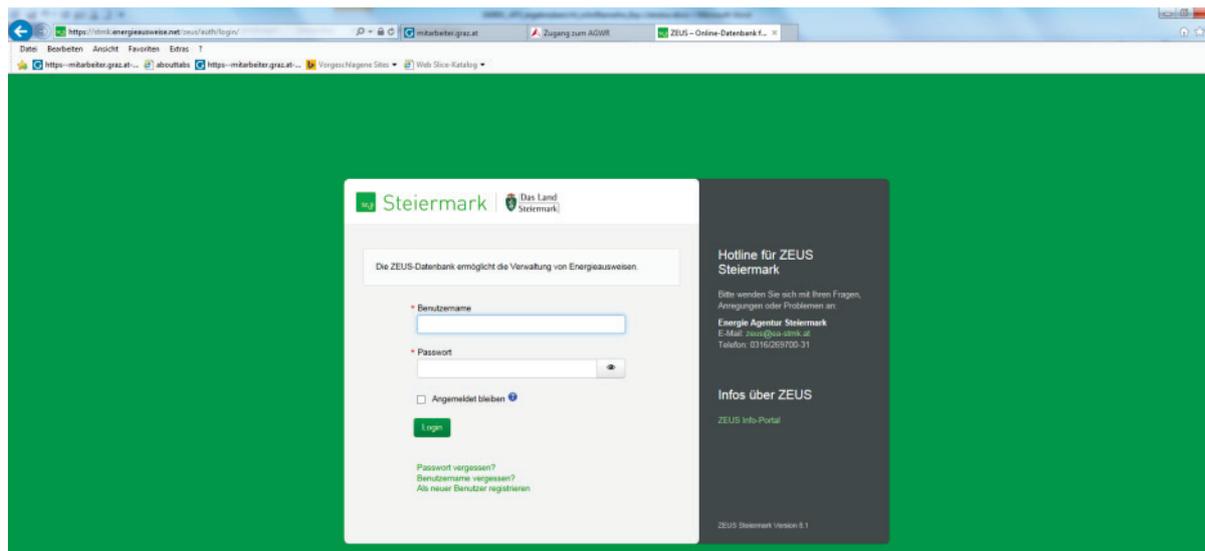


Abbildung 28: ZEUS-Datenbank für Energieausweise, Online Portal (Land Steiermark, 2016)

Austrian Heat Map

Die Datenquelle wurde im Projekt nicht verwendet, da der Wärmebedarf sehr allgemein und vereinfacht dargestellt wird. Eine Unterscheidung nach Nutzung und Baualter ist nicht möglich.

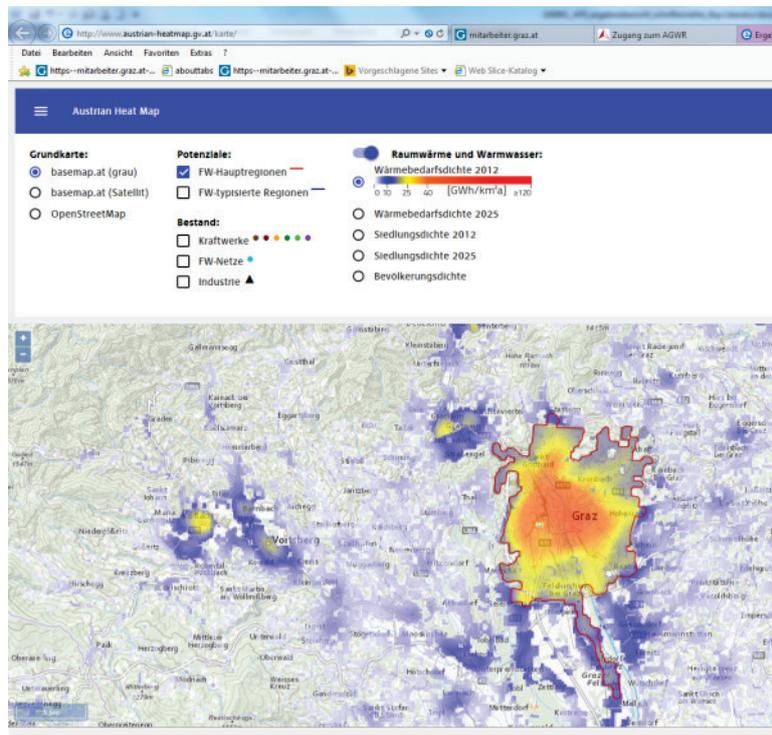


Abbildung 29: Austrian Heat Map – Gebiet Graz, (Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2015)

Tabula – Typologie österreichischer Wohngebäude

Die Broschüre „Tabula – Typologie österreichischer Wohngebäude“ (Amtmann & Groß, 2011) soll den Gebäudebestand in Österreich abbilden und besteht aus 28 charakteristischen Modellgebäuden mit Schwerpunkt Wohnbau. „Jedes Modellgebäude steht beispielhaft für eine bestimmte Bauperiode und einen bestimmten Gebäudetyp und weist bestimmte energetische Merkmale auf.“ (Amtmann & Groß, 2011, Seite 8.) Die Baualtersklassen stimmen sehr gut mit der im AGWR ausgewiesenen Bauperiode überein. Der Wärmebedarf für Wohnobjekte, wo laut AGWR keine Energiekennzahl vorhanden war, wurde laut Studie übernommen und nach Besichtigung vor Ort entsprechend adaptiert. Sichtbare Sanierungsmaßnahmen wie Fenstertausch, Fassadendämmung, Dacherneuerung wurden anhand von Energieausweisen vergleichbarer Objekte validiert und ein entsprechend geringer Wärmebedarf berücksichtigt.

Tabelle 3: Zusammenfassung des Heizwärmebedarfs in kWh/m²a je Baualter und Gebäudekategorie (Bestand/saniert)

Baualter- klassen		Gebäudekategorie							
		EFH		RH		MFH		MWB	
		Bestand	Saniert	Bestand	Saniert	Bestand	Saniert	Bestand	Saniert
I	bis 1918	273	66	198	87	221	80	133	76
II	1919 -1944	220	63	189	66	198	79	130	78
III	1945 -1959	236	75	322	62	179	79	136	51
IV	1960 -1979	225	70	149	81	165	87	121	83
V	1980 - 1989	213	82	185	83	81	49	66	30
VI	1990 - 1999	90	77	92	77	71	45	74	30
VII	2000 - 2010	43		46		44		64	

EFH Einfamilienhäuser

RH Reihenhäuser

MFH Mehrfamilienhäuser

MWB Mehrgeschossige, großvolumige Wohnbauten ab 11 WE

Branchenspezifische Benchmarks

Eine erste Wärmebedarfsbestimmung in gewerblich genutzten Objekten erfolgte mit folgenden Datenquellen:

- Auswertung der Ergebnisse der KMU-Scheck - Beratungen für sechs ausgewählte Branchen, Gastronomie, Lebensmitteleinzelhandel, Hotellerie, Einzelhandel Non Food, Friseure, Großhandel, Zusammenfassung (Mandl & Kapusta, 2011)
- Auswertung der Ergebnisse der KMU-Scheck - Beratungen für sechs ausgewählte Branchen, Fleischer, Bäcker, Drucker, Metallverarbeiter, Tischler, KFZ-Betriebe, Zusammenfassung (Mandl & Kapusta, 2011)

Die Daten stellen Durchschnittswerte aus durchgeführten KMU-Scheck Beratungen dar. Die Kennzahlen werden auf Betriebsfläche bzw. Mitarbeiter bezogen. Durch Angabe des Gesamtenergieverbrauches können Rückschlüsse auf den Anteil Raum- bzw. Prozesswärme getroffen werden. Abweichungen können entstehen, da die Betriebsfläche nicht unbedingt die gesamte im AGWR ausgewiesene Fläche sein muss (Sozialräume, Lager,...). Für Gewächshäuser wurden Erfahrungswerte der Grazer Energieagentur aus durchgeführten Energieberatungen und Energieaudits im Bereich Gartenbau herangezogen.

Der Wärme- und Kühlbedarf für Bürogebäude wurde mittels Energiekennzahlen aus von der Grazer Energieagentur erstellten Energieausweisen vergleichbarer Objekte (Baualter, Bauteilaufbauten, Sanierungsgrad...) ermittelt.

Bestandsaufnahme bei Unternehmen

Bei größeren Produktions- und Industriebetrieben wurde direkt Kontakt mit den Unternehmen aufgenommen um die Daten weiter spezifizieren zu können. Die branchenspezifischen Kennzahlen stellen einen Richtwert dar und können vom tatsächlichen Energieeinsatz abweichen, da nicht immer eindeutig ersichtlich ist, welche Prozesse am Standort zum Einsatz

kommen (Flächenanteile). Eine Internetrecherche zum Unternehmensstandort gibt meist einen guten Einblick über die Art des Betriebes – Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energiebedarf sind jedoch nur bedingt möglich. Unternehmen hatten großteils die Bereitschaft Daten zur Verfügung zu stellen, jedoch sind diese oft nicht direkt griffbereit und die Bekanntgabe scheiterte aufgrund des erforderlichen Zeitaufwandes. In jenen Betrieben, die Informationen verfügbar hatten, wurden die Prozesse zur Wärmeversorgung bereits großteils optimiert bzw. sind neue oder Sonderanlagen vorhanden. Größere vorhandene Abwärmepotenziale werden bereits intern in den Unternehmen genutzt.

Vor Ort Besichtigungen

Eine Besichtigung der Gebiete ist für die Bestimmung des Wärmebedarfs unbedingt erforderlich.

- Ist das Objekt saniert/teilsaniert? (nicht jede Sanierung wird im AGWR erfasst)
- Sind die Objekte noch genutzt?
- Stimmt die Nutzung mit der im AGWR ausgewiesenen Nutzung noch überein?
- Plausibilitätskontrolle der Flächen
- Sind alle Gebäudeteile beheizt? Im AGWR dargestellte Fläche stellt nicht zwangsläufig die konditionierte Fläche dar - bei Nutzung Industrie teilweise große Abweichungen möglich (Büro/Lagerhallen)
- Gibt es bereits verbaute Dachflächen?
- Sind Adressen vor Ort vorhanden?
- Für öffentliche Gebäude kann der Energieverbrauch aus den ausgehängten Ausweisen entnommen werden.



Abbildung 30: Beispiel für Objekt, das nur bei vor-Ort Besichtigung als ungenutzt identifiziert werden konnte

Validierung mit bestehenden Energieausweisen

Aufgrund der Erkenntnisse aus der vor Ort Besichtigung können die Objektdaten weiter konkretisiert werden. Der Wärmebedarf bei sanierten Gebäuden wurde mit Erfahrungswerten aus Energieausweisen von vergleichbaren Objekten korrigiert.

Der Wärme- und Kühlbedarf für Bürogebäude wurde mittels Energiekennzahlen aus von der Grazer Energieagentur erstellten Energieausweisen (je nach Gebäudealter) ermittelt. Auch durchgeführte Teil-/Sanierungen wurden aufgrund von Erfahrungen aus Energieausweisen vergleichbarer Gebäude aktualisiert.

In öffentlichen Gebäuden (BGF > 250m²) ist der Energieausweis an einer für die Öffentlichkeit gut ersichtlichen Stelle anzubringen. Diese Energiebedarfsdaten konnten direkt übernommen werden.

Warmwasserbedarf

Der Warmwasserwärmebedarf für Wohngebäude für das Nutzungsprofil EFH/MFH wurde lt. ÖNORM B8110-5 mit 35 Wh/m²BGF/d, das sind für ein Jahr somit 12,7 kWh/ m²BGF. In betrieblichen Objekten wurde kein Warmwasserbedarf berücksichtigt.

Reale Verbrauchsdaten

Tatsächliche Verbrauchsdaten von Objekten konnten im Projekt nicht verwendet werden. Aufgrund von Datenschutzbestimmungen können Energieversorger reale Verbrauchsdaten in Objekten nicht zur Verfügung stellen.

Abwärmekataster

Vorhandene Abwärmekataster wie

- Abwärmekataster für die Stadt Graz (Brunner et al., 2009)
- Abwärmekataster Steiermark (Schnitzer et al., 2012)
- Abwärmepotenzialerhebung der Kommunalkredit Public Consulting (2012)

wurden geprüft, konnten jedoch aufgrund fehlender Datenaktualität und –qualität nicht verwendet werden. Die Abwärmepotenziale von Betrieben wurden im Zuge der direkten Befragung der Unternehmen erhoben. Weiters erfolgte eine Aktualisierung der Daten mit Hilfe der laufenden Erkenntnisse aus dem Aktionsprogramm „Wärmeversorgung Graz 2020/2030“

Solardachkataster

Der Grazer Solardachkataster stellt geeignete Aufstellungsflächen für solarthermische und photovoltaische Anlagen im Grazer Stadtgebiet dar. Eine genaue Beschreibung ist im Geoportal der Stadt Graz zu finden (Kapfenberger-Pock, 2016)

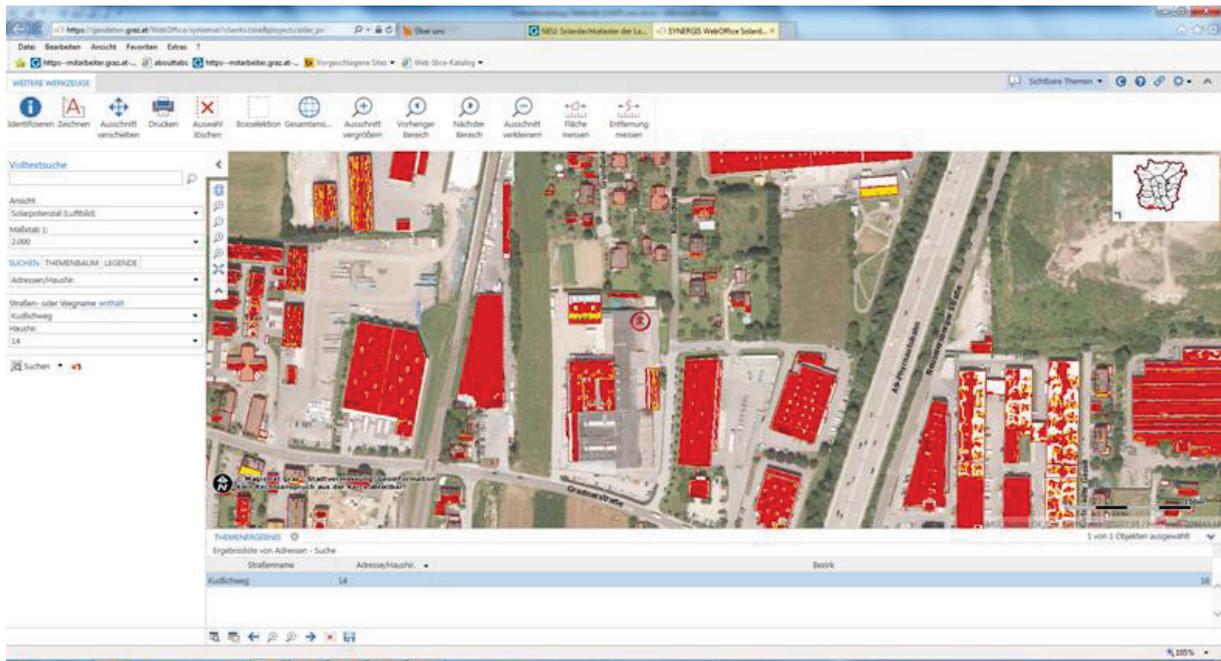


Abbildung 31: Beispiel Darstellung Solardachkataster für das Fallbeispiel Hafnerstraße (Magistrat Graz - Stadtvermessung, 2016)

Die Daten aus dem Grazer Solardachkataster wurden mit Erkenntnissen aus den Besichtigungen abgeglichen. Berücksichtigt wurden ausgewiesene Flächen der Kategorie „sehr gut geeignet“.

Luftbilder und Digitaler Atlas

Fehlende bzw. falsche Flächenangaben wurden mittels Auswertungen aus Luftbildern und dem Digitalen Atlas Steiermark ergänzt.

Verwendete Datenquellen/Internetseiten:

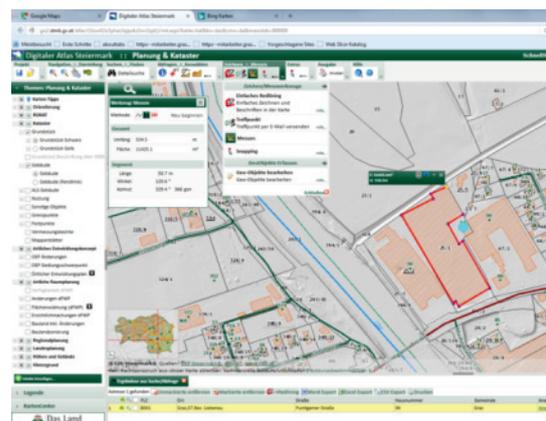


Abbildung 32: Luftbilddarstellung (Bing, 2016) und Darstellung aus Digitaler Atlas Steiermark (2016)

Stadt Graz 3.0 Flächenwidmungsplan und 4.0 Stadtentwicklungskonzept

Die Ermittlung des potenziellen zukünftigen Wärmebedarfs in derzeit unbebauten Gebieten erfolgte über Angaben aus dem 3.0 Flächenwidmungsplan und 4.0 Stadtentwicklungskonzept der Stadt Graz.

„Das Stadtentwicklungskonzept 4.0 stellt das strategische Planungsinstrument der Landeshauptstadt Graz für die kommenden 15 Jahre dar, welches auf Basis von zehn Grundsätzen die künftige Entwicklung skizziert“ (Magistrat Graz, 2016).

Die Daten stehen über den Geoserver der Stadt Graz der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung.

Freie Grundstücksflächen wurden mit der entsprechenden Bebauungsdichte berücksichtigt, wobei bei gemischter Gebietsnutzung von einem Flächenanteil von 60-75% für Wohnen ausgegangen wurde. Der Versiegelungsgrad wurde mit 50-60% angesetzt.

Für die Berücksichtigung des Wärmebedarfes für Neubauten wurde ein Mehrfamilienhaus „konstruiert“ und die Anzahl der Objekte je nach verfügbarer Fläche ermittelt. Die Anforderungen an den Wärmebedarf wurden entsprechend Bauordnung und Wohnbauförderung angesetzt, wobei die niedrigeren Werte gemäß Förderrichtlinien für die weitere Berechnung herangezogen wurden.

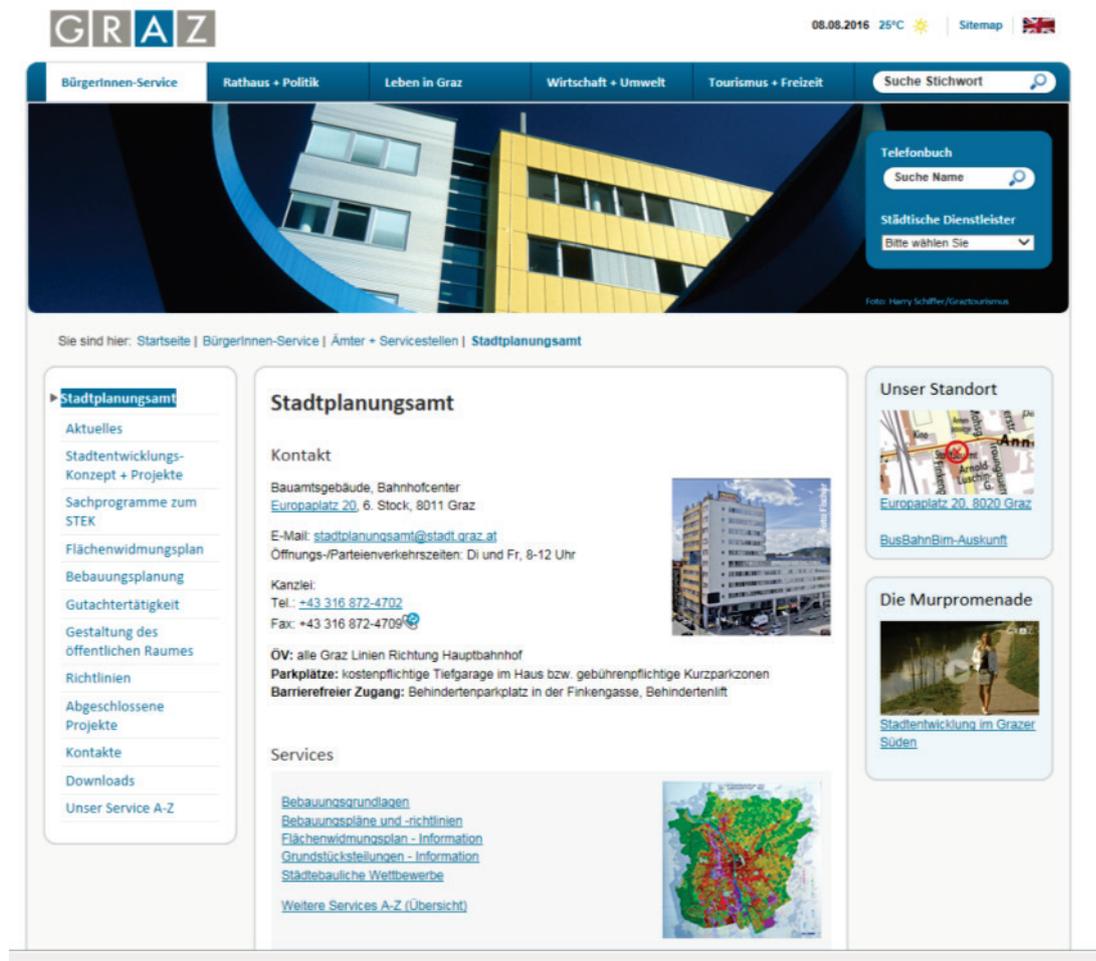


Abbildung 33: Flächenwidmungsplan und Stadtentwicklungskonzept sind über die Homepage der Stadt Graz frei verfügbar (Magistrat Graz, 2016)

1.3.5 Ökologische Bewertung

Für die drei im Projekt definierten Fallbeispiele wurde eine ökologische Bewertung durchgeführt. In allen Fallbeispielen wird oberflächennahe Erdwärme in Kombination mit

Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizenergie eingesetzt. In zwei Fallbeispielen (Hafnerstraße und Olympiawiese) wird zusätzlich auch Warmwasser bereitgestellt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Funktion und die untersuchten Heizsysteme für die Fallbeispiele. Detaillierte Informationen zu den Fallbeispielen und dem angenommenen Energieversorgungskonzept sind in Abschnitt „2.2 Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz“ angeführt.

In der ökologischen Bewertung werden die Heizsysteme mit oberflächennaher Erdwärme zum Vergleich Referenzsystemen gegenübergestellt, die dieselbe Funktion erfüllen. Abhängig von den untersuchten Fallbeispielen und deren Rahmenbedingungen unterschieden sich die festgelegten Referenzsysteme, die auch in Tabelle 4 angeführt sind.

Tabelle 4: Übersicht über Funktion und untersuchte Systeme für die Fallbeispiele

	Innenstadt-West	Hafnerstraße	Olympiawiese
Funktion	Einspeisung von Wärme ins Fernwärmenetz	Versorgung bestehender Gebäude über ein lokales Wärmenetz mit Heizwärme und Warmwasser	Versorgung von Neubauten mit Heizwärme und Warmwasser
System mit oberflächennaher Erdwärme	Großwärmepumpe mit grundwasserbürtiger Erdwärme	Wärmepumpe mit trockener Erdwärme (Erdwärmesondenfeld) in Kombination mit Solaranlage für Warmwasser und Einspeicherung von Wärme in den Untergrund	Eine Wärmepumpe pro Gebäude mit grundwasserbürtiger Erdwärme in Kombination mit einer elektrischen Nachheizung für Warmwasser
Referenzsystem	Fernwärme	bestehende Gas- und Heizölkessel in den einzelnen Gebäuden	Fernwärme

Für die ökologische Bewertung der untersuchten Fallbeispiele und der Referenzsysteme wird die Methode der Lebenszyklusanalyse, auch als Ökobilanz bezeichnet, angewandt. Laut EN ISO 14040:2006 „Umweltmanagement Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen“ bezieht sich eine Ökobilanz auf die Umweltaspekte und Umweltwirkungen (z.B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlaufe des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“).

Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse werden folgende Umweltwirkungen untersucht:

Treibhausgas-Emissionen

Es werden die in Tabelle 5 dargestellten Treibhausgase untersucht. Als Maß für die Treibhauswirkung dieser Gase wird das Treibhausgaspotenzial für den Zeitraum von 100

Jahren verwendet (GWP 100 - Global Warming Potential 100). Dafür werden die in Tabelle 5 angeführten Äquivalenzfaktoren angewandt, mit denen die Treibhauswirkung eines Kilogramms des jeweiligen Treibhausgases (z.B. CH₄, N₂O, R-14) in die äquivalente CO₂-Menge umgerechnet wird (IPCC, 2013). In den Ergebnisdarstellungen werden die einzelnen Treibhausgas der Gruppen FKW, FCKW, HFCKW und CKW aggregiert ausgewiesen.

Tabelle 5: Untersuchte Treibhausgase und deren CO₂-Äquivalenzfaktoren (inkl. Climate Carbon Feedback) (IPCC, 2013)

Kategorie	Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalenzfaktor
	CO ₂	1
	CH ₄	34
	N ₂ O	298
Fluorkohlenwasserstoffe (FKW)	HFC-134a	1.549
	HFC-143a	5.508
	HFC-152a	167
	HFC-116	12.200
	HFC-125	3.691
	HFC-32	817
	R-14	7.390
	HFC-23	13.856
	HFC-43-100mee	1.952
	HFC-227ea	3.860
	HFC-236fa	8.998
	HFC-245fa	1.032
	PFC-318	10.592
	PFC-5-1-14	9.300
	PFC-218	9.878
PFC-3-1-10	10.213	
PFC-4-1-12	9.484	
Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)	CFC-113	6.586
	CFC-114	9.615
	CFC-115	7.370
	CFC-13	15.451
	CFC-12	11.547
	CFC-11	5.352
Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW)	HCFC-141b	938
	HCFC-142b	2.345
	HCFC-123	96
	HCFC-124	635
	HCFC-22	2.106
	HCFC-21	179
Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)	HCC-30	11
	R-10	2.019
	R-40	15

Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand umfasst alle Energieeinsätze, die mit der Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser in den untersuchten Fallbeispielen verbunden sind. Der kumulierte Energieaufwand wird unterteilt in Beiträge von

- fossilen (Rohöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas)
- erneuerbaren (z.B. Sonne, Wind, Wasser, Biomasse) und
- sonstigen (z.B. Kernenergie, Müllverbrennungsanlagen, Abwärme aus Stromerzeugungsanlagen) Energieträgern.

Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase

Die beschriebenen Umweltwirkungen werden für die Errichtungsphase, die Betriebsphase und die Entsorgungsphase der untersuchten Heizsysteme berücksichtigt. Abbildung 34 gibt einen Überblick über die Prozesse, die in der jeweiligen Lebensphase untersucht wurden.

Bei der Errichtung werden die Rohstoffgewinnung und die Materialherstellung der im Heizsystem verbauten Materialien berücksichtigt.

Im Betrieb wird die Bereitstellung der vom Heizsystem benötigten Energie berücksichtigt. Für die von der Wärmepumpe genutzte Erdwärme werden zwei Varianten untersucht:

1. grundwasserbürtige Erdwärme (Fallbeispiel Innenstadt-West und Olympiawiese) und
2. trockene Erdwärme (Fallbeispiel Hafnerstraße).

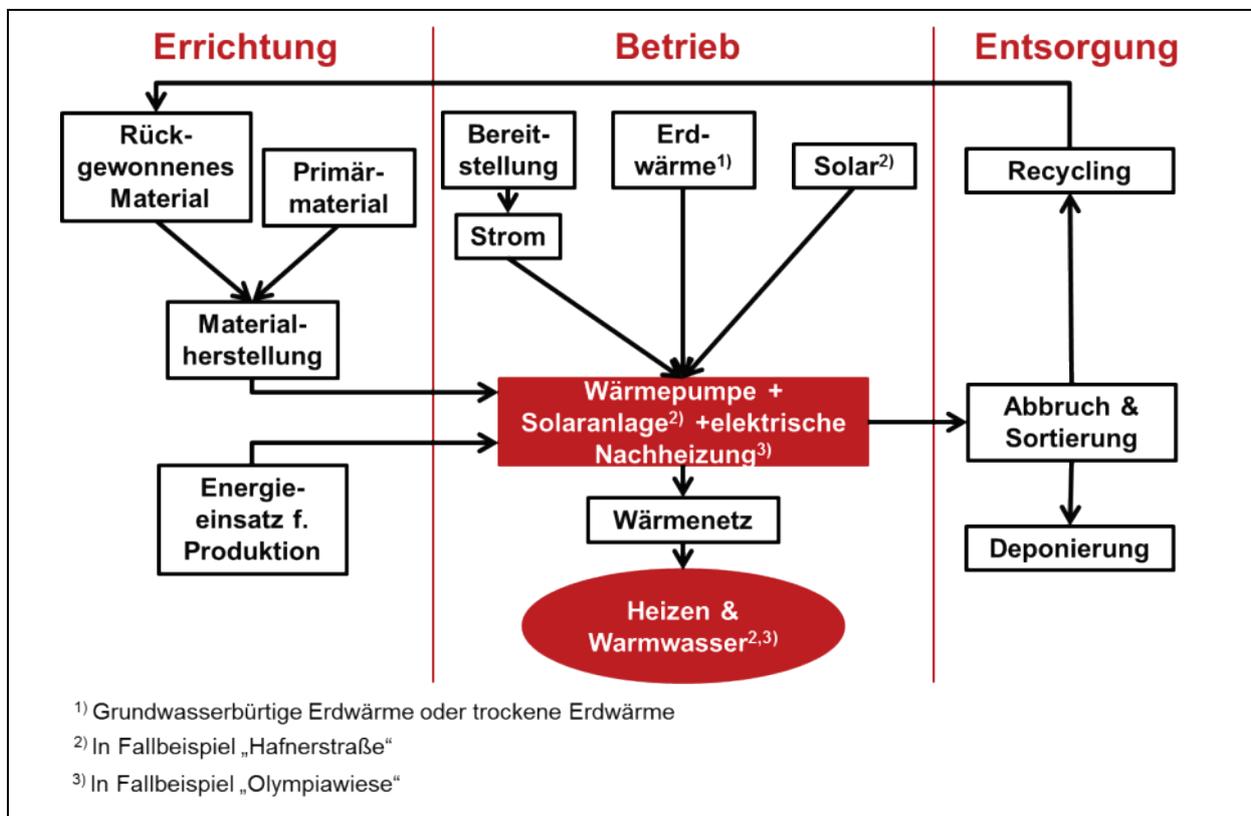


Abbildung 34: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse bei Errichtung, Betrieb und Entsorgung

Für den Strombezug der Wärmepumpe werden für alle Fallbeispiele zwei verschiedene Arten der Strombereitstellung untersucht, um den Einfluss der Art der Strombereitstellung auf das Gesamtergebnis aufzuzeigen:

1. Österreichischer Strommix (Strommix AT): Für die Strombereitstellung wurde der österreichische Strommix aus dem Jahr 2014 lt. Stromkennzeichnungsbericht angenommen. Der Stromkennzeichnungsbericht umfasst ca. 85% der Gesamtabgabemenge von Strom für den Endverbrauch aus öffentlichen Netzen. Tabelle 6 zeigt den zugrundeliegenden Energieträgermix (E-Control, 2015). Basierend auf diesem Energieträgermix wurden für den österreichischen Strommix Treibhausgas-Emissionen von 83 g CO₂-Äq./kWh berechnet.

Tabelle 6: Energieträgermix für 85% der für den Endverbrauch abgegebenen Strommenge in Österreich im Jahr 2014 lt. Stromkennzeichnungsbericht (E-Control, 2015)

Bekannte erneuerbare Energieträger	
Biogas	0,93%
Deponie- und Klärgas	0,04%
feste oder flüssige Biomasse	3,61%
geothermische Energie	0%
Sonnenenergie	0,77%
Wasserkraft	77,30%
Windenergie	6,45%
Bekannte fossile Energieträger	
Erdgas	6,72%
Erdöl und dessen Produkte	0%
Kohle	3,63%
Bekannte sonstige Primärenergieträger¹⁾	0,26%
Bekannte Nuklearenergie¹⁾	0%
Unbekannte Herkunft ENTSO-E-Mix¹⁾	0,27%

¹⁾wurde in der Berechnung der THG vernachlässigt

2. Strombereitstellung mittels Erdgas-Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (Erdgas GuD): Hier wird die Stromerzeugung in ein einem mit Erdgas betriebenen Gas- und Dampfturbinenkraftwerk angenommen. Die Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung betragen 447 g CO₂-Äq./kWh (GEMIS, 2015).

Beim Fallbeispiel Innenstadt-West speist die Wärmepumpe ins Fernwärmenetz ein. Warmwasserbereitstellung wurde nicht berücksichtigt.

Beim Fallbeispiel Hafnerstraße kommt die Wärmepumpe in Kombination mit einer Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung und zur Einspeicherung von Wärme in den Untergrund zum Einsatz.

Beim Fallbeispiel Olympiawiese wird die Wärmepumpe durch eine elektrische Nachheizung zur Warmwasserbereitstellung ergänzt (für weitere Details zum Energieversorgungskonzept das die Betriebsphase bestimmt siehe auch Abschnitt 2.2).

Am Ende der Lebensdauer wird das Heizsystem abgebaut. Die verbauten Materialien werden sortiert und je nach Fraktion deponiert oder einem Recyclingprozess zugeführt. Das rückgewonnene Material teilweise kann wieder für die Produktion neuer Heizsysteme eingesetzt werden.

Referenzsysteme

Die Ergebnisse für die Fallbeispiele mit geothermischen Heizsystemen werden Referenzsystemen gegenübergestellt. Das sind bestehende Öl- und Erdgaskessel (Fallbeispiel Hafnerstraße) und Fernwärme (Fallbeispiel Innenstadt-West und Olympiawiese).

Daten für bestehende Öl- und Erdgaskessel wurden aus GEMIS (2009) entnommen. Die Treibhausgas-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand der Fernwärme wurden aufbauend auf der Studie „Emissionsreduktion durch die Fernwärme im Großraum Graz“ (Grazer Energieagentur, 2009) für das Jahr 2013 berechnet. Der zugrunde gelegte Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Graz im Jahr 2013 ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Graz im Jahr 2013 (eigene Berechnung basierend auf VERBUND Thermal Power, 2014 und Expertenschätzung)

Wärmeerzeuger	Brennstoff	Anteil
Steinkohle-KWK Mellach	Erdgas, Steinkohle, Klärschlamm	64%
GDK Mellach Linie 10	Erdgas	9%
GDK Mellach Linie 20	Erdgas	3%
Werndorf-Neudorf	Erdgas, Heizöl schwer	5%
Fernwärme-Zentrale Graz	Erdgas	13%
Solaranlagen		0,3% ¹⁾
Abwärme Marienhütte		5% ²⁾

¹⁾ wurde in der Berechnung vernachlässigt

²⁾ THG-Emissionen und Primärenergieeinsatz für Abwärme wurden in der Berechnung mit Null bewertet

Im Unterschied zur genannten Studie wurden hier die Emissionen im gesamten Lebenszyklus berücksichtigt, das heißt z.B. auch die Emissionen der Brennstoffbereitstellung oder die der Errichtung der Wärmeerzeugungsanlagen sind inkludiert. Die Kraft-Wärme-Kopplung wurde nach der Berechnungsmethode der Vereinbarung des CEN/CENELEC im „Handbuch zur Bestimmung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) (CEN/CENELEC, 2004) berechnet, welche auch in der ÖNORM EN 15316 Teil 4-5 „Wärmeerzeugungssysteme, Leistungsfähigkeit und Effizienz von Fernwärme- und großvolumigen Systemen“ zur Anwendung kommt. In dieser Berechnungsmethode werden die Anlagen-Emissionen wie folgt auf Koppelprodukt Strom und Wärme aufgeteilt: Die über die Stromerzeugung hinausgehenden Brennstoffemissionen werden der ins Fernwärmenetz eingespeisten Wärmemenge zugerechnet. Dazu wird mit dem Anlagenwirkungsgrad der ungekoppelten Stromerzeugung der Brennstoffeinsatz ermittelt, der für eine reine Stromerzeugung notwendig wäre. Der im Falle einer Wärmeauskopplung darüber hinausgehende Brennstoffeinsatz wird der Wärme zugerechnet und mit Emissionsfaktoren bewertet.

Datenquellen

Folgende Datenquellen wurden für die Lebenszyklusanalyse genutzt:

1. Projektspezifische Daten, die im Rahmen des Projektes für die Fallbeispiele erhoben wurden
2. Datenbank ecoinvent - ecoinvent data v3.1 (ecoinvent 2016) für Materialdaten und die Herstellung von Anlagenkomponenten
3. GEMIS – Globales Emissions Modell Integrierter Systeme (GEMIS, 2009; GEMIS, 2015) für Energieprozesse

1.3.6 Ökonomische Bewertung

Für die drei im Projekt definierten Fallbeispiele wird eine ökonomische Bewertung durchgeführt. In allen Fallbeispielen wird oberflächennahe Erdwärme in Kombination mit Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizenergie eingesetzt. In zwei Fallbeispielen (Hafnerstraße und Olympiawiese) wird zusätzlich auch Warmwasser bereitgestellt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Funktion und die untersuchten Heizsysteme für die Fallbeispiele. Detaillierte Informationen zu den Fallbeispielen und dem angenommenen Energieversorgungskonzept sind in Abschnitt „2.2 Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz“ angeführt.

Für die ökonomische Bewertung wurde die Methode der „Jahreskostenvergleichsrechnung“ verwendet, die mit der Methode „Total Cost of Ownership (TCO)“ vergleichbar ist. Nur die Kosten für eine eventuelle Verwertung werden nicht berücksichtigt.

Mit der „Jahreskostenvergleichsrechnung“ werden für die Fallbeispiele die „Wärmegestehungskosten [€/a]“ bzw. die „spezifischen Wärmegestehungskosten [€/MWh]“ berechnet. Die Jahreskosten setzen sich aus folgenden Kosten zusammen:

1. Annuität [€/a]:

Der jährlich gleichbleibende Betrag aus den Investitionskosten unter Annahme eines kalkulatorischen Zinssatzes und der Nutzungsdauer von Anlagenteilen nach folgender Formel:

$$a = C_0 \cdot ANF_{n,i}$$
$$ANF_{n,i} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

a ... Annuität [€/a]

C₀ Investitionskosten [€]

ANF_{n,i} ... Annuitätenfaktor für die Nutzungsdauer n und den Zinssatz i

i ... kalkulatorischer Zinssatz [%]

n ... Nutzungsdauer [a]

Für den kalkulatorischen Zinssatz werden 2,5 % und als Variation 4 % eingesetzt.

Die Nutzungsdauer der Anlagenteile sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Nutzungsdauer der Anlagenteile zur Berechnung der Annuität

Anlagenteil	Nutzungsdauer
Brunnen	30 a
Pumpe	20 a
Rohrleitung	20 a
Wärmepumpe	15 a
Wärmetauscher	15 a
Fernwärme: Leitung, Hausübergabestation	30 a
Erdwärmesonden	50 a
Solaranlage	20 a
Speicher	15 a

2. Betriebsgebundene Kosten (= Kapitalgebundene Kosten) [€/a]

Sie beinhalten die Kosten für Wartung und Instandhaltung, die als Prozentsatz der Investitionskosten berechnet werden. Die dafür eingesetzten Prozentsätze sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Angenommene Prozentsätze zur Berechnung der Betriebsgebundenen Kosten

Werte in [%]	Instandhaltung	Wartung
Geothermieanlage		
Erdwärmesonden-WP	1	1
Grundwasser-WP	1	1
Wärmepumpe		
Erdwärmesonden-WP	3	1
Grundwasser-WP	3	1
Solaranlage	0,5	0,5
Großspeicher	1	1
Sonst. Investitionen	2	1

3. Verbrauchsgebundene Kosten (= sonstige Betriebskosten) [€/a]

Die Verbrauchsgebundenen Kosten beinhalten die durch die Höhe der Energieerzeugung verursachten Kosten, hauptsächlich Stromkosten für den Betrieb der Energieanlagen.

Die Jahreskosten sind die Summe der genannten Kosten:

Wärmegestehungskosten [€/a] = Annuität [€/a] + Betriebsgebundene Kosten [€/a] + Verbrauchsgebundene Kosten [€/a]

Die spezifischen Wärmegestehungskosten werden auf die erzeugte Wärmemenge bezogen:

Spezifische Wärmegestehungskosten [€/MWh] = Wärmegestehungskosten [€/a] / erzeugte Wärmemenge [MWh/a]

Die Werte für die Investitionskosten basieren auf Richtpreisangeboten (Brunnenbohrungen, Wärmepumpen), Preisen von Lieferanten aus dem Internet, Studien und Online-Auslegungsprogrammen (z.B. für Pumpen).

Als Strompreis wurden 60 €/MWh eingesetzt ausgehend von einem durchschnittlichen Gaspreis für Gewerbekunden 2015 (siehe E-Control, 2016).

2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Projektergebnisse dargestellt. Es werden die für die Modellregion Graz definierten unterirdischen Gunstzonen beschrieben. Der Abschnitt „Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion“ umfasst Informationen zur Auswahl der Fallbeispiele. Weiters werden für jedes der untersuchten Fallbeispiele die geothermischen Eigenschaften des Untergrunds, der Wärme- und Kühlbedarf, das Energieversorgungskonzept und wesentliche Grunddaten der Energieversorgung für die ökonomische und ökologische Bewertung beschrieben. Der Abschnitt „Bewertung der Fallbeispiele in der Modellregion“ beinhaltet die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Bewertung. Weiters werden die Auswirkungen der geothermischen Nutzung auf den Untergrund angeführt. Abschließend wird die im Projekt entwickelte Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Geothermie beschrieben.

2.1 Unterirdische Gunstzonen in der Modellregion Graz

Anhand der geologischen und hydrogeologischen Karte von Österreich wurden großgeologische Eigenschaftsklassen des Untergrundes gebildet, die die Kriterien für die Selektion geothermisch begünstigter Standorte darstellen (Abbildung 35).

Als Basis für die Analyse des geothermischen Potenzials im Projekt Manage_GeoCity wurde die geologische Karte der Steiermark (1:50.000) herangezogen. Auf Basis dieses GIS-Datensatzes erfolgt eine Beurteilung des Aufbaues des Untergrundes. Für das gegenständliche Projekt ist der Untergrund bis in einen Tiefenbereich von maximal 300 m relevant. In tieferen Bereich spricht man nicht mehr von oberflächennaher Erdwärmennutzung bzw. wird in diesen Tiefen auch das Bergrecht genehmigungsrelevant.

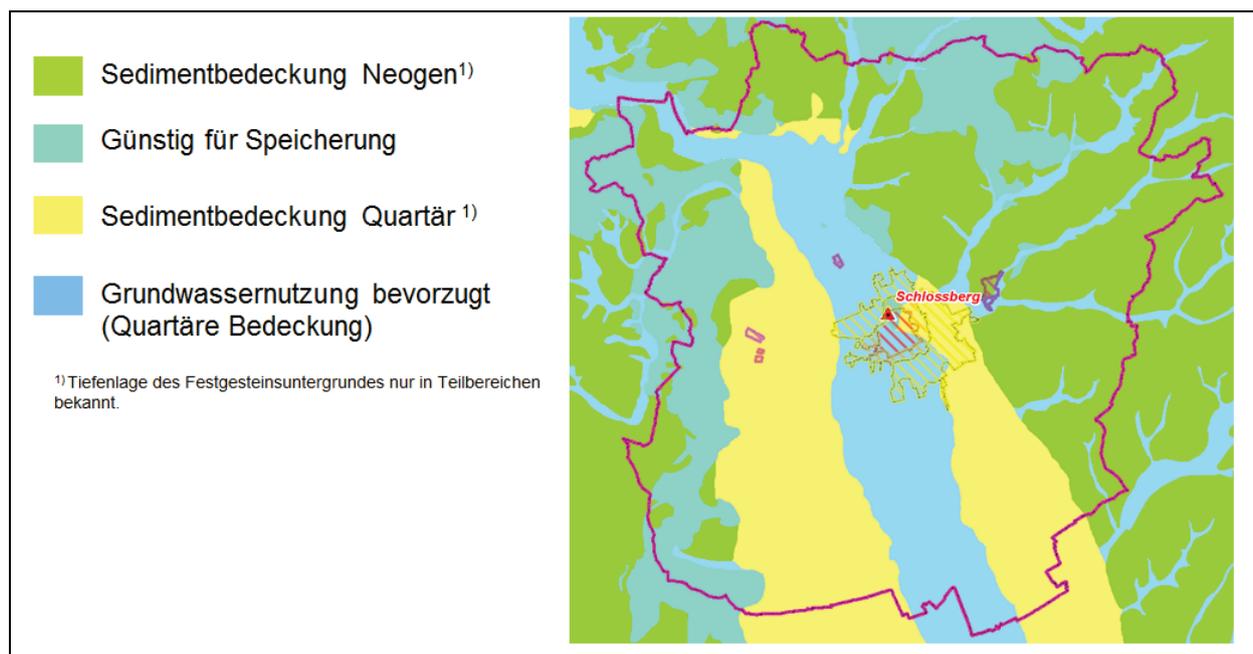


Abbildung 35: Großgeologische Eigenschaftsklassen des Untergrundes für die Nutzung oberflächennaher Geothermie

Folgende Klassifizierungen, die in Abbildung 35 dargestellt sind, wurden für den Grazer Untergrund vorgenommen. Für die Grundwassernutzung mittels Wärmepumpen erfolgte die Definition der Gunstzonen auf Basis der in Abschnitt 1.3.2 ausgewiesenen Kriterien:

Festgesteinsbereiche

Für eine „trockene“ Nutzung ohne Wasserentnahme (z.B. mit Erdwärmesonden) eignen sich sehr gut Gebiete mit Festgesteinsuntergrund aufgrund der Speicherfähigkeit und Leitfähigkeit des Gesteins. Dieser Festgesteinsuntergrund ist in Graz von Sedimenten (aus dem Neogen bzw. Quartär) überlagert. Jene Bereiche in denen Festgesteine zu erwarten sind (türkis), sind aufgrund der thermischen Eigenschaften für die Speicherung von Erdwärme besser geeignet als die Sedimentbereiche. Eine thermische Nutzung von Grundwasser in diesen Bereichen ist zwar nicht gänzlich unmöglich, das Standortrisiko auf Basis der vorliegenden Informationen jedoch als hoch einzustufen.

Sedimentbedeckung Neogen

Der Bereich der neogenen Sedimentbedeckung ist vorrangig von gering durchlässigen Gesteinen geprägt. Die zu erwartenden Grundwasserergiebigkeiten sind meist nicht ausreichend für eine thermische Nutzung.

Sedimentbedeckung Quartär

Die quartären Sedimente sind meist Sande und Kiese mit guten Durchlässigkeiten. In den Randbereichen (gelbe Zonen) ist eher von geringeren Mächtigkeiten auszugehen, was die erforderliche Ergiebigkeit bei Grundwassernutzung nicht gewährleistet.

In Bereichen mit guten Mächtigkeiten (blaue Zone in Murnähe) erfüllen die zu erwartenden Grundwasserergiebigkeiten die Anforderungen für eine thermische Nutzung des Grundwassers mit großer Wahrscheinlichkeit. Die Grundwasserführung entlang der Bachläufe im Nordosten ist wegen geringer Mächtigkeit und Durchlässigkeit nicht geeignet.

2.2 Festlegung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Auswahl von drei Fallbeispielen dargestellt. Weiters werden für jedes der drei ausgewählten Fallbeispiele die geothermischen Eigenschaften des Untergrunds, der Wärme- und Kühlbedarf und das festgelegte Energieversorgungskonzept beschrieben.

2.2.1 Auswahl und Definition

Ausgangspunkt für die Auswahl von drei Fallbeispielen, für die die Nutzung von oberflächennaher Geothermie genauer untersucht wurde, waren 13 Gebietsvorschläge im Stadtgebiet von Graz (Abbildung 36):

1. Andritz – Statteggerstraße
2. Wienerstraße

3. Eggenberg
4. Innenstadt – West
5. Innenstadt – Ost
6. Hart – Grottenhofstraße
7. Webling – Sigmund Freud Klinik
8. Kärntnerstraße
9. Hafnerstraße
10. Neufeldweg
11. Liebenau – Magna Steyr
12. Eggenberg - Areal Schulschwestern
13. Olympiawiese

Für diese Gebiete wurde eine Grobbeschreibung anhand folgender Punkte erstellt:

- Nutzung (z.B. Wohngebiet, Gewerbegebiet)
- Einschätzung des Untergrundes
- Technologieauswahl
- Weitere Randbedingungen (z.B. bestehende Energieversorgung, Wasserschongebiet, Potenziale für Solarthermie aus Solardachkataster, Stadtentwicklungsgebiet, Zonenzuordnung aus Bombenblindgängerkataster)

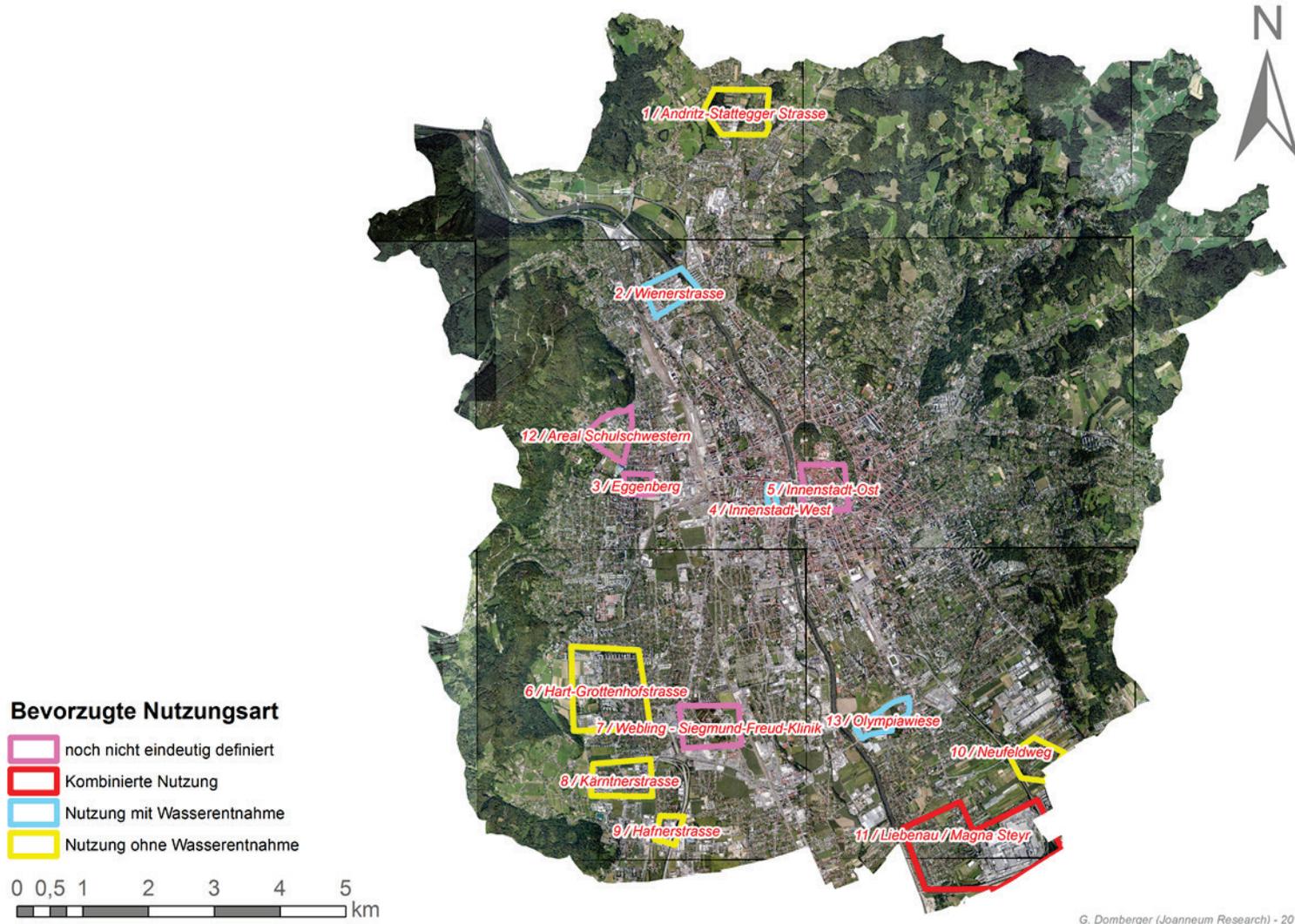


Abbildung 36: Übersichtskarte mit 13 Gebietsvorschlägen

Aus diesen 13 Gebietsvorschlägen wurden drei Fallbeispiele vom Projektteam für die weitere Bearbeitung ausgewählt:

1. „Innenstadt – West“
2. „Hafnerstraße“
3. „Olympiawiese“

Die getroffene Auswahl deckt unterschiedliche Technologien zur Nutzung oberflächennaher Geothermie ab, die sich aus den vorherrschenden Untergrundeigenschaften ergeben:

- Grundwassernutzung in Kombination mit einer Wärmepumpe und
- Erdwärmesonden in Kombination mit einer Wärmepumpe und Rückspeisung von Wärme in den Untergrund aus Solaranlagen.

Die Fallbeispiele umfassen sowohl den Ersatz von Heizungssystemen (Einzelkessel) in Bestandsgebäuden als auch die Versorgung eines zukünftigen Entwicklungsgebietes mit thermisch optimierten Neubauten mit Niedertemperaturtechnologie. Es werden reine Wohngebiete als auch Gebiete mit unterschiedlicher Nutzung (Wohnung, Gewerbe, öffentliche Gebäude) untersucht.

Mit dem Fallbeispiel „Innenstadt – West“ wurde ein Gebiet ausgewählt, in dem im Vergleich zu anderen Stadtgebieten erhöhte Untergrund- und Grundwassertemperaturen vorliegen. An diesem Fallbeispiel wird untersucht, inwieweit eine Wärmeentnahme für Heizzwecke zur Abkühlung des Untergrunds beitragen kann und welche Auswirkungen auf die Wasserqualität durch die Temperaturänderungen des Grundwassers auftreten. Auf Grund der bereits erhöhten Untergrundtemperaturen werden Kühlanwendungen, bei denen Wärme in den Untergrund eingebracht wird, nicht betrachtet. Grundsätzlich ist anzumerken, dass bei einem Geothermieprojekt im Stadtzentrum und in diesem Fall auch im Altstadtgebiet mit spezifischen Barrieren zu rechnen ist (z.B. dichte Bebauung, Platz für Brunnen in den benötigten Abständen, Grabungsarbeiten zum Verlegen der benötigten Rohrleitungen, Eigentumsrechte bei Verbindungsleitungen zwischen den Bohrungen).

Tabelle 10 gibt einen Überblick über die drei ausgewählten Fallbeispiele, Rahmenbedingungen und Auswahlkriterien.

Tabelle 10: Überblick zu den drei ausgewählten Fallbeispielen

Bezeichnung	Rahmenbedingungen	Auswahlkriterien
Innenstadt-West (Bezirk Gries)	<ul style="list-style-type: none"> • Innere Stadt mit teilw. erhöhten Untergrundtemperaturen • Dichte bestehende Bebauung mit geringem Platzangebot • Wohnen, Gewerbe, Schule • Schutzzone: keine Solarnutzung auf Dächern • Bestehendes Fernwärmenetz 	Untersuchung Verbesserung der Wasserqualität durch Nutzung des Grundwassers für Wärmebereitstellung
Hafnerstraße (Bezirk Straßgang)	<ul style="list-style-type: none"> • Städtisches Randgebiet ohne Fernwärme-Potenzial • Wohnen, Gewerbe • Solarnutzung über Dachflächen der Gewerbebauten 	Versorgung eines bestehenden Gebietes ohne FW-Versorgung mittels Erdwärmesonden und Rückspeisung von Wärme in den Untergrund
Olympiawiese (Bezirk Liebenau)	<ul style="list-style-type: none"> • Städtisches Entwicklungsgebiet ohne Fernwärme • Bestehende Nutzung (Wohnen, Gewerbe) wird nicht berücksichtigt 	Versorgung durch Grundwasser-Wärmepumpe von thermisch optimierten Neubauten mit Niedertemperatur-technologie

2.2.2 Fallbeispiel „Innenstadt - West“

2.2.2.1 Geothermische Eigenschaften des Untergrunds

Im Bereich des Standortes Innenstadt-West kann man von einer Abfolge von quartären sandig-kiesigen Lockersedimenten mit sehr hohen Durchlässigkeiten ausgehen. Diese Gegebenheiten und die hohen Grundwassermächtigkeiten bewirken eine hohe Ergiebigkeit und sind somit für die thermische Nutzung des Grundwassers nahezu ideal. Allerdings liegt das Gebiet in einem Bereich mit erhöhten Grundwassertemperaturen, sodass seitens der Behörde überlegt wird, die Nutzung für Kühlzwecke zu verbieten. Die Wärmeleitfähigkeiten der sandigen Kiese sind eher gering. Das Fallbeispiel liegt im Gebiet des regionalen Grundwassermodells, sodass die Strömungsverhältnisse sehr gut bekannt sind.

2.2.2.2 Wärme- und Kühlbedarf

Beim Fallbeispiel „Innenstadt-West“ handelt es sich um ein Gebiet mit dichter bestehender Bebauung mit geringem Platzangebot. Folgende Nutzungen wurden identifiziert:

- Wohnen:
 - vorrangig Mehrfamilienhäuser

- Mehrgeschoßwohnbauten (Altbau und Neubau)
- Sonstige:
 - Schule (BRG)
- Gewerbe:
 - vorrangig Büros
 - Handel
 - Versicherung



Abbildung 37: Luftbild Fallbeispiel Innenstadt – West (Google Maps, 2016)

Die Bestimmung des Energiebedarfs für das Fallbeispiel „Innenstadt – West“ ergab folgende Ergebnisse:

Konditionierte Fläche:	37.260 m ²
Wärmebedarf:	3.453 MWh/a
Kühlbedarf (Büros):	155 MWh/a
Warmwasserbedarf:	202 MWh/a
Abwärmequellen:	keine berücksichtigt
Solarnutzung:	keine berücksichtigt

Tabelle 11 und Abbildung 38 zeigen Detailergebnisse zum Energiebedarf und der Flächenverteilung für die vorliegenden Nutzungen in diesem Gebiet. In „sonstiger Nutzung“ sind enthalten: Groß- und Einzelhandelsgebäude, Gebäude des Verkehrs- und Nachrichtenwesens, Gebäude für Kultur- und Freizeitzwecke sowie das Bildungs- und Gesundheitswesen.

Tabelle 11: Wärme- und Kühlbedarf im Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Übersicht Innenstadt-West					
	Einheit	Wohnen	Büro	Sonstige	Summe
Fläche	[m ²]	15.799	5.194	16.267	37.260
Wärmebedarf	[MWh/a]	1.477	909	1.066	3.453
Kühlbedarf	[kWh/a]	-	155.820	-	155.820
Warmwasserbedarf	[kWh/a]	201.619	-	-	201.619

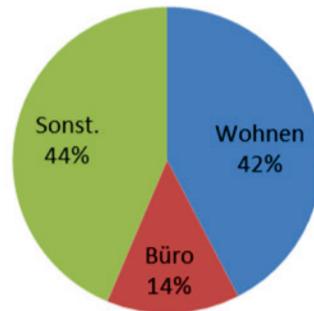


Abbildung 38: konditionierte Flächenanteile entsprechend Nutzung im Fallbeispiel „Innenstadt West“

2.2.2.3 Energieversorgungskonzept

Das für das Fallbeispiel „Innenstadt – West“ definierte Energieversorgungskonzept ist schematisch in Abbildung 39 dargestellt. Eine zentrale Großwärmepumpe mit einer Wärmeleistung von 2 MW speist bis zu einer Temperatur von 95°C in das bestehende Fernwärmenetz ein. Als Wärmequelle wird Grundwasser genutzt, das über den Entnahmebrunnen gewonnen wird und nach Abkühlung in der Wärmepumpe wieder über den Schluckbrunnen in den Untergrund eingespeist wird. In den Sommermonaten Juni, Juli, August ist die Wärmepumpe nicht in Betrieb, da kein Heizwärmebedarf vorliegt und für die Bereitstellung von Warmwasser von elektrischen Boilern ausgegangen wird. Die Übergabe an das Fernwärmenetz erfolgt mittels Wärmetauscher.

Abbildung 40 zeigt die geforderte Vorlauf-Mindestsoll-Temperatur für Einspeiser in das Grazer Fernwärmenetz in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Im Winter ist die Mindest-Netzvorlauf-Temperatur gleitend in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt. Unter minus 12°C beträgt sie 120°C. Auswertungen von Stundenmittelwerten der Außentemperatur über 10 Jahre am Standort Graz zeigten, dass an ca. 1.425 Stunden pro Jahr die Mindest-Netzvorlauf-Temperatur über 95°C beträgt. D.h. die Wärmepumpe kann an ca. 60 Tagen im Jahr die geforderte Temperatur nicht bereitstellen und die Deckung dieses Teils des Wärmebedarfs im untersuchten Gebiet muss über andere Einspeiser erfolgen.

Unter Berücksichtigung der Grundwassertemperaturen auf Basis von Monatsmittelwerten und der benötigten Fernwärme-Vorlauf-Temperaturen (Tabelle 12) wird für die Wärmepumpe eine Jahresarbeitszahl von ca. 2,4 angenommen, wobei im Winter die Leistungsziffer auf Grund der hohen Fernwärme-Vorlauf-Temperaturen auf ca. 2,2 sinkt und in der Übergangszeit bis zu 2,7 erreicht werden kann.

Tabelle 12: Grundwassertemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2006 – 2012) und Fernwärme-Vorlauf-Temperatur

	Jän.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Grundwasser [°C]	15,8	15,4	15,2	14,8	14,7				16,3	16,8	16,9	16,6
Fernwärme-Vorlauf-Temperatur [°C]	95,0	95,0	95,0	79,2	75,5				75,3	78,7	87,6	95,0

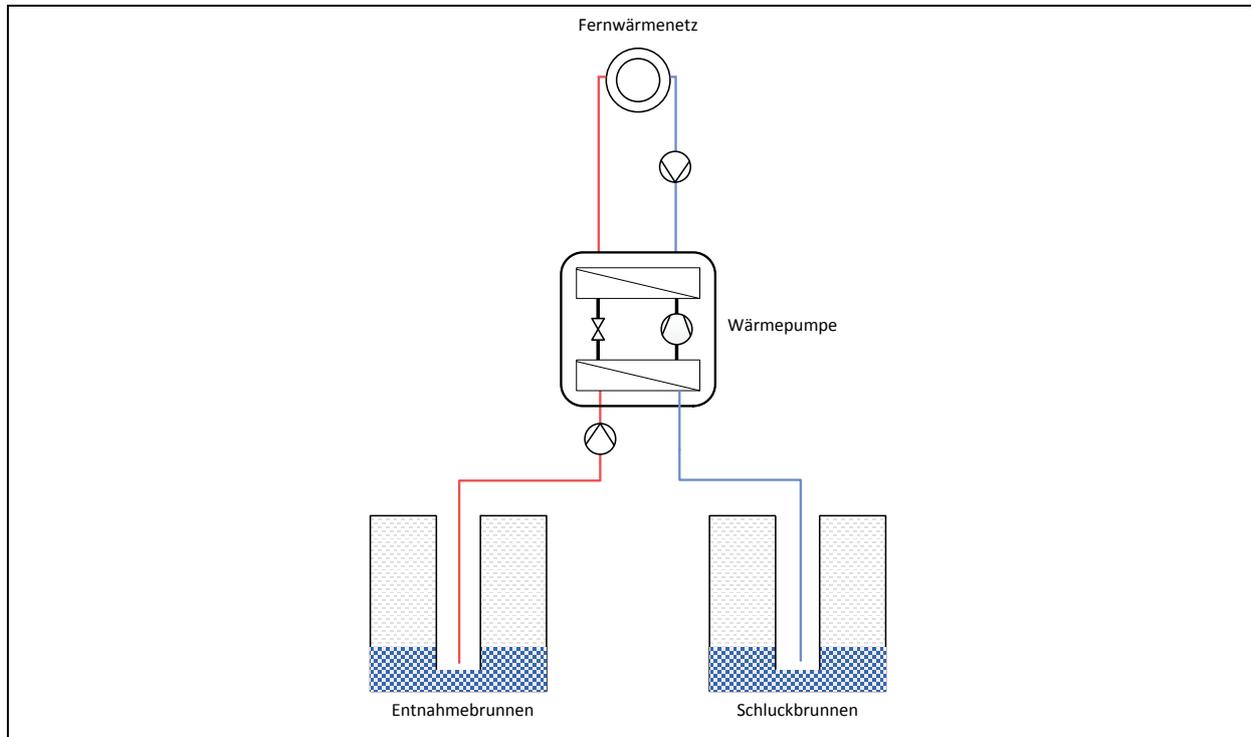


Abbildung 39: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Innenstadt – West“

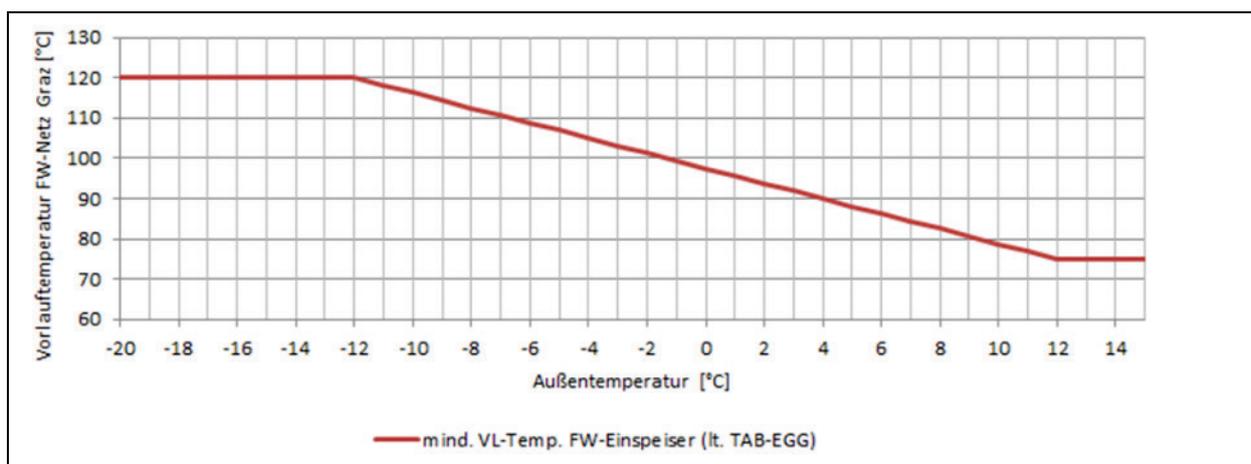


Abbildung 40: Geforderte Vorlauf-Mindestsoll-Temperatur bei Einspeisern in das Grazer Fernwärmenetz in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Energie Graz GmbH & CO KG, 2011)

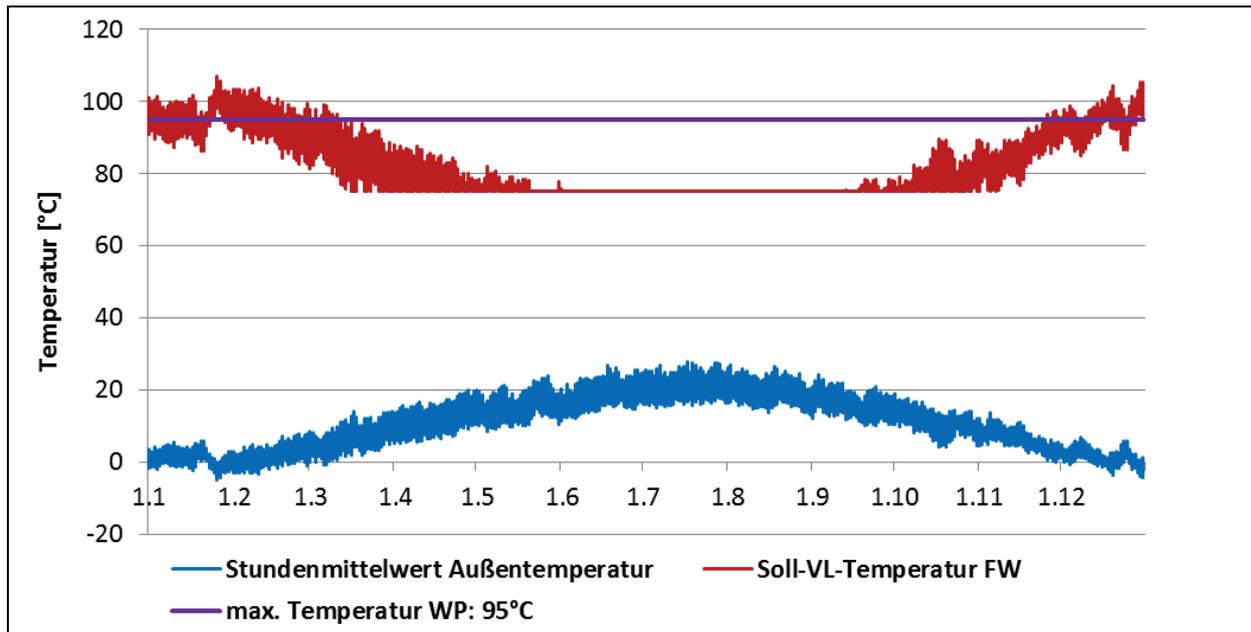


Abbildung 41: Stundenmittelwerte der Außentemperatur über 10 Jahre (2005 bis 2014 für den Standort Graz Nord (eigene Auswertungen auf Basis von Land Steiermark, 2016)

Für die Energieversorgung ergeben sich damit folgende Basisdaten (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14): Einerseits die Daten für die bestehenden zu versorgenden Gebäude, Brunnen und Wärmepumpen und andererseits die Daten zur Wärmeerzeugung (mit Wärmepumpen und Fernwärme) und für den Stromverbrauch (Grundwasserpumpe, Wärmepumpen). Basierend auf diesen Daten wurden die ökologische (siehe 2.3.1.1) und ökonomische (siehe 2.3.1.2) Bewertung vorgenommen.

Tabelle 13: Übersicht Basisdaten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Basisdaten „Innenstadt West“	Bruttogeschossfläche [m ²]	Anzahl Brunnen [#] ¹⁾	Anzahl Wärmepumpen [#]	Heizleistung pro Wärmepumpe [kW]	Kälteleistung pro Wärmepumpe [kW]
Bestandsgebäude	37.260	1 + 1	3	780	480

1) Anzahl Brunnen: 1 Entnahmebrunnen + 1 Schluckbrunnen

Tabelle 14: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Basisdaten „Innenstadt West“	Wärmeerzeugung aus [MWh/a]		Wärmeerzeugung inkl. Verluste [MWh/a]	Strom Grundwasserpumpe [MWh/a]	Strom Wärmepumpen [MWh/a]
	Wärmepumpe	Fernwärme			
Bestandsgebäude	3.671	127	3.798	46,9	1.631

2.2.3 Fallbeispiel „Hafnerstraße“

2.2.3.1 Geothermische Eigenschaften des Untergrunds

Im Bereich des Standortes Hafnerstraße ist der Aufbau des Untergrundes nicht im Detail bekannt, da generell nur sehr wenige tiefe Bohrungen im Stadtgebiet von Graz bekannt sind bzw. die geologischen Informationen dazu vorliegen.

Im Bereich des Standortes Hafnerstraße kann man von einer Abfolge von Lockersedimenten aller Korngrößen (Kies-Ton) ausgehen. Die damit einhergehenden Wärmeleitfähigkeiten sind zwar mäßig gut, eine thermische Anbindung der Erdwärmesonden an den Untergrund ist aber gewährleistet. Am Standort Hafnerstraße ist nur untergeordnet mit Grundwasserführung und einer niedrigen Grundwasserergiebigkeit zu rechnen, was eine thermische Nutzung des Grundwassers ausschließt.

Der Gesteinsaufbau ist günstig für eine Erdwärmenutzung ohne Wasserentnahme aus dem Untergrund. Die erwarteten Gesteine vorrangig neogene und quartäre Sedimente. Ob im Liegenden dieser Sedimentabfolge geothermisch günstige Festgesteinseinheiten bis zur geplanten Endtiefe der Erdwärmesonden von 200 m erreicht werden, ist unklar, da keine Bohrprofile des Untergrundes verfügbar sind bzw. erhoben werden konnten. Der Flanke des Florianiberger (siehe Abbildung 42) könnte sich im Untergrund fortsetzen, sodass in den Erdwärmesonden möglicherweise noch Festgesteinsuntergrund erreicht bzw. aufgeschlossen wird.

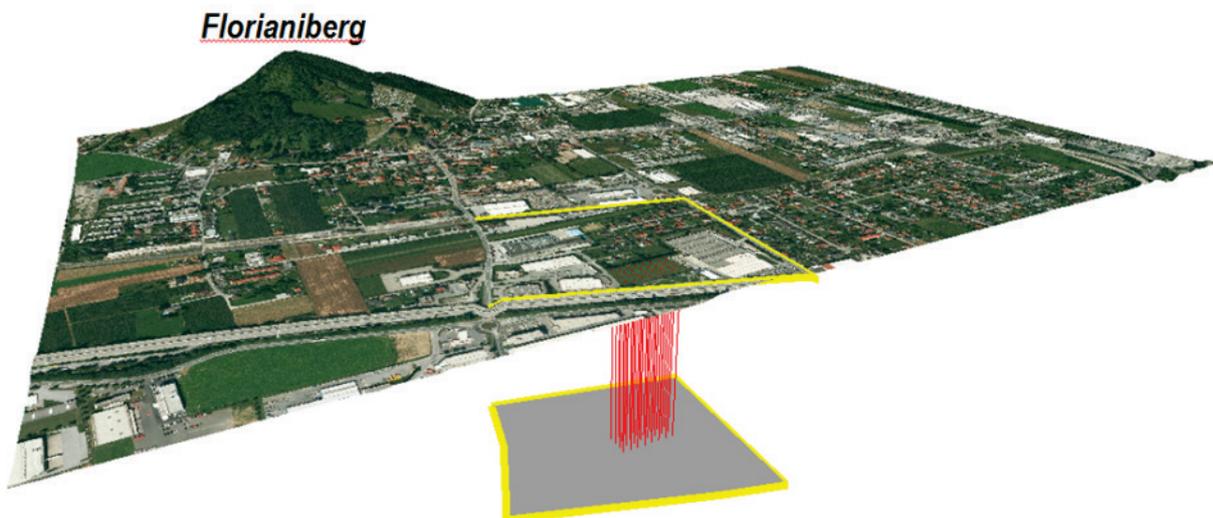


Abbildung 42: 3D-Übersicht des Standortes Hafnerstrass

2.2.3.2 Wärme- und Kühlbedarf

Beim Fallbeispiel „Hafnerstraße“ handelt es sich um ein städtisches Randgebiet ohne Fernwärmepotenzial mit folgenden Nutzungen:

- Wohnen:
 - ausschließlich EFH

- Gewerbe:
 - Produktionsbetrieb
 - Handel- und Gewerbe
 - Waschbetrieb

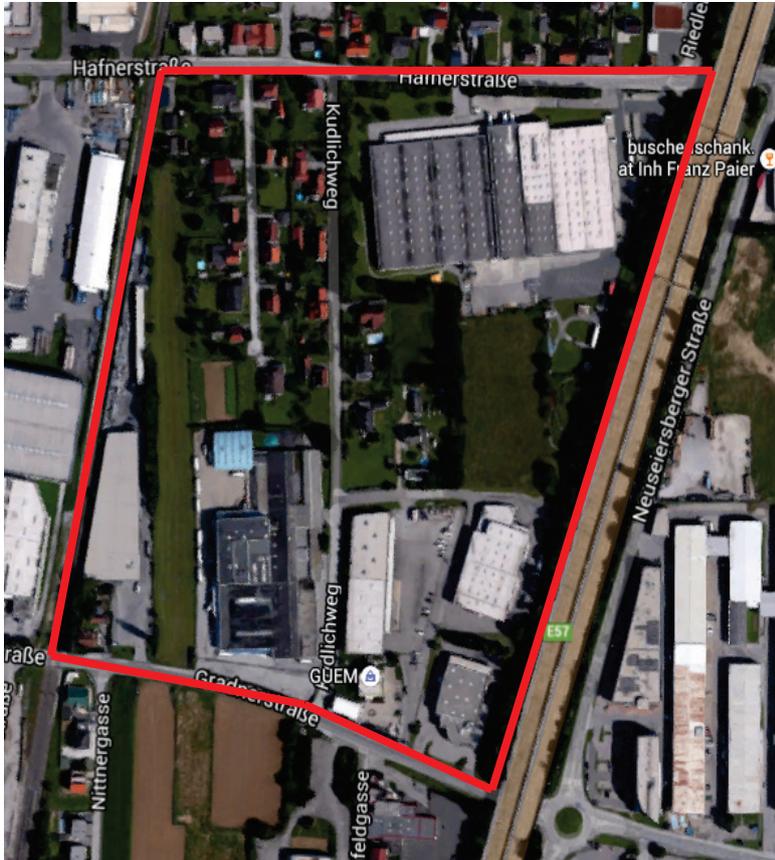


Abbildung 43: Luftbild Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (Google Maps, 2016)

In diesem Gebiet sind einige Gewerbebetriebe mit großen Lagerhallen und kleinem Bürobereich. Der Bürobereich wurde bei der Wärme- und Kühlbedarfsberechnung berücksichtigt.

Im zu deckenden Wärmebedarf des Fallbeispiels sind der Produktionsbetrieb und Waschbetrieb mit einem Wärmebedarf von in Summe rund 15 GWh aus folgenden Gründen nicht enthalten:

1. Im Produktionsbetrieb wird ein wesentlicher Anteil für die Beheizung der Halle mittels Dunkelstrahlplatten zur Verfügung gestellt. Diese Art der Wärmeabgabe kann nicht über eine zentrale Wärmeversorgung bereitgestellt werden. Abwärme ist nur in geringem Ausmaß vorhanden und wird bereits intern im Betrieb genutzt.
2. Im Waschbetrieb ist vorrangig Prozesswärme erforderlich, die über neue Dampfkessel zur Verfügung gestellt wird. Abwärme wird hier bereits intern im Betrieb genutzt. Eine zusätzliche Abwärmenutzung wäre nur mit großem Aufwand möglich und ist wirtschaftlich nicht darstellbar.

Anhand des Solardachkatasters wurden die verfügbaren Flächen für solarthermische Anlagen ermittelt und die Daten aufgrund der Begehung vor Ort aktualisiert. Die Begehung hat beispielsweise gezeigt, dass eine Photovoltaikanlage bereits auf einem Teil der Dachfläche eines Gewerbebetriebes vorhanden ist, sodass nur mehr eine geringere Dachfläche für die Solarthermienutzung zur Verfügung steht.



Abbildung 44: 5.310 m² Dachflächen von Büro- und Gewerbebauten der Kategorie „sehr gut geeignet“ laut Solardachkataster der Stadt Graz (Magistrat Graz – Stadtvermessung, 2016)

Die Bestimmung des Energiebedarfs für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ ergab folgende Ergebnisse:

Konditionierte Fläche:	8.200 m ²
Wärmebedarf:	850 MWh/a
Kühlbedarf (Büros):	110 MWh/a
Warmwasserbedarf:	39 MWh/a
Verfügbare Dachflächen:	5.310 m ² (Kategorie: „sehr gut geeignet“)
Abwärmenutzung:	keine berücksichtigt

Tabelle 15 und Abbildung 45 zeigen Detailergebnisse zum Energiebedarf und der Flächenverteilung für die vorliegenden Nutzungen in diesem Gebiet.

Tabelle 15: Wärme- und Kühlbedarf im Fallbeispiel „Hafnerstraße“ für Nutzung Wohnen und Büro

Übersicht Hafnerstraße					
	Einheit	Wohnen	Büro	Sonstige	Summe
Fläche konditioniert	[m ²]	3.044	5.190	nicht berücks.	8.234
Wärmebedarf	[kWh/a]	493.170	358.866	nicht berücks.	852.036
Kühlbedarf	[kWh/a]	-	110.700	-	110.700
Warmwasserbedarf	[kWh/a]	38.963	-	-	38.963

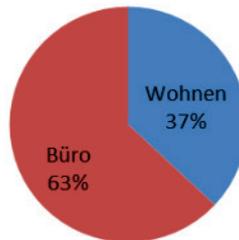


Abbildung 45: konditionierte Flächenanteile für Nutzung Wohnen und Büro im Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (Flächenanteil ohne Gewerbebetriebe)

2.2.3.3 Energieversorgungskonzepte

Das für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ angenommene Energieversorgungskonzept ist schematisch in Abbildung 46 dargestellt. Als Wärmequelle dient Erdwärme, die über ein Erdwärmesondenfeld aus dem Untergrund entnommen wird. Eine zentrale Großwärmepumpe wird zur Deckung des Heizenergiebedarfs der Wohn- und Bürogebäude eingesetzt. Die Wärmepumpe speist in ein lokales zu errichtendes Wärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 90°C, damit die einzelnen Gebäude mit der benötigten Wärme versorgt werden. Die Wärmeleistung der Wärmepumpe beträgt ca. 550 kW. Unter Berücksichtigung der Soletemperaturen und der benötigten Netz-Vorlauftemperaturen (Tabelle 16) wird eine Jahresarbeitszahl von ca. 3 für die Wärmepumpe angenommen, wobei im Winter die Leistungsziffer auf Grund der höheren Vorlauf-Temperaturen auf ca. 2,5 sinkt und in der Übergangszeit bis zu 3,4 erreicht werden kann.

Die Abdeckung des Warmwasserbedarfs und die Regeneration des Untergrunds erfolgt über eine Solaranlage in Kombination mit einem thermischen Speicher. Die Fläche der Solaranlage beträgt 1.900 m² und der Solarertrag ca. 680 MWh/a. Diese Fläche steht auf Dachflächen von Büro und Gewerbebauten zur Verfügung (siehe auch Abbildung 44).

Tabelle 16: Soletemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2011 – 2013) und Netz-Vorlauftemperatur

	Jän.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Soletemperatur [°C]	10,6	10,3	10,8	11,5	13,0	14,3	15,9	16,3	14,6	13,5	13,0	10,5
Netz-Vorlauf-temperatur [°C]	95,0	95,0	95,0	79,2	75,5				75,3	78,7	87,6	95,0

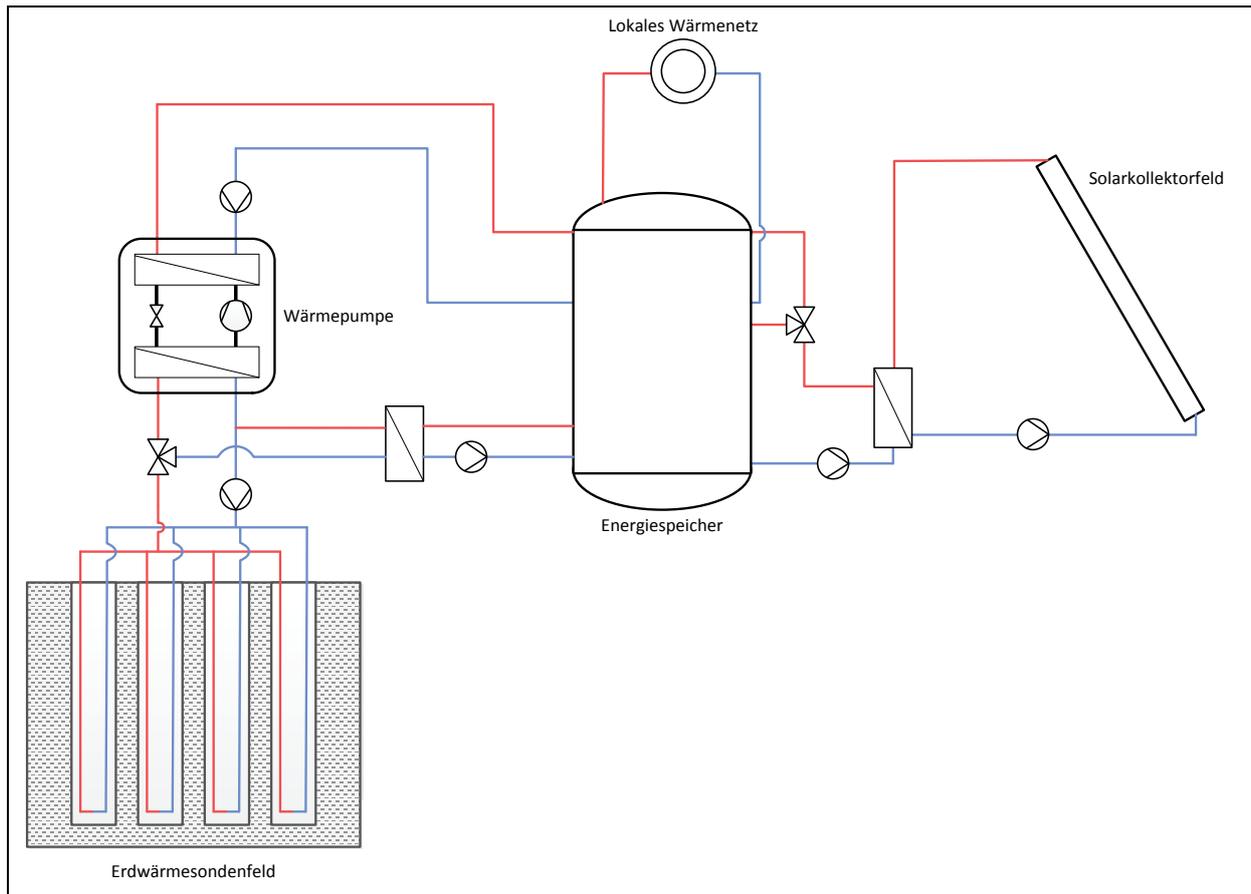


Abbildung 46: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Hafnerstraße“

In der Folge wird das angenommene Erdwärmesondenfeld genauer beschrieben.

Im Bereich des Standortes Hafnerstraße sind 32 Erdwärmesonden mit einer Tiefe von je 200m Tiefe die Grundlage der Planung

Zur Anwendung sollen sogenannte Duplex-Erdwärmesonden kommen. Duplexsonden haben je zwei Steigleitungen und je zwei Falleleitungen. In Abbildung 47 ist das Prinzip einer Duplexsonde dargestellt. Die Bohrung wird meist im Spülbohrverfahren hergestellt. Anschließend wird die Duplexsonde eingebaut und die Erdwärmesonde über ein Verfüllrohr mit einer Zement-Bentonit-Suspension verfüllt. Von großer Bedeutung ist die Qualität dieser Verfüllung (homogene Verfüllung, Beständigkeit gegenüber Temperaturwechsel), da die Effizienz des Wärmetransportes maßgeblich davon bestimmt wird.

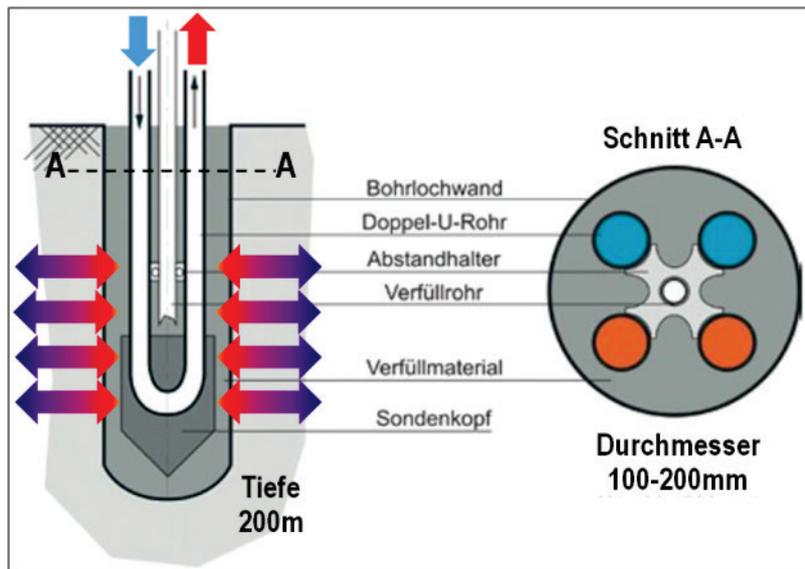


Abbildung 47: Prinzip einer Duplexsonde

Am Standort Hafnerstraße existiert eine Grünfläche, die für die Errichtung der 32 Erdwärmesonden geeignet wäre (siehe dazu [Abbildung 48](#)). In [Abbildung 49](#) ist die Anordnung der 32 geplanten Erdwärmesonden dargestellt. Die Abstände der Erdwärmesonden wurden dabei an die Umsetzungserfahrungen von bestehenden Erdwärmesondenfeldern angepasst und bei diesem Nutzungsbeispiel mit etwa 13 m festgelegt.



Abbildung 48: Lage des Erdwärmesondenfeldes am Standort Hafnerstraße

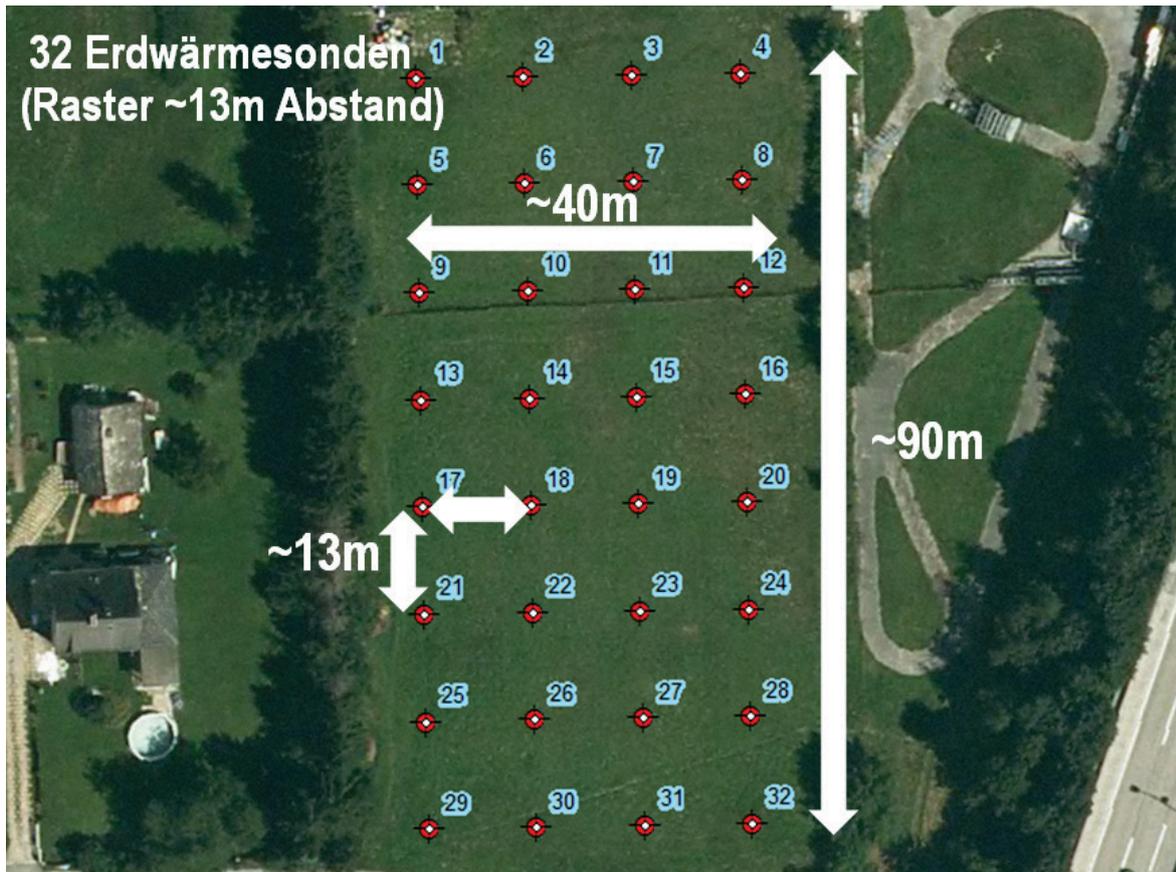


Abbildung 49: Detaildarstellung des Erdwärmesondenfeldes am Standort Hafnerstraße

Für die Energieversorgung ergeben sich damit folgende Basisdaten (siehe Tabelle 17 und Tabelle 18): Einerseits die Daten für die bestehenden zu versorgenden Gebäude, Erdwärmesonden und Wärmepumpe und andererseits die Daten zur Wärmeerzeugung (Erdwärmesonden, Wärmepumpe; Solaranlage für Warmwasser und Regeneration) und für den Stromverbrauch (Solepumpe für Erdwärmesonden und Wärmepumpe; Solaranlage und Wärmeverteilung). Basierend auf diesen Daten wurden die ökologische (siehe 2.3.2.1) und ökonomische (siehe 2.3.2.2) Bewertung vorgenommen.

Tabelle 17: Übersicht Basisdaten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Basisdaten „Hafnerstraße“	Bruttogeschossfläche [m ²]	Anzahl Erdwärmesonden [#] ¹⁾	Anzahl Wärmepumpen [#]	Heizleistung pro Wärmepumpe [kW]	Kälteleistung pro Wärmepumpe [kW]
Bestandsgebäude	8.230	32	1	554	319

1) Erdwärmesonden mit 200 m Tiefe

Tabelle 18: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Basisdaten „Hafnerstraße“	Wärmeerzeugung aus [MWh/a]		Wärmeerzeugung inkl. Verluste [MWh/a]	Strom Solepumpe + Wärmepumpe [MWh/a]	Strom Wärmepumpen [MWh/a]
	EWS + WP ¹⁾	Solaranlage			
Bestandsgebäude	937	70	1.007	416	34

1) EWS (Erdwärmesonden) und WP (Wärmepumpe)

2.2.4 Fallbeispiel „Olympiawiese“

Für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ wurden zwei Varianten betrachtet:

1. „Neubaugebiet“: Dieses Gebiet umfasst die freien Flächen im Bereich der durch die Puntigamerstraße, Raifeissenstraße, Petersbach und Mur abgegrenzt wird (siehe auch Abbildung 50).
2. „Potenzial“: Bei dieser Variante wurden zusätzlich zum oben genannten Gebiet die freien Flächen nördlich davon mitberücksichtigt. Diese Variante wurde gewählt um eine etwaige gegenseitige Beeinflussung mehrere Anlagen bei der Versorgung eines größeren Gebietes zu untersuchen.

2.2.4.1 Geothermische Eigenschaften des Untergrunds

Im Bereich des Standortes Olympiawiese kann man von einer Abfolge von quartären sandig-kiesigen Lockersedimenten mit sehr hohen Durchlässigkeiten ausgehen. Diese Gegebenheiten und die hohen Grundwassermächtigkeiten bewirken eine hohe Ergiebigkeit und sind somit für die thermische Nutzung des Grundwassers nahezu ideal. Das Gebiet liegt sehr nahe der Mur, sodass ein thermischer Einfluss derselben anzunehmen ist. Die Wärmeleitfähigkeiten der sandigen Kiese sind eher gering. Das Fallbeispiel liegt im Gebiet des regionalen Grundwassermodells, sodass die Strömungsverhältnisse sehr gut bekannt sind.

2.2.4.2 Wärme- und Kühlbedarf

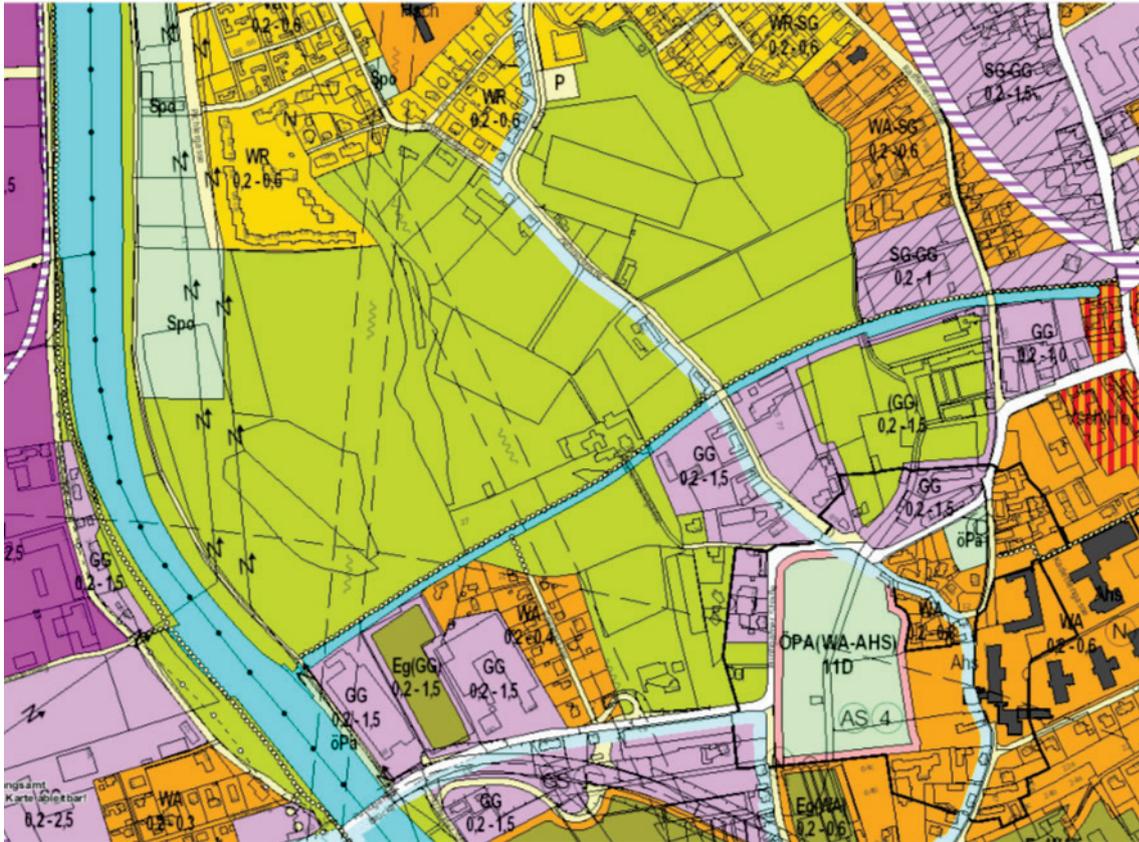
In diesem Beispiel sollen nicht Bestandsobjekten versorgt werden, sondern es wird von einer Wärmeversorgung im Neubau ausgegangen. Dadurch sind niedrige Systemtemperaturen möglich, was eine effiziente Betriebsweise der Wärmepumpe ermöglicht.

Beim Fallbeispiel „Olympiawiese“ handelt es sich um ein städtisches Entwicklungsgebiet ohne bestehenden Fernwärmeanschluss. Für die zukünftige Bebauung mit Wohngebäuden werden folgende Annahmen getroffen:

- thermisch optimierte Neubauten (MFH) mit Niedertemperaturtechnologie
- zusätzliches Potenzial im Norden für weitere Neubauten
- Bestandsbauten nicht integriert



Abbildung 50: Luftbild Fallbeispiel „Olympiawiese“ (Google Maps, 2016)



- WR Reines Wohngebiet
- WA Allgemeines Wohngebiet
- KG Kerngebiet
- GG Gewerbegebiet
- Landwirtschaftlich genutzte Fläche
- Eg Erwerbsgärtnerei
- SG Sanierungsgebiet - fehlende Abwasserreinigung

Abbildung 51: Auszug 3.0 Flächenwidmungsplan - Fallbeispiel Olympiawiese (Magistrat Graz - Stadtplanung, 2016)

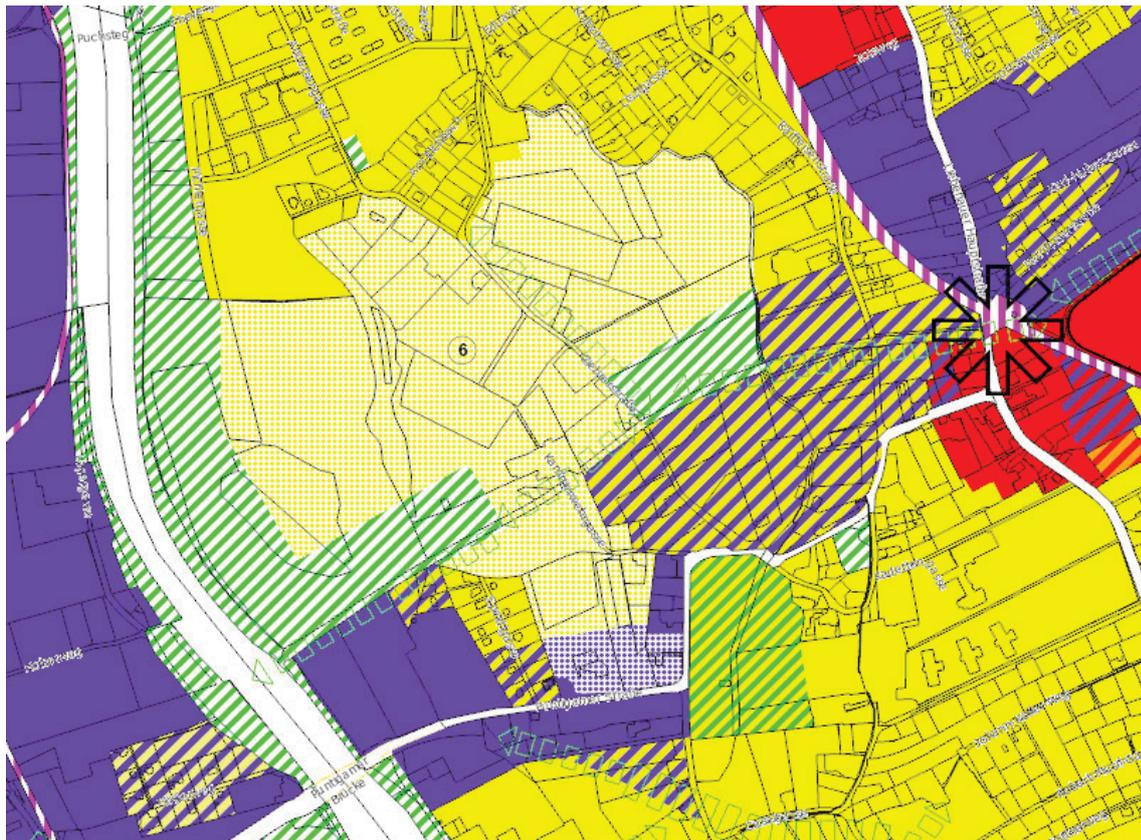


Abbildung 52: Auszug Stadtentwicklungskonzept 4.0 (STEK 4.0) - Fallbeispiel Olympiawiese (Magistrat Graz - Stadtplanung, 2016)

Für die Ermittlung des Wärmebedarfes für Neubauten wurden in diesem Fallbeispiel einerseits die vorhandenen freien Flächen aus dem Flächenwidmungsplan im Gebiet (Variante „Neubaugebiet“) und andererseits die freien Flächen nördlich des Gebietes laut STEK 4.0 (Variante „Potenzial“) herangezogen. Die Größe der Fläche wurde laut Digitalem Atlas Steiermark ermittelt.

Ein Versiegelungsgrad und Verkehrsflächen wurden berücksichtigt.

„Neubaugebiet“ und „Potenzial“ sind als „Wohngebiet geringe Dichte/Potenzial“ bzw. „Industrie/ Gewerbe /Wohnen mittlere Dichte“ ausgewiesen. Da der Wärmebedarf für Gewerbe stark von der jeweiligen Betriebsart abhängt und hier keinerlei Daten bekannt waren, wurde für die Ermittlung des Wärmebedarfes von einem Wohnanteil von 100% ausgegangen.

Die Bebauungsdichte wurde mit 0,8 berücksichtigt.

Für die Planung eines gemeinsamen Wärmeversorgungskonzepts von Betrieben und Wohnbauten in gemischten Gebieten sollten Betriebe frühzeitig mit einbezogen werden, damit

die Möglichkeit einer Integration in ein Gesamtenergieversorgungskonzept gegeben ist (Bereitstellung von Abwärme bzw. Bezug von Wärme).

Tabelle 19: Flächenermittlung Bruttogeschossflächen für Wohnbau

		Varianten	
		„Neubaugebiet“	„Potenzial“
Summe über alle Flächen	[m ²]	63.000	212.000
Versiegelungsgrad (Verkehrsflächen, Gemeinschaftsflächen)	Gebäude,	60%	60%
versiegelte Flächen	[m ²]	37.800	127.200
Verkehrsflächen		10%	10%
zur Verfügung stehende Fläche		34.020	114.480
Anteil Wohnen		100%	100%
Bebauungsdichte		0,8	0,8
Gesamtfläche Wohnen	m ²	28.000	93.000

Für die Bebauung wurde ein Mehrfamilienhaus „konstruiert“, um die Anzahl der möglichen Objekte mit dem zugehörigen Wärmebedarf zu ermitteln.

Tabelle 20: Wärmebedarf Neubauten

Annahmen Mehrfamilienwohnhaus		„Musterobjekt“
	[m ²]	28.000
Anzahl Objekte		5
BGF je Gebäude	[m ²]	5.600
Anzahl Geschosse		4
Raumhöhe je Geschoß	[m]	3
Gebäudehöhe	[m]	12
BGF je Geschoß	[m ²]	1.400
Annahme Gebäudelänge L	[m]	40
Annahme Gebäudebreite B	[m]	35
Volumen (V)	[m ³]	16.800
Gebäudehüllfläche (A)	[m ²]	4.600
Kompaktheit (A/V)	[m ⁻¹]	0,27
charakteristische Länge (V/A)	[m]	3,65
Anforderung an HWB _{Ref,RK} in [kWh/m ² ,a] lt. OIB 6 März 2015 (Bauordnung) für Wohnbauten bis 31.12.2016:	[kWh/(m ² *a)]	29
Anforderung an HWB lt. Steir. WBF (Stand Juni 2016):	[kWh/(m ² *a)]	22

Anforderungen an den Heizwärmebedarf laut OIB Richtlinie 6 und ökologische Wohnbauförderung Steiermark sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 21: Anforderung an den Heizwärmebedarf im Neubau (Wohngebäude) laut OIB Richtlinie 6 (Österr. Institut für Bautechnik, 2015)

bis 31.12.2016	16 x (1 + 3,0 /lc)
ab 01.01.2017	14 x (1 + 3,0 /lc)

lc...charakteristische Länge

Tabelle 22: Anforderungen an den Heizwärmebedarf laut Richtlinien für die ökologische Wohnbauförderung, Maximal zulässiger jährlicher Heizwärmebedarf Super-Niedrigenergiehaus (Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abt15 – Fachabteilung Energie und Wohnbau, 2015)

A/V	HWB _{BGF,WG,max,RX} [kWh/m ² ,a]
≥ 0,8	36
≤ 0,2	20

A/V Verhältnisse dazwischen sind mit folgender Formel zu interpolieren:

$$HWB_{BGF,WG,max,RX} = (A/V - 0,2)/0,0375 + 20$$

Es wurde von einer Nutzung vorhandener Förderungen ausgegangen und ein Heizwärmebedarf von 22 kWh/(m²*a) für die weitere Betrachtung herangezogen.

Der Warmwasserbedarf wurde mit 12,7 kWh/(m²*a) berücksichtigt, wobei eine geringere Warmwassertemperatur für effizientere Nutzung einer Wärmepumpe berücksichtigt wurde (elektrische Nachheizung).

Eine Abwärmenutzung ist in diesem Gebiet nicht möglich. Eine Nutzung von Solarthermie wurde für das Fallbeispiel nicht gewählt.

Tabelle 23: Übersicht Wärmebedarf im Gebiet

Übersicht Gebiet ehemalige Olympiawiese			
	Einheit	Variante Neubaugebiet	Variante Potenzial
Fläche	m ²	28.200	93.600
Gebäudeanzahl		5	17
Wärmebedarf	MWh/a	720	2.400
Kühlbedarf Wohnen	MWh/a	-	-
Warmwasserbedarf	MWh/a	270	900

2.2.4.3 Energieversorgungskonzepte

Das Energieversorgungskonzept für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ ist schematisch in Abbildung 53 dargestellt. Als Wärmequelle dient Grundwasser. In der Variante „Neubaugebiet“ kann der Wärmebedarf über einen Entnahme- und einen Schluckbrunnen gedeckt werden. Bei der Variante „Potenzial“ werden jeweils 3 Entnahme- und Schluckbrunnen benötigt.

Jedes der mit Wärme zu versorgenden Mehrgeschoßwohnbauten wird mit einer Wärmepumpe ausgestattet, die eine Temperatur von 35°C bereitstellt. Die Warmwasserbereitung erfolgt in den einzelnen Wohnungen über einen Brauchwasserspeicher, der elektrisch nachbeheizt wird. Die Wärmeleistung pro Wärmepumpe beträgt ca. 90 kW. Das ergibt für die Variante „Neubaugebiet“ insgesamt ca. 450 kW und für die Variante „Potenzial“ ca. 1.500 kW.

Unter Berücksichtigung der Grundwassertemperaturen (Monatsmittelwerte) und der benötigten Wärme-Vorlauf-Temperaturen (Tabelle 24) wird eine Jahresarbeitszahl von ca. 5,3 für die Wärmepumpe angenommen, wobei im Frühjahr auf Grund der etwas niedrigeren Grundwassertemperaturen die Leistungsziffer auf ca. 5,0 sinkt und im Herbst auf Grund der etwas höheren Grundwassertemperaturen die Leistungsziffer auf ca. 5,5 steigt.

Tabelle 24: Grundwassertemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2012 und 2013) und Wärme-Vorlauf-Temperatur

	Jän.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Grundwasser [°C]	13,3	12,8	12,3	11,9	11,7	11,8	12,2	12,8	13,3	13,7	13,8	13,7
Wärme-Vorlauf-Temperatur [°C]	35											

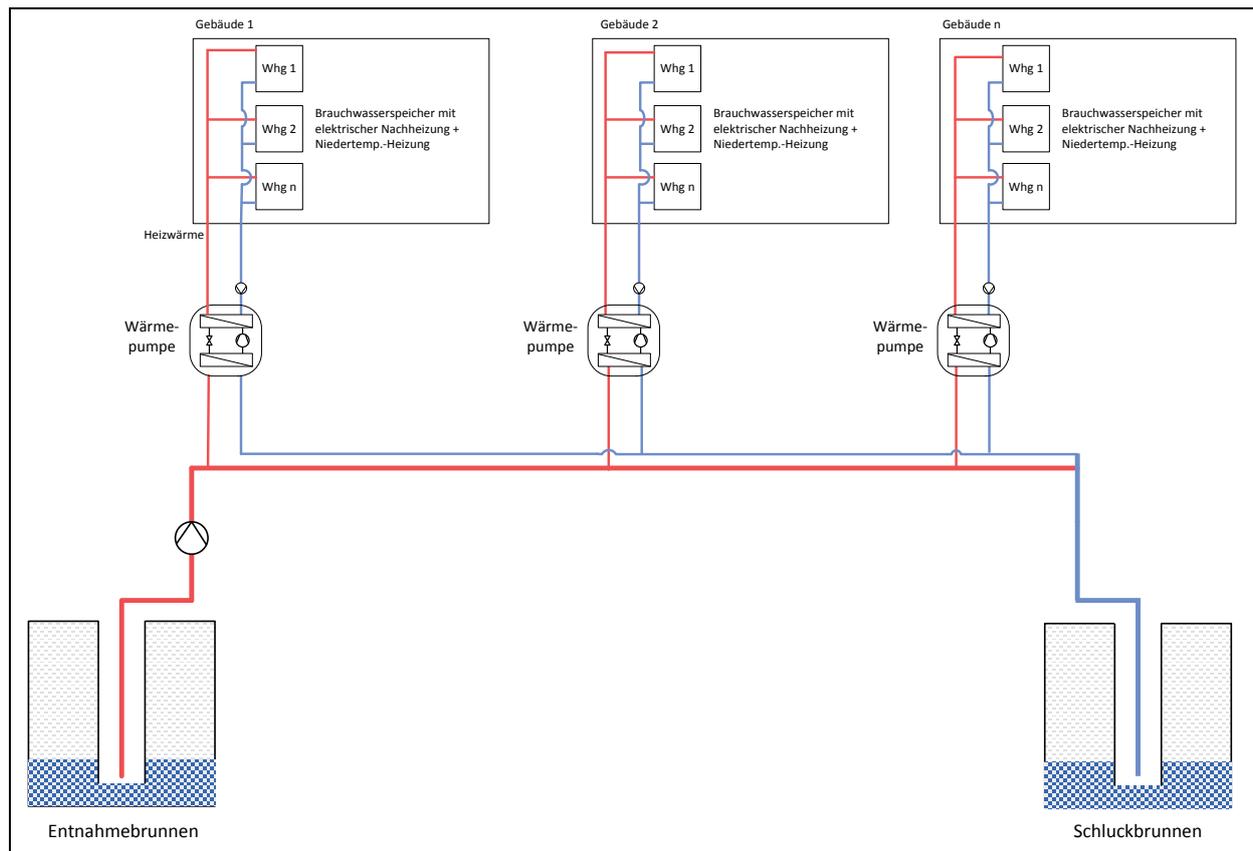


Abbildung 53: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Olympiawiese“

Für die Energieversorgung ergeben sich damit folgende Basisdaten (siehe Tabelle 25 und Tabelle 26): Einerseits die Daten für die Gebäude, Brunnen und Wärmepumpen und andererseits die Daten zur Wärmeerzeugung (Heizung und Warmwasser) und für den

Stromverbrauch (Grundwasser, Wärmepumpen). Basierend auf diesen Daten wurden die ökologische (siehe 2.3.3.1) und ökonomische (siehe 2.3.3.2) Bewertung vorgenommen.

Tabelle 25: Übersicht Basisdaten für Variante „Neubaugebiet“ und „Potenzial“

Basisdaten Varianten „Olympiawiese“	Bruttogeschossfläche [m ²]	Anzahl Brunnen [#] ¹⁾	Anzahl Wärmepumpen [#]	Heizleistung Wärmepumpen [kW]	Kälteleistung Wärmepumpen [kW]
„Neubaugebiet“	28.200	1 + 1	5	460	380
„Potenzial“	93.600	2 + 2	17	1.550	1.270

1) Anzahl Brunnen: 1 Entnahmebrunnen + 1 Schluckbrunnen; 2 Entnahmebrunnen + 2 Schluckbrunnen

Tabelle 26: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für Variante „Neubaugebiet“ und „Potenzial“

Basisdaten Varianten „Olympiawiese“	Wärmeerzeugung aus [MWh/a]		Wärmeerzeugung inkl. Verluste [MWh/a]	Strom Grundwasserpumpe [MWh/a]	Strom Wärmepumpen [MWh/a]
	Wärmepumpe	Strom			
„Neubaugebiet“	988	168	1.148	12,9	178
„Potenzial“	3.272	559	3.831	46,7	606

2.3 Bewertung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz

Die Bewertung der drei untersuchten Fallbeispiele in der Modellregion Graz umfasst für jedes Fallbeispiel eine ökologische Bewertung, eine ökonomische Bewertung und die Bewertung der Auswirkungen der geothermischen Nutzung auf den Untergrund.

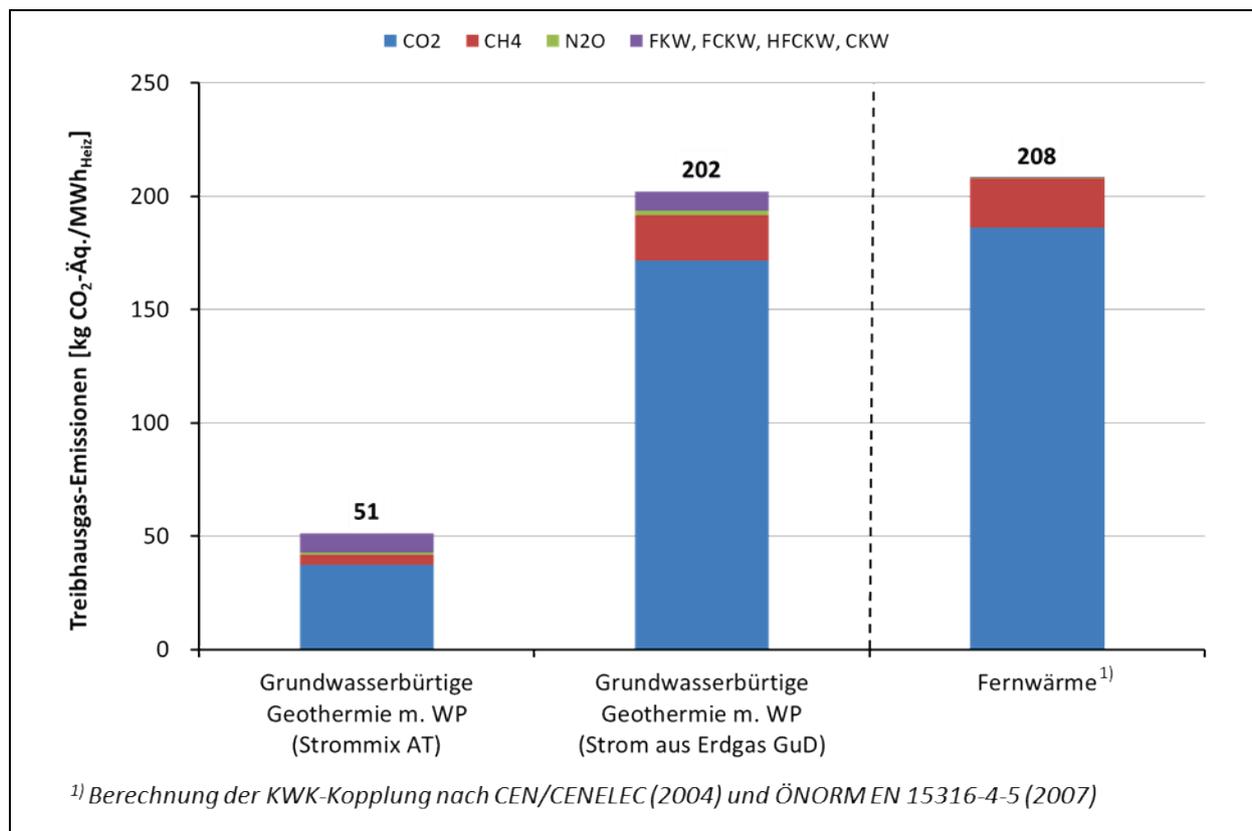
2.3.1 Fallbeispiel „Innenstadt - West“

2.3.1.1 Ökologische Bewertung

Für das Fallbeispiel „Innenstadt – West“ wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt „1.3.5 Ökologische Bewertung“ zur Methodik) in der Treibhausgasemissionen und der kumulierter Energieaufwand abgeschätzt wurden. Die Ergebnisse beziehen sich auf 1 MWh Wärme, die in das vorhandene Fernwärmenetz eingespeist wird (z.B. kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz}). Im Fallbeispiel wird die Wärme aus grundwasserbürtiger Geothermie in Kombination mit einer Wärmepumpe bereitgestellt. Für die Erzeugung des von der Wärmepumpe benötigten Stroms werden zwei Varianten betrachtet: (1) der österreichische Strommix (Strommix AT) und (2) die Stromerzeugung in einem Erdgas Gas- und Dampfkraftwerk (Erdgas GuD). Der Wärmeerzeugung aus grundwasserbürtiger Geothermie wird die Wärmeerzeugung mit Fernwärme im Großraum Graz gegenübergestellt.

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die Treibhausgas-Emissionen dargestellt. Wird der Strombedarf der Wärmepumpe und anderer Pumpen (Grundwasserpumpe, Verteilpumpe) aus dem österreichischen Strommix, mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energieträgern (89% lt. Stromkennzeichnungsbericht 2015 der E-Control) gedeckt, betragen die Treibhausgas-Emissionen ca. 51 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz}. Im

Vergleich zu Fernwärme mit ca. 208 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz} ist das eine Reduktion von 75%. Wird der benötigte Strom in einem Erdgas-GuD-Kraftwerk erzeugt, dann erhöhen sich die Treibhausgas-Emissionen auf ca. 202 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz} und liegen damit in derselben Größenordnung wie die Treibhausgas-Emissionen der Fernwärme. Bei der Art der Treibhausgas-Emissionen stammen bei den Varianten mit grundwasserbürtiger Geothermie ca. 9 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz} aus der Gruppe der FKW, FCKW, HFCKW und CKW. Diese stammen Großteils aus Kältemittelverlusten bei der Produktion, Betrieb³ und Entsorgung der Wärmepumpe. Bei „grundwasserbürtiger Geothermie (Strom aus Erdgas GuD)“ und „Fernwärme“ machen CH₄-Emissionen ca. 10% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus. Diese stammen bei „grundwasserbürtiger Geothermie (Strom aus Erdgas GuD)“ Großteils aus Verlusten bei der Erdgasförderung und -transport. Bei der Fernwärme stammen diese Großteils aus CH₄-Verlusten bei der Kohleförderung und zu einem kleineren Teil aus der Erdgasförderung und -transport. Abbildung 55 zeigt die Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für die Varianten mit grundwasserbürtiger Geothermie auf die Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase. Diese Aufteilung wird durch die Art der Strombereitstellung beeinflusst. Stammt der Strom aus dem österreichischen Strommix fallen ca. 6% der Treibhausgas-Emissionen bei der Errichtung und ca. 93% im Betrieb an. Wird der Strom in einem Erdgas GuD erzeugt, macht die Betriebsphase 98% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus.



³ Kältemittelverluste im Betrieb und bei der Entsorgung wurden mit 2% angenommen. Kältemittelverluste für die Errichtung wurden aus ecoinvent (2016) übernommen.

Abbildung 54: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Innenstadt-West“

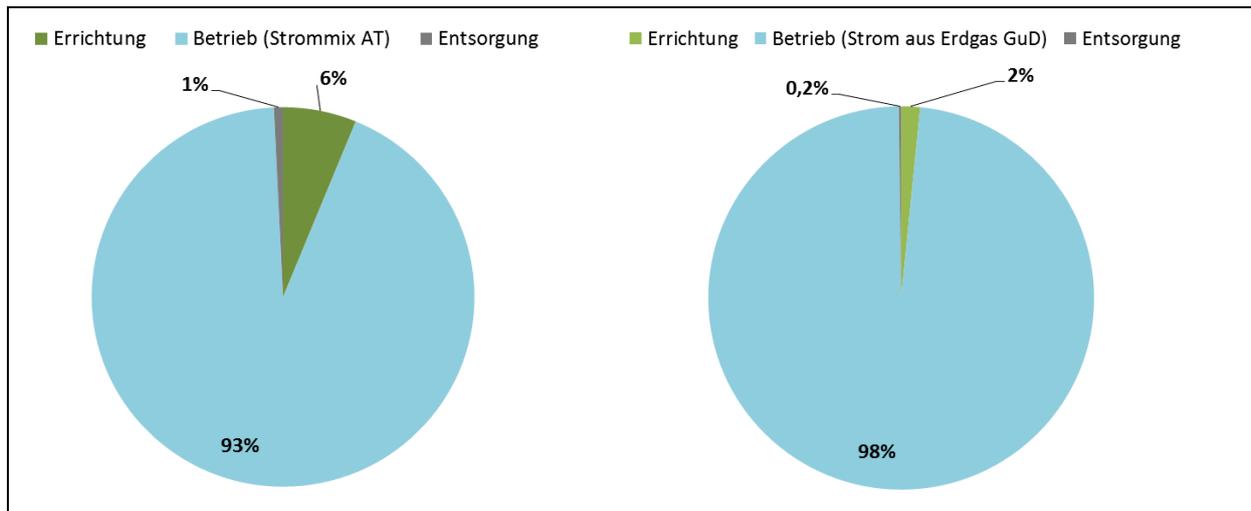


Abbildung 55: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für den kumulierten Energieaufwand sind in [Abbildung 56](#) dargestellt. Die Heizsysteme mit grundwasserbürtiger Geothermie haben einen höheren kumulierten Energieaufwand als die Fernwärme.

Der Anteil an erneuerbaren Energieträgern ist bei den Heizsystemen mit grundwasserbürtiger Geothermie deutlich höher als bei der Fernwärme. Wird der österreichische Strommix in der Wärmepumpe verwendet, können 70% fossile Energie im Vergleich zur Fernwärme eingespart werden.

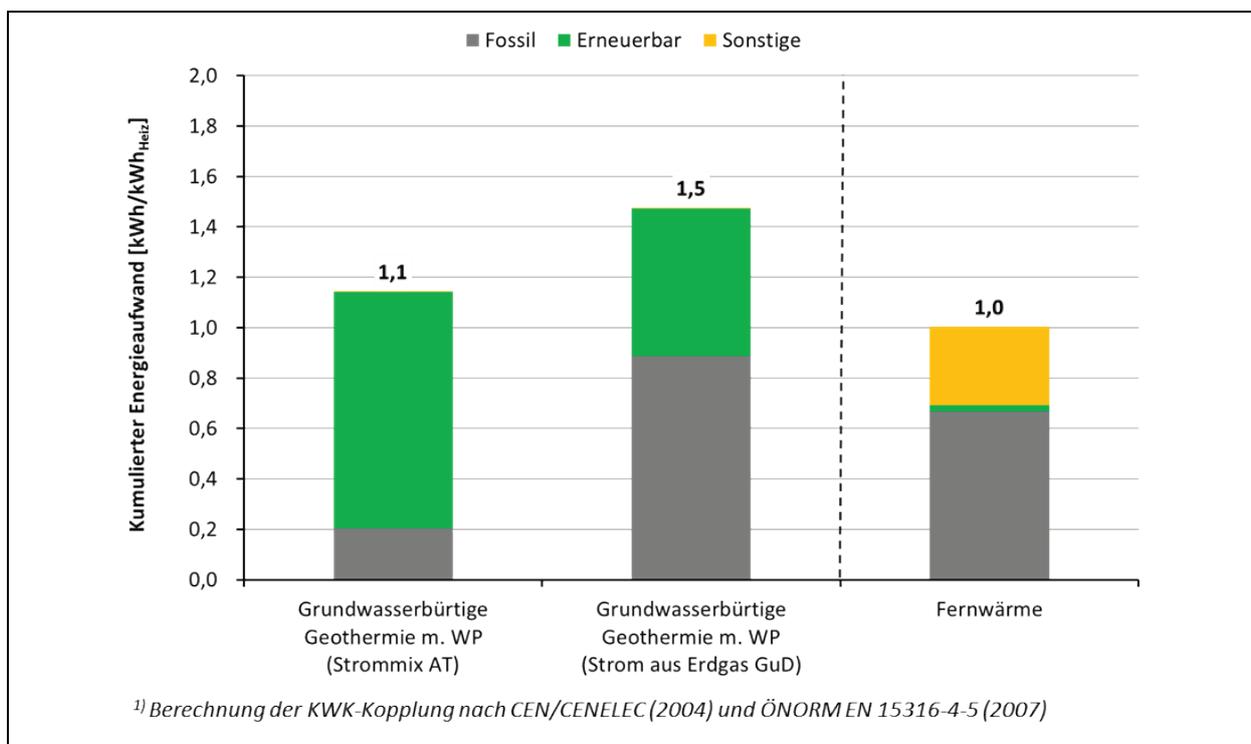


Abbildung 56: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

2.3.1.2 Ökonomische Bewertung

Ausgehend von der verwendeten Methodik (siehe 1.3.6) und vom Energieversorgungskonzept (siehe 2.2.4.3) werden die Investitionskosten in die Bereiche Grundwassernutzung (Brunnen, Grabungen, Leitungen etc.), Wärmepumpe (3 Wärmepumpen mit je 780 kW Heizleistung) und Wärmeeinbindung (Wärmetauscher, Armaturen, Regelung etc.) eingeteilt. Diese Investitionskosten sind in Tabelle 27 zusammengestellt.

Tabelle 27: Grunddaten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Grundwassernutzung	99.000	€
Wärmepumpe	578.000	€
Wärmeeinbindung	68.000	€
Gesamtinvestitionskosten	745.000	€

Damit errechnen sich Jahreskosten von etwa 176.800 € und spezifische Wärmegestehungskosten von 46,5 €/MWh. Die Aufteilungen auf die Kostenanteile und auf die Investitionsbereiche sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 dargestellt. Die großen Anteile entfallen auf die Wärmepumpe und die Stromkosten (Verbrauchsgebundene Kosten, bedingt durch die relativ niedrige Jahresarbeitszahl).

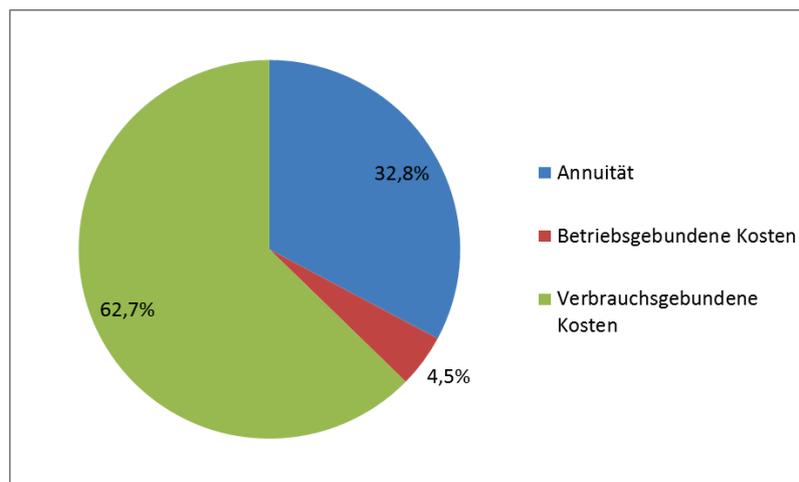


Abbildung 57: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

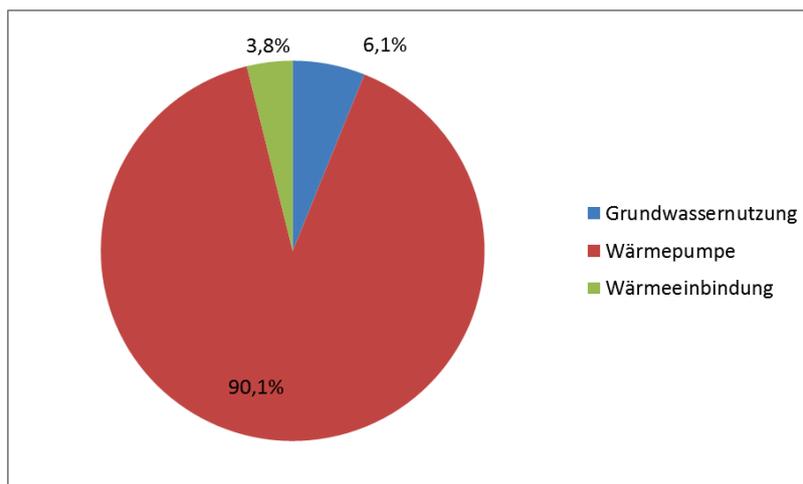


Abbildung 58: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Wenn als kalkulatorischer Zinssatz 4 % eingesetzt werden, ergeben sich Jahreskosten von etwa 183.700 € und spezifische Wärmegestehungskosten von 48,4 €/MWh.

2.3.1.3 Auswirkungen der geothermischen Nutzung auf den Untergrund

Die Energiebedarfserhebung ergab die in Abbildung 59 dargestellten Entnahmemengen, die aufgrund der hohen Ergiebigkeit des Aquifers in diesem Bereich aus einem fiktiven Brunnen entnehmbar sind. Der Brunnen wird ausschließlich für Heizzwecke genutzt, sodass die Entnahmemengen in den Sommermonaten gleich Null sind. Die entnommene Wassermenge wird unterstrom um 5 K abgekühlt (gesetzliche Vorgabe maximal 6 K) in einen fiktiven Schluckbrunnen reinjiziert, der so situiert wurde, dass kein hydraulischer Kurzschluss möglich ist. Verwendet wurde ein aus dem regionalen Grundwassermodell ausgeschnittenes Detailmodell, welches die Randbedingungen und Aquiferparameter aus dem Regionalmodell übernimmt, aber mit einem auf die Fragestellung zugeschnittenen verfeinerten Elementenetz versehen wurde (siehe Potentiallinien, Flurabstände und Elementenetz in Abbildung 61, genaue Lage in Abbildung 60, Randbedingung der Lufttemperatur und der Wassertemperatur der Mur in Abbildung 62). Die relevanten Wärmetransportparameter sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Die Temperaturmessdaten der Hydrographischen Landesabteilung (Abbildung 63) zeigen sehr deutlich die Wärmeinsel im Innenstadtbereich. Der Vergleich mit den simulierten Daten (Abbildung 64) zeigt, dass die Dynamik sehr gut erfasst werden kann, nicht aber der Einfluss der Wärmeeinträge aus dem Stadtgebiet (vor allem durch tiefe Einbauten). Somit ist das Wärmetransportmodell vor allem prognosefähig bezüglich relativer Temperaturänderungen, es besteht aber zukünftiger Forschungsbedarf bezüglich des thermischen Einflusses tiefer Einbauten in Stadtgebieten.

Abbildung 66 zeigt die simulierten Ganglinien der Entnahme- und Rückgabetemperatur (Abkühlung um 5 K). Der Temperaturanstieg im Reinjektionsbrunnen im ersten Jahr ist bedingt durch die Fließzeiten eine Reaktion auf das Abschalten der Entnahme im ersten Sommer.

Abbildung 65 zeigt die simulierte Temperaturverteilung bei Betrieb der fiktiven Entnahme und des Reinjektionsbrunnens. Sehr deutlich ist der Einfluss der Mur erkennbar sowie der weitreichende abkühlende Einfluss des reinjizierten Grundwassers, der auch in der Temperaturdifferenzenkarte in Abbildung 67 sehr klar ersichtlich wird.

Der hydraulische Einfluss auf andere Wasserrechte und auch auf die Flurabstände ist aufgrund der hohen Ergiebigkeit des Aquifers sehr gering, wie die Karte der simulierten Absenkungen und Aufhöhungen in Abbildung 68 zeigt.

Somit können sich aus dem Fallbeispiel Innenstadt-West die folgenden auf andere urbane Gebiete übertragbaren Aussagen ableiten lassen:

- Die Ergebnisse sind auf viele österreichische urbane Gebiete übertragbar, da sie überwiegend auf hydrogeologisch ähnlichen Rahmenbedingungen (gut durchlässige grundwasserführende Sande und Kiese) situiert sind.
- In Wärmeinseln urbaner Gebiete kann durch die Nutzung mittels Wärmepumpen für Heizzwecke durch sinnvolle und optimierte Nutzungskonzepte eine deutliche und weitreichende Abkühlung des Grundwassers erreicht werden. Derartige Konzepte sind in Zukunft in Abhängigkeit von der Ergiebigkeit des Grundwasserkörpers und der Beeinflussung bestehender Wasserrechte zu entwickeln.
- Dies hat positive Auswirkungen auf die Grundwasserqualität.
- Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der diversen thermischen Einflüsse in urbanen Gebieten.

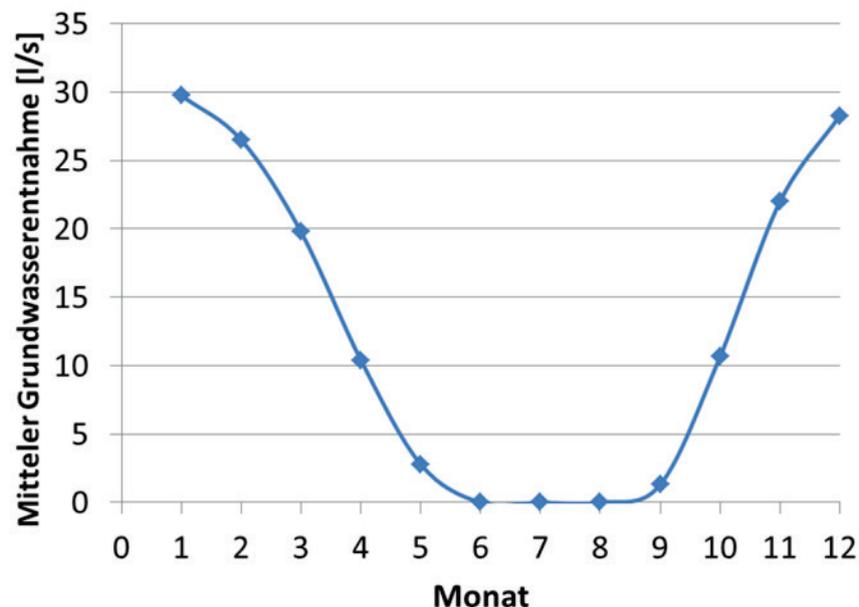


Abbildung 59: Innenstadt-West - Auf Basis der Energiebedarfserhebung ermittelter mittlerer Jahresgang der Grundwasserentnahme aus einem fiktiven Brunnen.

Tabelle 28: Innenstadt-West - Relevante Wärmetransportparameter

	Wärmeleitfähigkeit fluid W/(m.K) - l/m/s/K	Wärmeleitfähigkeit solid W/(m.K) - l/m/s/K	spez. Wärmekap. fluid MJ/(m3.K)	spez. Wärmekap. solid MJ/(m3.K)	Stauer Wärmeleit.	Stauer Wärmekap.	Wärme NB Wassergeh.	Bodentemp.	Wärme NB	init Temp	Entnahme l/s	Einspeisung l/s	Einspeis-temp	Heat Poros	Ref-temp.	Mur	Mur Transf. IN	Thickness of 1 Layer	max. Zeitschritt [d]	Grundlage
VDI 4640 Wasser bei 10°C/ Sand gesättigt	0.59	15-4.0	4.15	2.2-2.8					k.		k.	k.			k.					
VDI 4640 Kies Steine trocken	k.	0.4-0.5	k.	1.3-1.6					k.		k.	k.			k.					
VDI 4640 Kies Steine gesättigt	k.	1.6-2.0	k.	2.2-2.6					k.		k.	k.			k.					
V07n	0.65	1.6	4.2	2.9	1.6	2.9	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2°)	ja	14°C	0	0		0.2	14°C	pow71_Mur_ow3397_1 993_b_20071231_TMpow	0.1	1	k	V07l
V07o	0.65	1.6	4.2	2.9	1.6	2.9	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2°)	ja	14°C	30	-30	7.2	0.2	14°C	pow71_Mur_ow3397_1 993_b_20071231_TMpow	0.1	1	k	V07n
V07p	0.65	1.6	4.2	2.9	1.6	2.9	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2°)	ja	14°C	30	-30	9.0	0.2	14°C	pow71_Mur_ow3397_1 993_b_20071231_TMpow	0.1	1	k	V07p
V07r	0.65	1.6	4.2	2.9	1.6	2.9	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2°)	ja	14°C	MM	MM	p-5K	0.2	14°C	pow71_Mur_ow3397_1 993_b_20071231_TMpow	0.1	1	k	V07q

**Manage Geocity
Pilotgebiet 1:
Innenstadt West
Entnahme und
Einspeisepunkt**

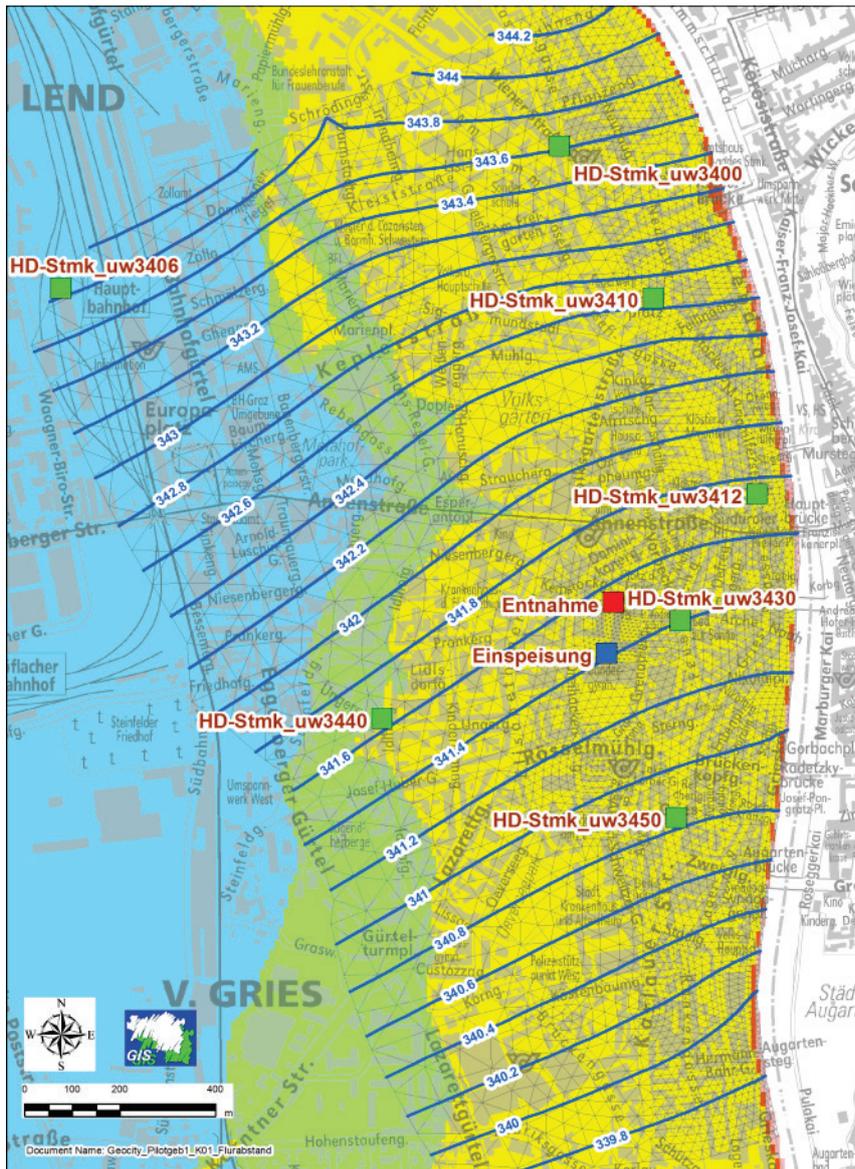
Bearbeitung:
T. Harum & A. Dalla-Via
JOANNEUM RESEARCH
Institut für Wasser, Energie
und Nachhaltigkeit
Forschungsgruppe
Wasserressourcen
und Umweltanalytik



Legende:

- Einspeisung
 - Entnahme
 - Messstellen
- Wasserrechte**
- Brunnen
 - ◆ Grundwasseranlage
 - Kläranlage
 - Kraftwerk
 - ▲ Oberflächenwasseranlage
 - GWSP_ISO_V07s_Q50

Abbildung 60: Innenstadt-West – Lage der fiktiven Entnahme- und Einspeisungsstellen, Messstellen und bestehender Wasserrechte



**Manage Geocity
 Pilotgebiet 1:
 Innenstadt West
 GWM Grazer Feld
 GW-Flurabstände,
 GWSP-Isolinien
 Istzustand
 und Finite Elemente Netz
 Zeitraum 2003-2013**

Bearbeitung:
 T. Harum & A. Dalla-Via
 JOANNEUM RESEARCH
 Institut für Wasser, Energie
 und Nachhaltigkeit
 Forschungsgruppe
 Wasserressourcen
 und Umweltanalytik



Legende:

- Einspeisung
- Entnahme
- Messstellen
- GWSP_ISO_V07n_IST_Q50
- Finite Elemente Netz

Flurabstand Istzustand

- < 2 m
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 25 m

Abbildung 61: Innenstadt-West - Grundwasserflurabstände, Grundwasserpotentiallinien und Finite-Elemente-Netz des Detailmodells.

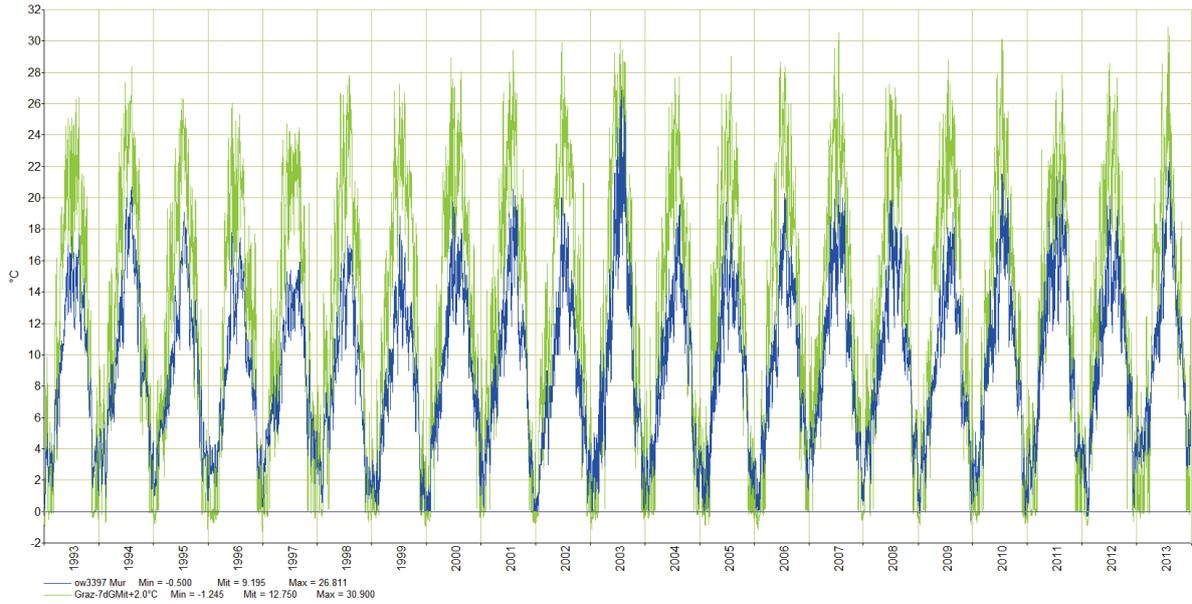


Abbildung 62: Randbedingung Lufttemperatur und Wassertemperatur der Mur

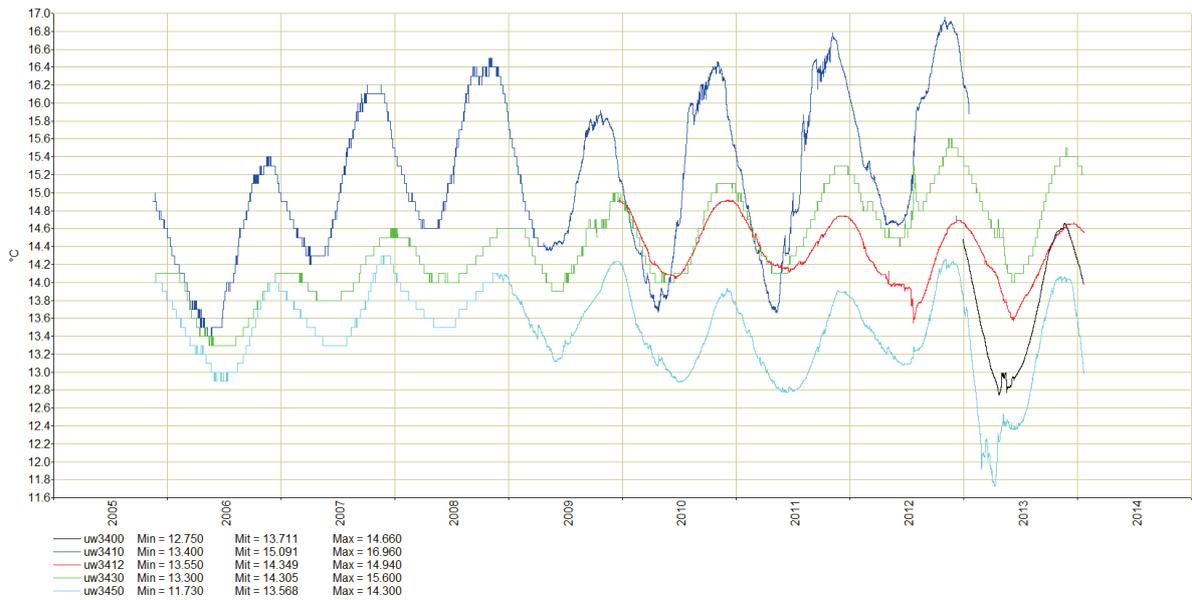


Abbildung 63: Grundwassertemperaturen Messwerte Innenstadt-West

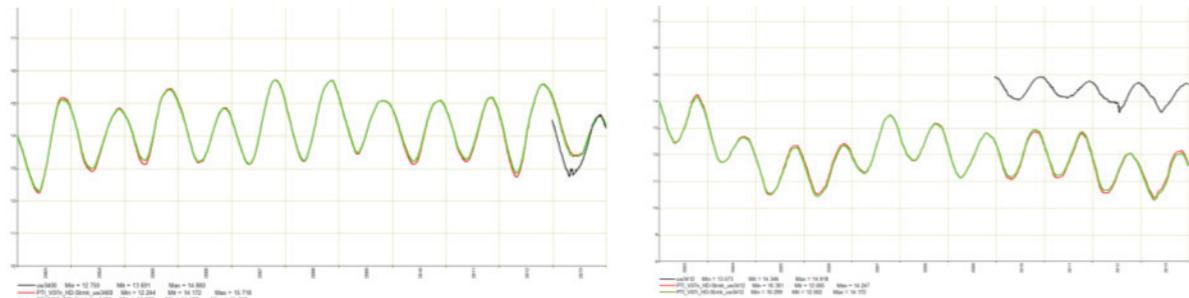
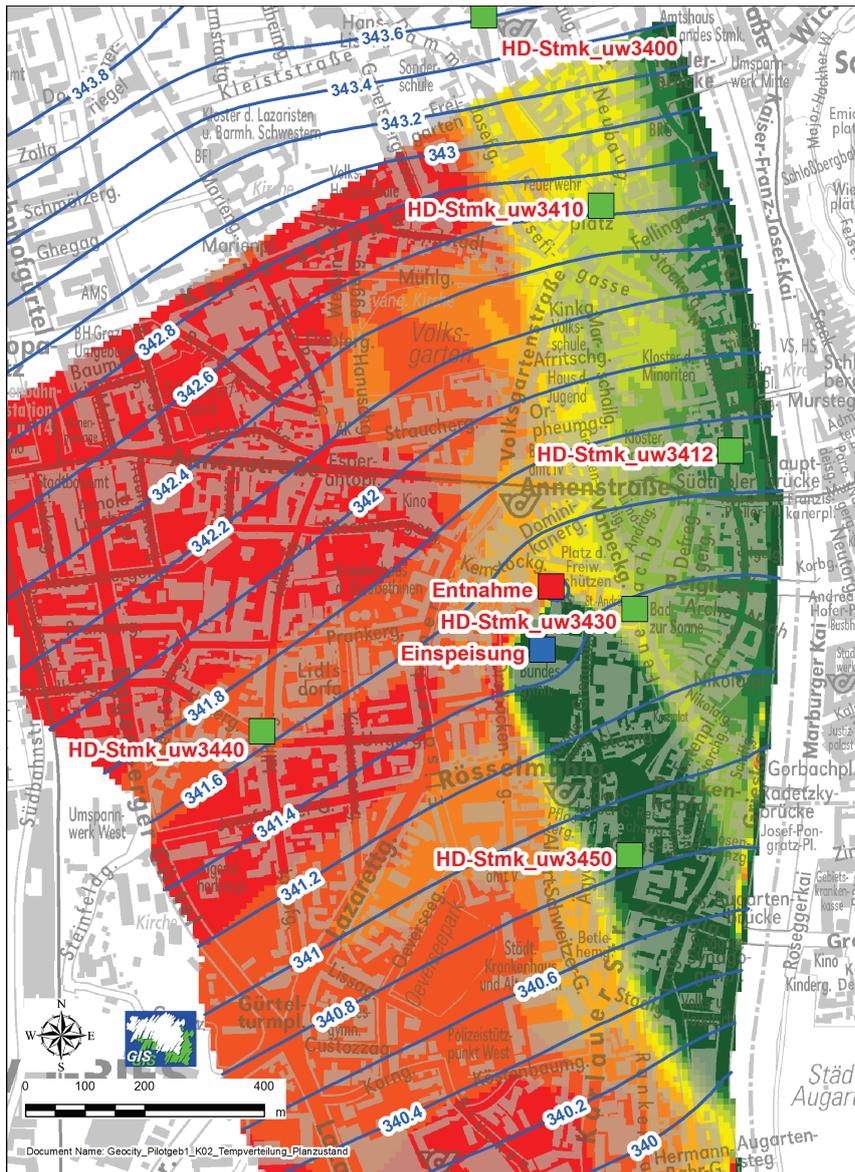


Abbildung 64: Innenstadt-West, Vergleich der gemessenen und simulierten Grundwassertemperaturen



**Manage Geocity
 Pilotgebiet 1:
 Innenstadt West
 GWM Grazer Feld
 Temperaturverteilung Q50 mit
 Entnahme und Einspeisung
 Zeitraum 2003-2013**

Bearbeitung:
 T. Harum & A. Dalla-Via
 JOANNEUM RESEARCH
 Institut für Wasser, Energie
 und Nachhaltigkeit
 Forschungsgruppe
 Wasserressourcen
 und Umweltanalytik



Legende:

- Einspeisung
- Entnahme
- Messstellen
- GWSP-Iso_V07s_Q50

PTI_V07s_Q50_Temp - Plan

- 9.04 - 11°C
- 11.01 - 12
- 12.01 - 12.5
- 12.51 - 13
- 13.01 - 13.5
- 13.51 - 14
- 14.01 - 14.25
- 14.26 - 14.5
- 14.51 - 14.75
- 14.76 - 15
- 15.01 - 15.14°C

Abbildung 65: Innenstadt-West, Temperaturverteilung bei Entnahme und Einspeisung

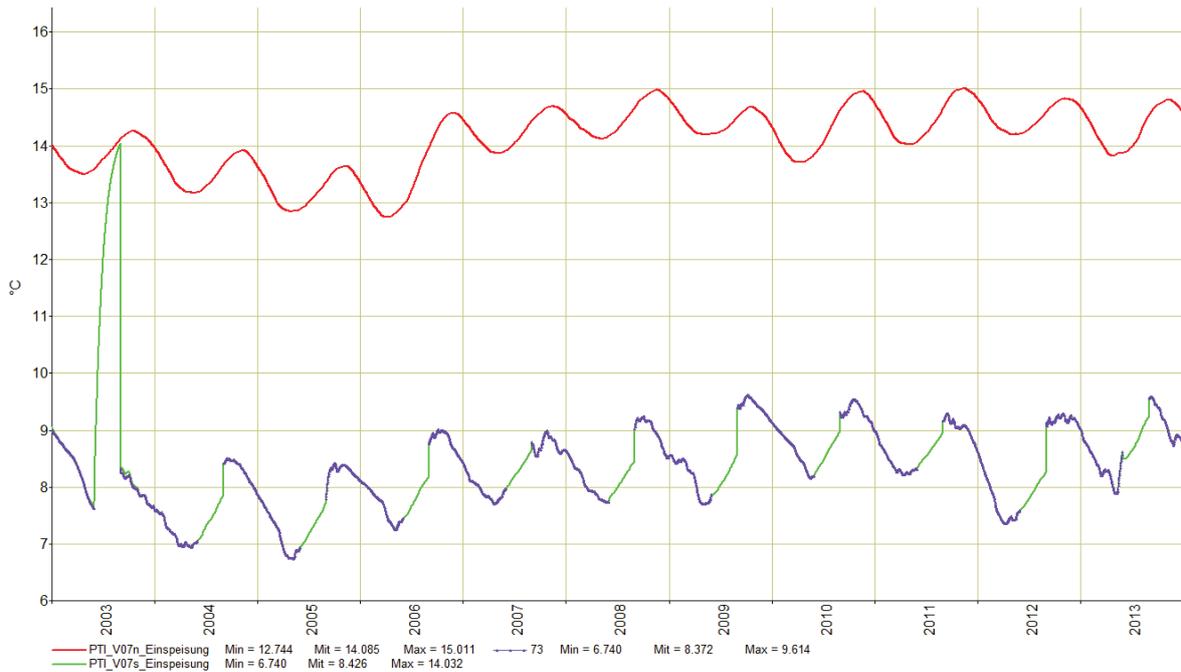


Abbildung 66: Innenstadt-West, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung

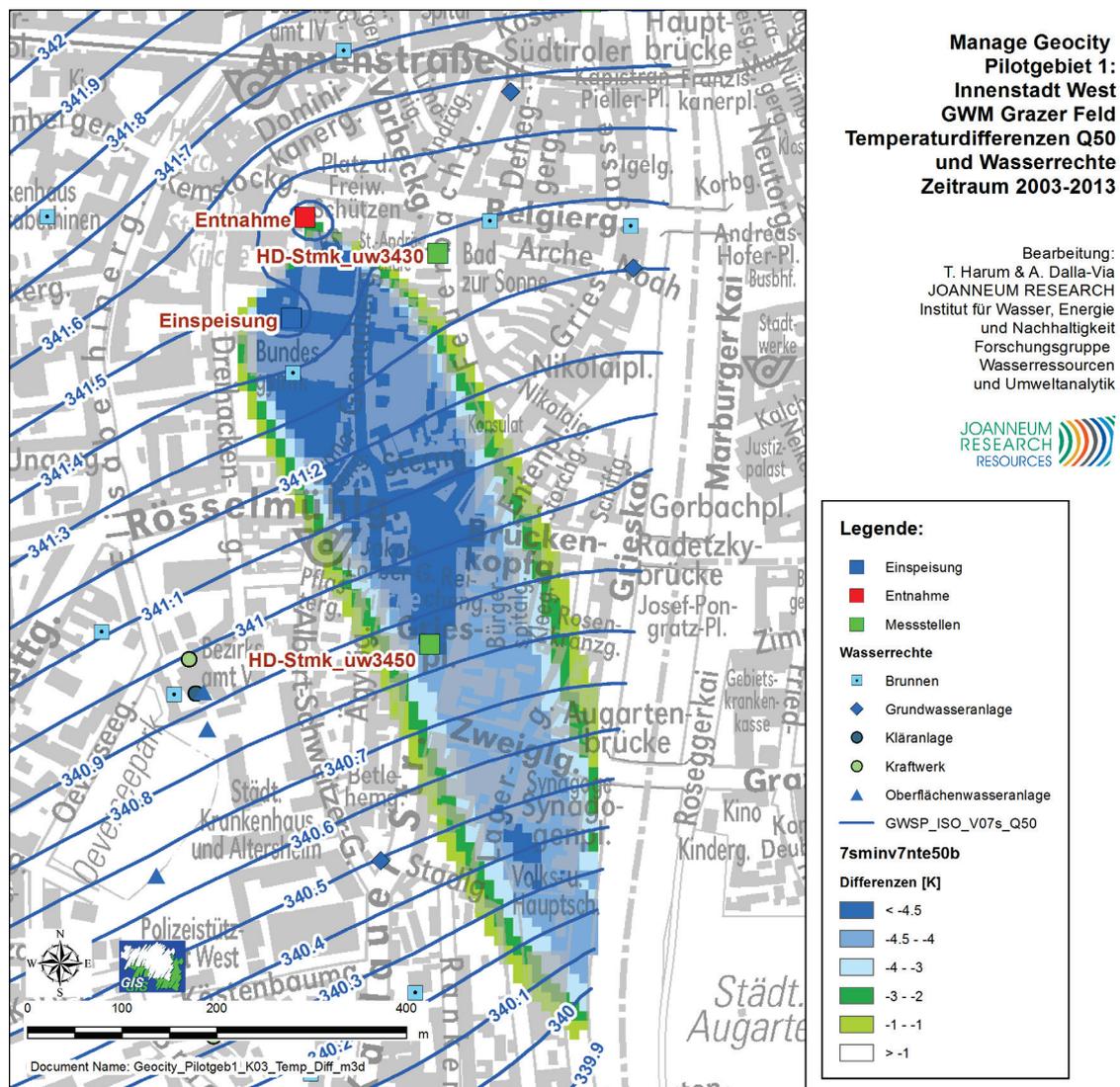


Abbildung 67: Innenstadt-West, Temperaturdifferenzen bei Entnahme und Einspeisung

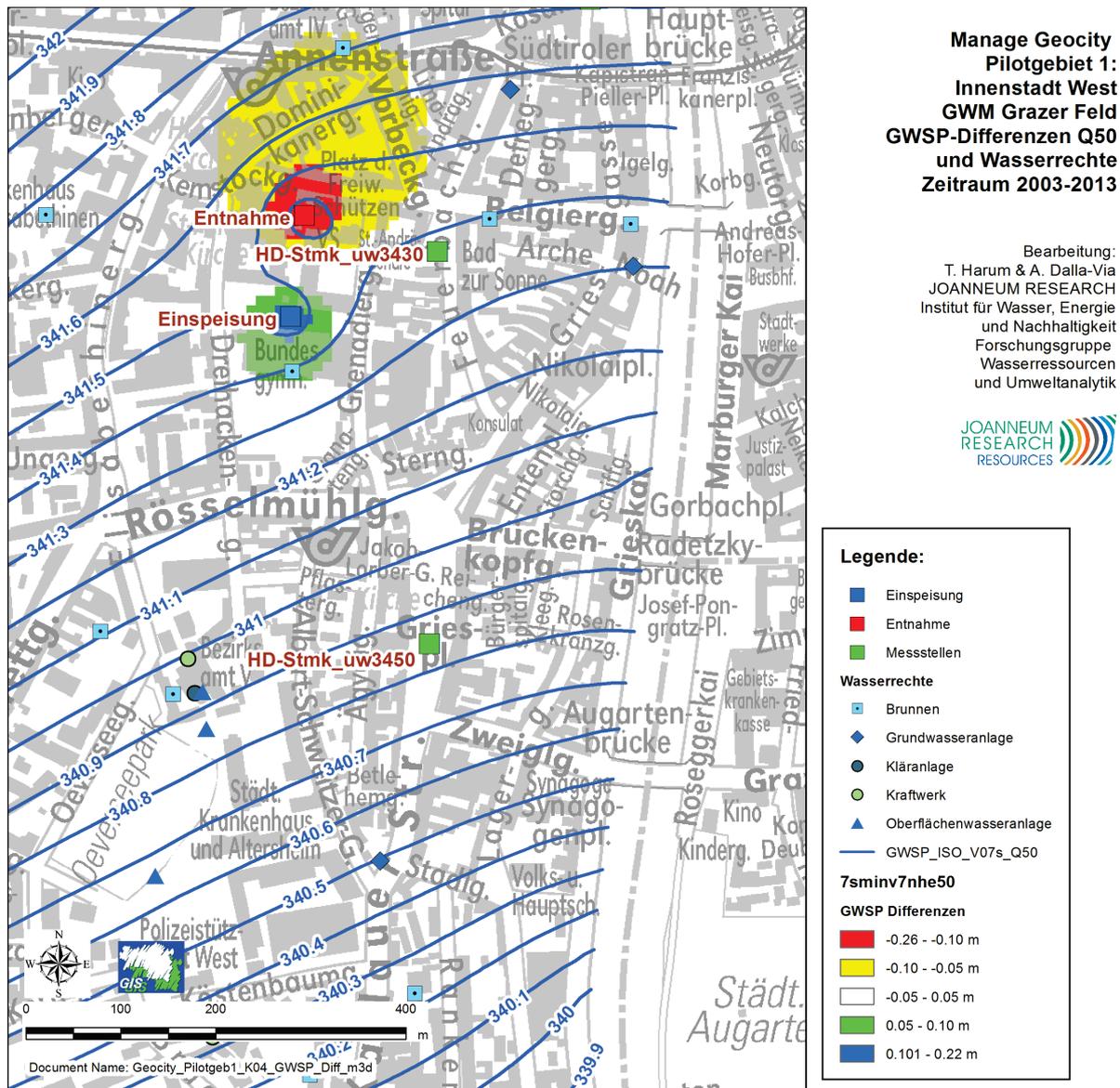


Abbildung 68: Innenstadt-West, Absenkung und Aufhöhung des Grundwasserspiegels

2.3.1.4 Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf die Grundwasserqualität

Die Dynamik hydrogeochemischer und biologischer Prozesse im Grundwasser wird maßgeblich durch die Temperatur beeinflusst. Temperaturveränderungen können außerdem signifikant die Interaktion Grundwasser mit den mineralischen und organischen Bestandteilen des Sedimentes verändern. Diese Veränderungen betreffen einerseits eine Verschiebung thermodynamischer Gleichgewichte bei Lösungs- und Fällungsprozessen und andererseits auch mikrobiologisch katalysierte Redoxprozesse im Aquifer. So kann es beispielsweise bei der Wiedereinleitung eines erwärmten Grundwassers zur verstärkten Ausfällung von Karbonaten (Griffioen & Appelo, 1993) bzw. auch zu einer erhöhten Auflösung von Silkatmineralien (Arning et al., 2006) kommen. Ebenso ist es möglich, dass es eine Erwärmung des Grundwassers zur erhöhten Freisetzung organischer Substanz aus dem Sediment (Brons et al., 1991) oder zu sauerstoffzehrenden Prozessen (Stumm & Morgan, 1995) führt. Wesentliche biologische Auswirkungen sind mikrobiologisch katalysierte Fouling-, Scaling-, und Ausfällungsprozesse

sowie die Vermehrung von pathogenen Mikroorganismen und in der Diversität und Zusammensetzung von Bakteriengemeinschaften im Aquifer (Brielmann et al., 2011).

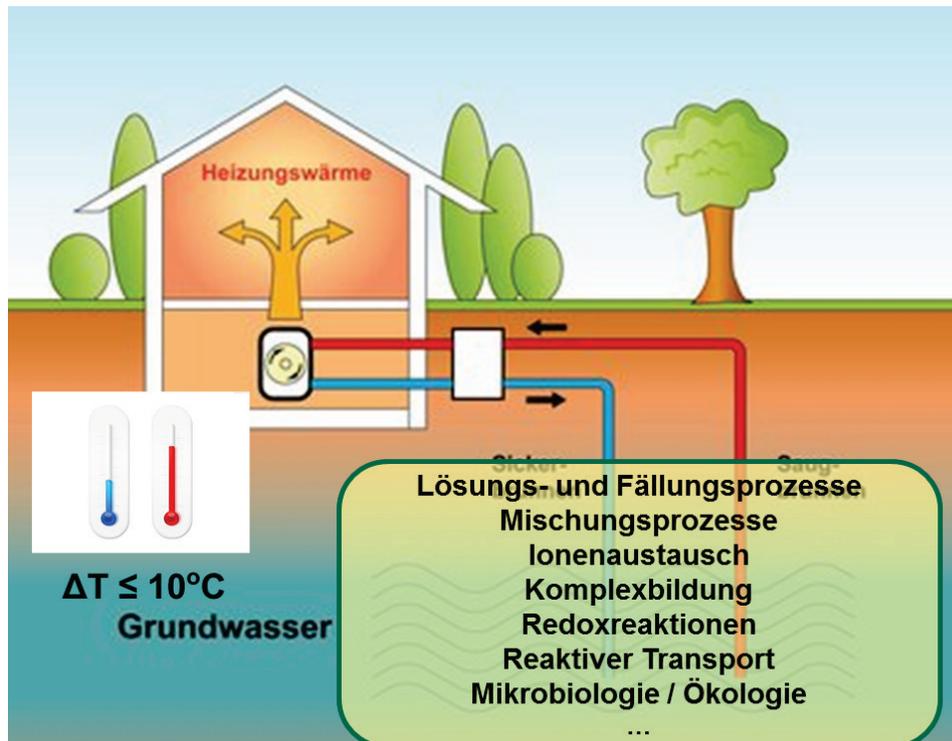


Abbildung 69: Prozesse im Grundwasser die durch Temperaturveränderungen maßgeblich beeinflusst werden

Mit Hilfe hydrochemischer Modellprogramme ist es möglich, Veränderungen hydrochemischer Gleichgewichte und den Verlauf reaktiver Prozesse im Grundwasser numerisch nachzuvollziehen und nach entsprechender Kalibration der Modelle auf der Grundlage experimenteller Daten auch zu simulieren. Ein geeigneter Programmcode für die Modellierung hydrogeochemischer Prozesse ist das Programm PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999). Das Programm PHREEQC ist ein USGS entwickeltes Softwarepaket welches frei zur Verfügung steht und mit dem auf der Basis unterschiedlicher thermodynamischer Datenbanken eine Vielzahl hydrogeochemischer wie z.B. Lösungs- und Fällungsprozesse, Redoxreaktionen, die Mischung von Wasser, Reaktionsverläufe kinetisch kontrollierter Reaktionen und Transportvorgänge unter Berücksichtigung von unterschiedlichen thermodynamischen Randbedingungen wie. z.B. Temperaturveränderungen modelliert werden können. Das Programm kann aufgrund seiner Struktur variabel an verschiedenste hydrochemische Fragestellungen angepasst werden.

Im gegenständlichen Projekt wurde am Beispiel der Grundwassermessstelle GZÜV_60104012 einerseits der Einfluss von Temperaturveränderungen auf mögliche kritische hydrochemische Prozesse identifiziert, die sich nachteilig auf die Grundwasserqualität bzw. auch den Betrieb der geothermischen Anlagen auswirken können. Ein solcher Prozess ist die Abscheidung von karbonatischen Mineralphasen beispielsweise bei Überschreitung der Sättigungsindizes von Calcit oder Aragonit. Die bei Übersättigung dieser Mineralphasen möglichen Ausfällungsprozesse können einerseits negativ auf die Durchlässigkeit des Aquifers auswirken und andererseits zu Problemen in der Anlage selbst

führen. Simuliert wurden die zu erwartenden Änderungen der Sättigungsindizes von Calcit oder Aragonit für eine Erwärmung (Abbildung 70a) bzw. Abkühlung um 5°C (Abbildung 70b).

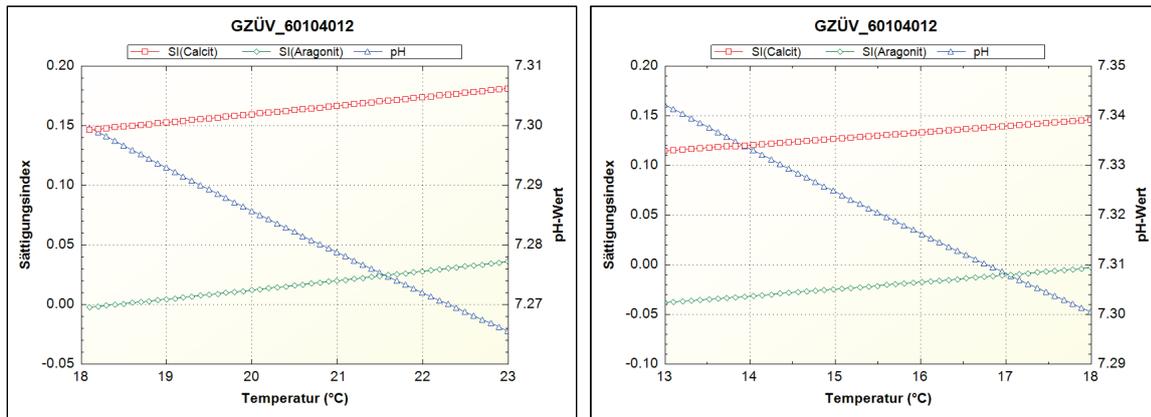


Abbildung 70a und b: Simulierte Veränderung der Sättigungsindizes von Calcit und Aragonit und des pH-Wertes bei (a) Erwärmung und Abkühlung (b) um 5°C

Eine Gegenüberstellung der, in der Simulation ermittelten Änderungen der Sättigungsindizes von Calcit und Aragonit mit den berechneten Werten auf der Grundlage der im Zeitraum von 1992 – 2014 gemessenen natürlichen Schwankungen physikochemischer Parameter (Abbildung 71) zeigt, dass im einem Temperaturbereich von $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$ die natürliche Variabilität deutlich größer ist, als die infolge Erwärmung bzw. Abkühlung um 5°C zu erwartenden Veränderungen.

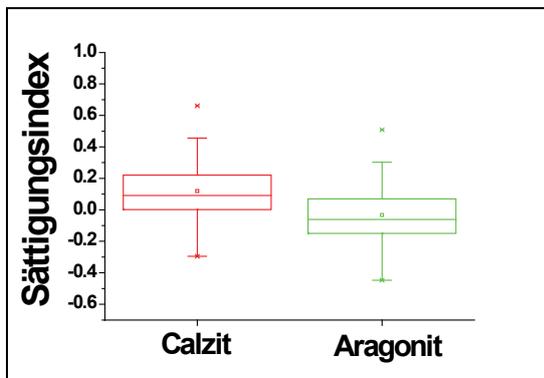


Abbildung 71: Gemessene natürliche Schwankungen der Sättigungsindizes von Calcit und Aragonit im Zeitraum von 1992 – 2014.

Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt auch eine Studie bei der ein Porengrundwasserleiter in der Nähe der bayrischen Stadt Freising untersucht wurde (Brielmann et al., 2009).

Mikrobiologische Aspekte von Temperaturveränderungen wurden in der gegenständlichen Studie nicht untersucht. Es sollte jedoch angemerkt werden, dass Grundwasserleiter komplexe Ökosysteme und Lebensraum für vielfältige Organismengemeinschaften darstellen, die überall im Untergrund in teilweise in hoher Individuendichte anwesend sind und maßgeblich an den Stoffkreisläufen im Aquifer beteiligt sind. Die im Grundwasser vorkommenden Mikroorganismen (Abbildung 72) sind vor allem psychrophil (kälteliebend, Wachstumsoptima zwischen 10 und 20 °C) und mesophil (Wachstumsoptima zwischen 20 und 40 °C).

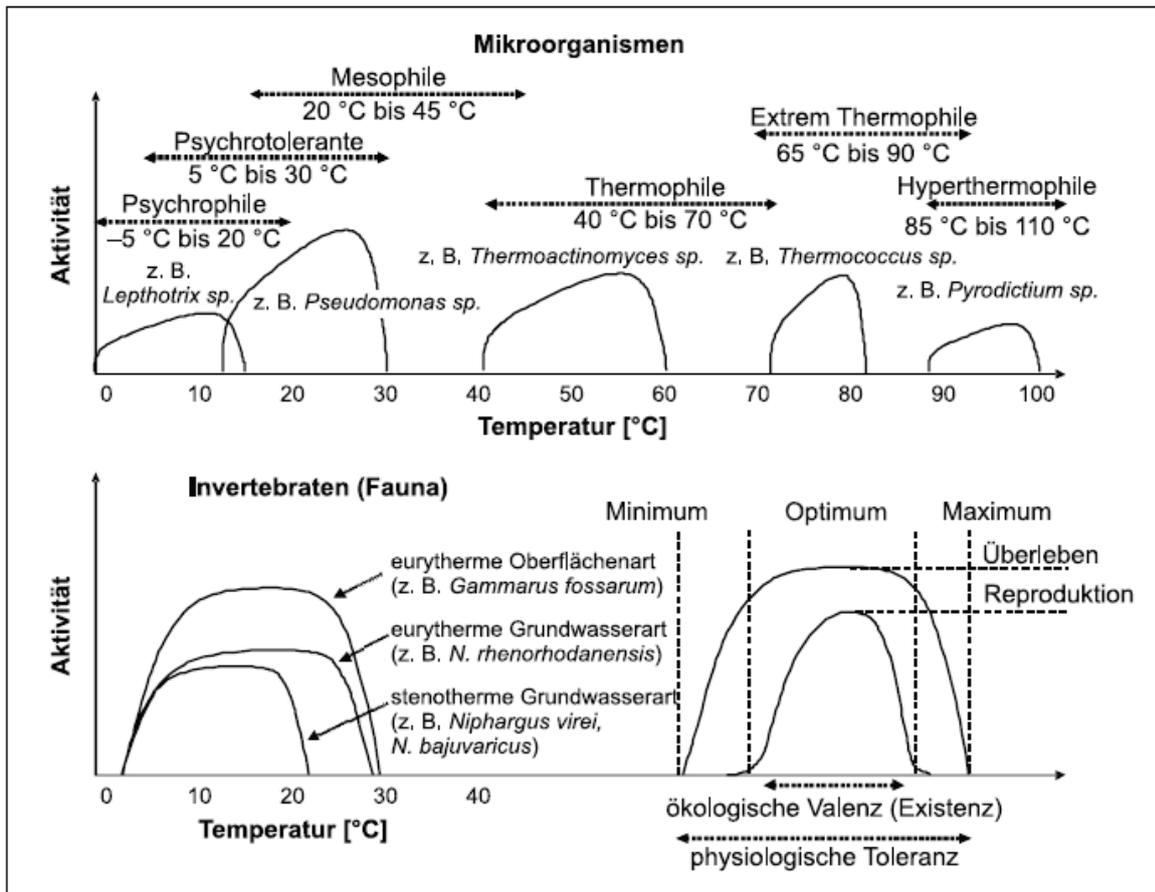


Abbildung 72: Anpassung von Mikroflora und Meiofauna an verschiedene Temperaturbereiche (nach Brielmann et al., 2009).

Dies bedeutet, dass natürliche Grundwassertemperatur (etwa 10–12 °C) optimale Wachstumsbedingungen für psychrophile und psychrotolerante Mikroorganismen darstellt, während eine Temperaturerhöhung auf 15 bis 20 °C bereits das Wachstum mesophiler Arten fördert. Relativ sensitiv auf Temperaturerhöhungen über 20°C reagiert die Grundwasserfauna. Allerdings gibt es bisher bei moderaten Temperaturveränderungen (Temperaturspanne von $\pm 6K$) keine gesicherten Hinweise, dass eine lokale thermische Nutzung zu wesentlichen Störungen in unbelasteten Grundwasserökosystemen führt (Brielmann et al., 2009).

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten hydrochemischen Modellierungen haben außerdem gezeigt, dass Temperaturschwankungen im Bereich von $\Delta T \leq 10^\circ C$ nur sehr geringfügige Veränderungen in der Hydrochemie bewirken. Dies geht auch aus anderen vergleichbaren Studien (z.B. Possemiers et al., 2014) hervor. Allerdings sollte die maximal genehmigte Temperaturspanne immer auf den physikalisch, chemischen und biologischen Zustand des jeweiligen Grundwasserleiters abgestimmt sein.

2.3.2 Fallbeispiel „Hafnerstraße“

2.3.2.1 Ökologische Bewertung

Für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt „1.3.5 Ökologische Bewertung“ zur Methodik) in der Treibhausgasemissionen und der kumulierter Energieaufwand bestimmt wurden. Die Ergebnisse beziehen sich auf 1 MWh Wärme für Heizen und Warmwasser (z.B. kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW}). Die Heizenergie wird durch ein Erdwärmesondenfeld in Kombination mit einer zentralen Wärmepumpe bereitgestellt. Der Warmwasserbedarf wird über eine Solaranlage gedeckt, die auch für die Einspeisung von überschüssiger Wärme im Sommer in den Untergrund genützt wird. Für die Erzeugung des von der Wärmepumpe benötigten Stroms werden zwei Varianten betrachtet: (1) der österreichische Strommix (Strommix AT) und (2) die Stromerzeugung in einem Erdgas Gas- und Dampfkraftwerk (Erdgas GuD). Der Wärmeenergieerzeugung aus oberflächennaher Geothermie wird die Wärmeenergieerzeugung aus bestehenden Gas- und Ölkesseln gegenübergestellt.

In Abbildung 73 sind die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die Treibhausgas-Emissionen dargestellt. Wird der Strombedarf der Wärmepumpe und anderer Pumpen (Verteilpumpe, Solarpumpe) aus dem österreichischen Strommix, mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energieträgern (89% lt. Stromkennzeichnungsbericht 2015 der E-Control) gedeckt, betragen die Treibhausgas-Emissionen ca. 66 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW}. Im Vergleich zu einem bestehenden Erdgaskessel mit ca. 336 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW} ist das eine Reduktion von 80%. Im Vergleich zu einem bestehenden Ölkessel werden die Treibhausgas-Emissionen um 85% reduziert. Wird der benötigte Strom in einem Erdgas-GuD-Kraftwerk erzeugt, dann erhöhen sich die Treibhausgas-Emissionen für das geothermische Heizsystem auf ca. 228 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW}. Die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu einem bestehenden Erdgaskessel bzw. Ölkessel beträgt ca. 47%. Bei der Art der Treibhausgas-Emissionen stammen bei den Varianten mit Erdwärmesondenfeld und Wärmepumpe ca. 9 kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW} aus der Gruppe der FKW, FCKW, HFCKW und CKW. Diese stammen Großteils aus Kältemittelverlusten bei der Produktion, Betrieb⁴ und Entsorgung der Wärmepumpe. Bei „Erdwärmesondenfeld mit Wärmepumpe (Strom aus Erdgas GuD)“ machen CH₄-Emissionen ca. 10% und beim „Erdgaskessel“ ca. 17% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus. Diese stammen aus Verlusten bei der Erdgasförderung und -transport und zu einem kleineren Anteil aus der unvollständigen Verbrennung von Erdgas (CH₄-Schlupf). Abbildung 74 zeigt die Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für die Varianten mit Erdwärmesondenfeld und Wärmepumpe auf die Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase. Diese Aufteilung wird wesentlich durch die Art der Strombereitstellung beeinflusst. Stammt der Strom aus dem österreichischen Strommix fallen ca. 29% der Treibhausgas-Emissionen bei der Errichtung und ca. 67% im Betrieb an. Wird der

⁴ Kältemittelverluste im Betrieb und bei der Entsorgung wurden mit 2% angenommen. Kältemittelverluste für die Errichtung wurden aus ecoinvent (2016) übernommen.

Strom in einem Erdgas GuD erzeugt, macht die Betriebsphase 90% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus.

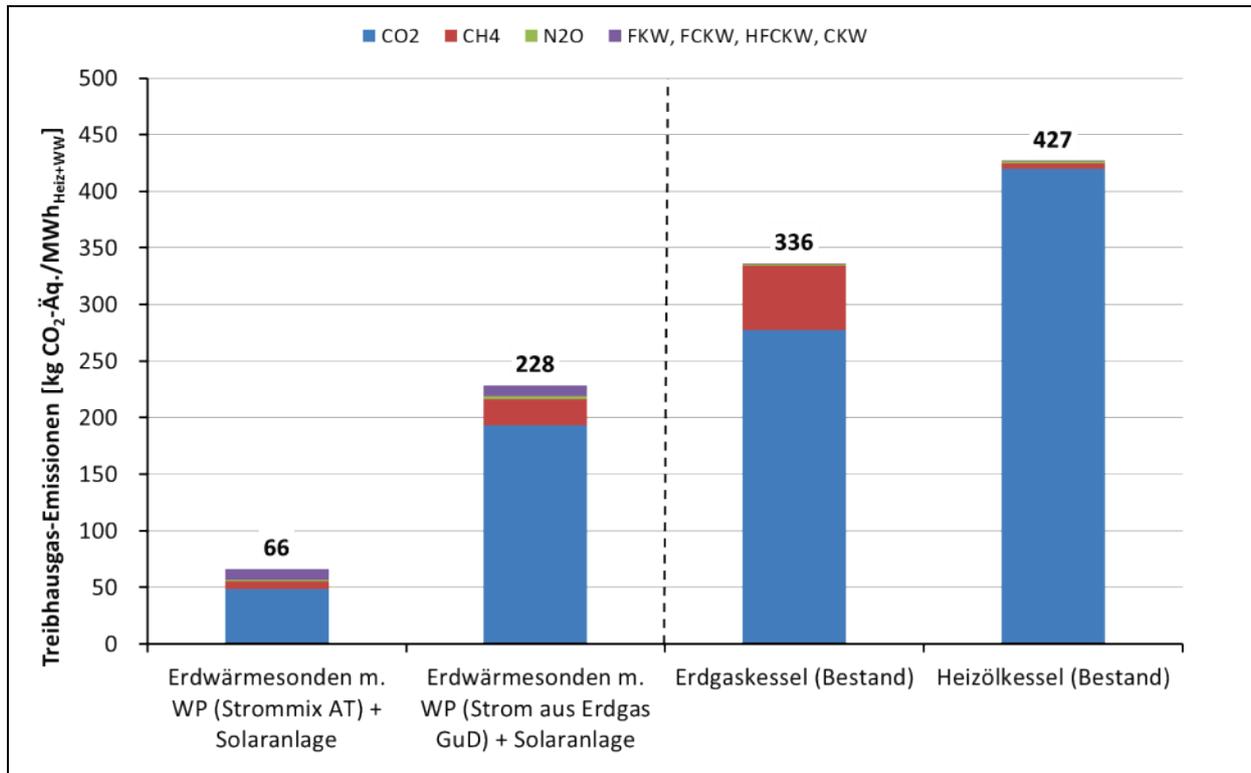


Abbildung 73: Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

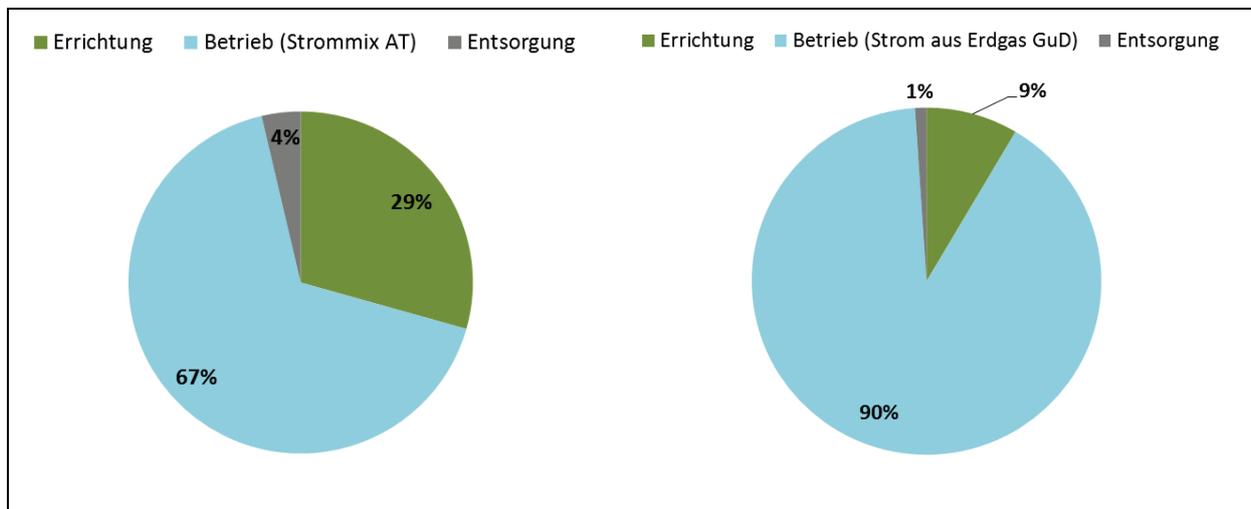


Abbildung 74: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesondenfeld mit Wärmepumpe und Solaranlage in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für den kumulierten Energieaufwand des Fallbeispiels Hafnerstraße sind in [Abbildung 75](#) dargestellt. Der fossile Anteil des kumulierten Energieaufwands ist bei den Systemen mit Erdwärmesondenfeld und Wärmepumpe geringer als beim Erdgaskessel und Heizölkessel. Die höchste Reduktion erzielt die Variante mit dem

österreichischen Strommix (Strommix AT): im Vergleich zum Erdgaskessel wird eine fossile Energieeinsparung von 70% und im Vergleich zum Ölkessel von 80% erreicht. Stammt der Strom aus einem Erdgas GuD ist die Einsparung geringer: im Vergleich zum Erdgaskessel beträgt sie 20%, im Vergleich zum Heizölkessel 40%. Der gesamte kumulierte Energieaufwand des Systems „Erdwärmesondenfeld mit Wärmepumpe (Strommix AT)“ ist in etwa gleich hoch wie beim Erdgaskessel und um 0,6 kWh/kWh_{Heiz+WW} geringer als beim Ölkessel. Stammt der Strom aus einem Erdgas GuD ist der gesamte kumulierte Energieaufwand des Systems mit Erdwärmesondenfeld und Wärmepumpe um 0,3 kWh/kWh_{Heiz+WW} höher als beim Erdgaskessel und etwas niedriger im Vergleich zum Heizölkessel.

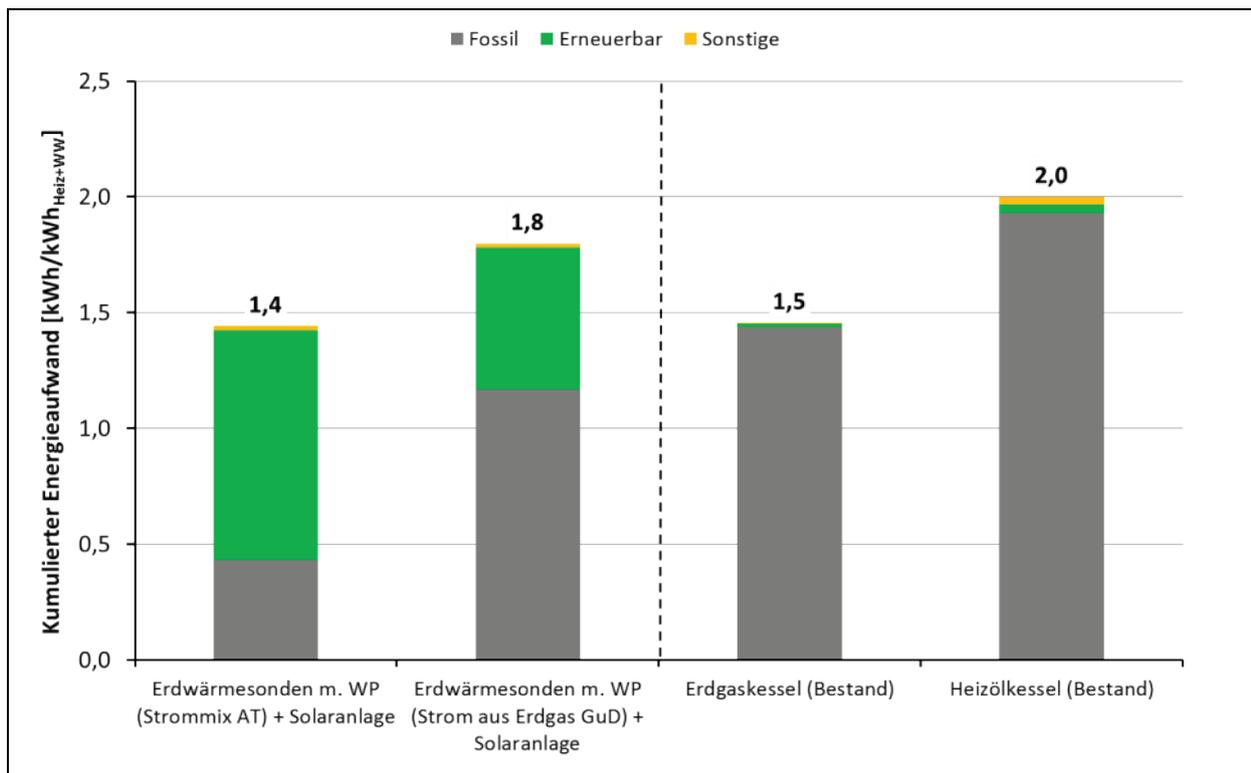


Abbildung 75: Kumulierter Energieaufwand für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

2.3.2.2 Ökonomische Bewertung

Ausgehend von der verwendeten Methodik (siehe 1.3.6) und vom Energieversorgungskonzept (siehe 2.2.3.3) werden die Investitionskosten in die Bereiche Erdwärmesonden (Erdwärmesonden, Leitungen, Pumpe etc.), Wärmepumpe (1 Wärmepumpe mit 550 kW Heizleistung), Solaranlage mit Speicher (1.200 m² Solarkollektoren, Leitungen, Speicher etc.) und Wärmeverteilung (Fernwärmerohre, Grabungen, Armaturen, Regelung etc.) eingeteilt. Diese Investitionskosten sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

Tabelle 29: Grunddaten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Erdwärmesonden (EWS)	407.000	€
Wärmepumpe	165.000	€
Solaranlage mit Speicher	396.000	€
Wärmeverteilung	184.000	€
Gesamtkosten	1.152.000	€

Damit errechnen sich Jahreskosten von etwa 106.800 € und spezifische Wärmegehungskosten von 106,0 €/MWh. Die Aufteilungen auf die Kostenanteile und auf die Investitionsbereiche sind in Abbildung 76 und Abbildung 77 dargestellt. Die großen Anteile entfallen auf die Annuität bedingt durch die hohen Investitionskosten (Erdwärmesonden, Solaranlage mit Speicher etc.). Die anteiligen Jahreskosten sind etwa gleich hoch für die Bereiche Erdwärmesonden und Solaranlage mit Speicher. Etwas höher ist der Anteil für die Wärmepumpe (bedingt durch eine niedrige Jahresarbeitszahl).

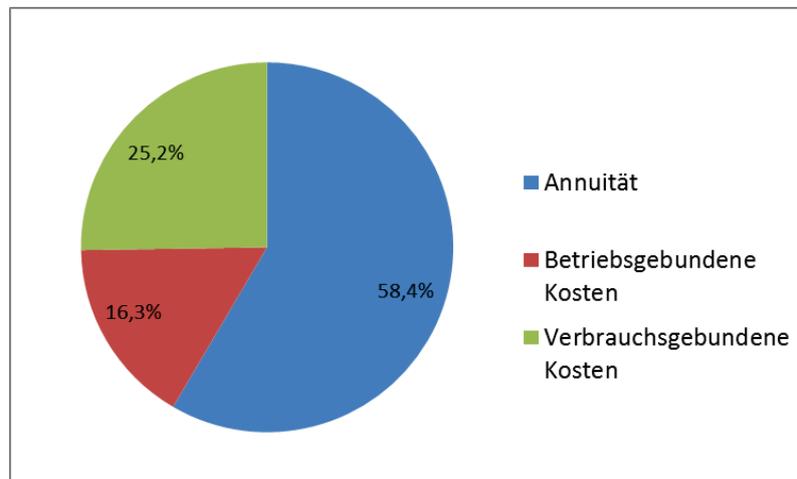


Abbildung 76: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

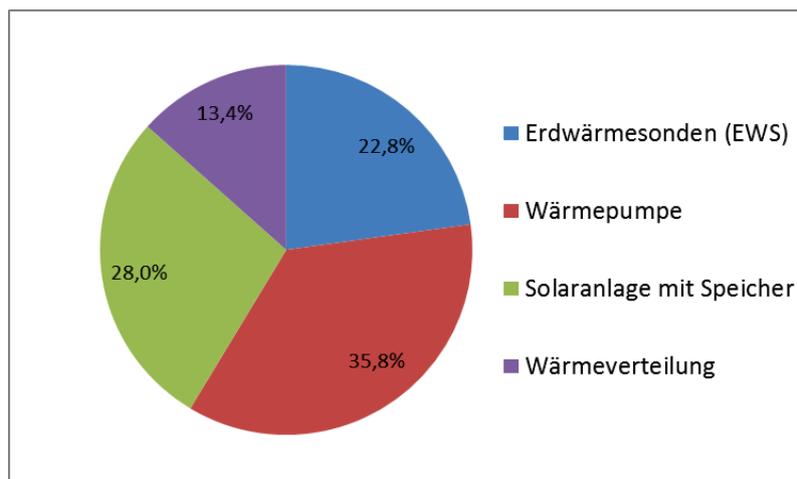


Abbildung 77: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Für unterschiedliche Annahmen für die Größe der Solaranlage mit Speicher bzw. das Weglassen der Solaranlage (Nutzung anderer Wärmequellen) und des Fernwärmenetzes (Annahme: es gibt bereits eine Fernwärmeversorgung) ergeben sich die in Tabelle 30

zusammengefassten Werte für Investitions- und Jahreskosten sowie für die spezifischen Wärmegestehungskosten.

Tabelle 30: Investitionskosten und Ergebnisse bei unterschiedlichen Annahmen für das Energieversorgungskonzept für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Energieversorgungs-konzept	Investitions-kosten [€]	Jahreskosten [€/a]	Spez. Wärmegestehungs-kosten [€/MWh]
Variante Solar 600 m ²	892.000	87.500	86,9
Variante ohne Solar	756.000	76.900	76,3
Variante Solar 600 m ² ohne Wärmeverteilung	672.000	70.600	70,1

Eine Reduzierung der Solaranlage könnte überlegt werden, wenn die verbleibende Fläche für die Regeneration der Erdwärmesonden ausreichend ist. Diese Fläche kann im Rahmen einer Optimierung des Energieversorgungskonzeptes ermittelt werden. Sollte für die Regeneration der Erdwärmesonden Gratis-Wärme (z.B. Abwärme aus Industrie) zur Verfügung stehen, dann könnte auf eine Solaranlage verzichtet und die spezifischen Wärmegestehungskosten signifikant reduziert werden. Sollte es möglich sein bei reduzierter Fläche der Solaranlage in eine bestehende zentrale Wärmeversorgung für ein Gebiet einzuspeisen, dann reduzieren sich die spezifischen Wärmegestehungskosten nochmals, da die Investitionskosten für die Wärmeverteilung wegfallen würden.

2.3.2.3 Auswirkungen der geothermischen Nutzung auf den Untergrund

Die Beurteilung der Standortes Hafnerstraße, welcher mit einer Anlage zur Nutzung von Erdwärme mit Wärmespeicherung im Untergrund ausgestattet werden könnte, erfolgte auf Basis einer Simulation des Wärmehaushaltes des Untergrundes.

Die Nutzung von Erdwärme mittels Erdwärmesonden wird maßgeblich durch die thermischen Standorteigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmespeicherkapazität) bestimmt. Die geringen Wärmeflusswerte aus dem Untergrund an die Erdoberfläche führen in vielen Fällen zu einer langfristigen Abkühlung des Untergrundes, wenn dieser ausschließlich für den Heizbetrieb geothermisch genutzt wird.

Aus diesem Grund ist eine saisonale Speicherung von Wärme anzustreben. Die Wärmehaushaltsberechnungen sind nur mehr mit 3D-Simulationen machbar. Die Simulation erfolgte im Projekt Manage_GeoCity mit dem Programm FEFLOW.

Abbildung 78 stellt das Simulationsgrid dar, welches den Untergrund in Finite Elemente unterteilt und die 3D-Instationär-Berechnung ermöglicht.

Finite-Elemente-Netz

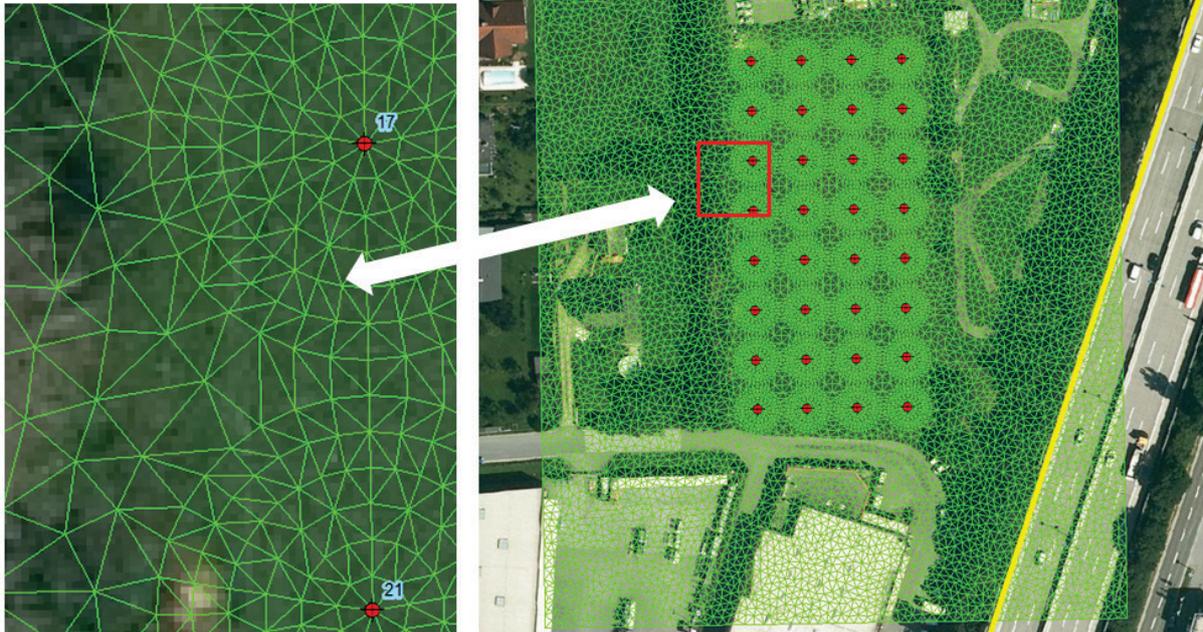


Abbildung 78: FEFLOW-Umsetzung des Erdwärmesondenfeldes für 3D-Simulation

Für die Ergebnisanalyse wurden im Untergrund Beobachtungspunkte definiert, die eine systematische Bewertung der Temperaturentwicklung im Untergrund über die gesamte Nutzungsdauer einer Erdwärmesondenanlage ermöglichen.

In Abbildung 79 ist die Systematik dieser Beobachtungspunkte dargestellt. Grundsätzliches Ziel der systematischen Analyse der Simulationsergebnisse ist die Darstellung der zeitlichen und räumlichen Temperaturentwicklungen im gesamten Modelluntergrund. Mit Beobachtungspunkten in verschiedenen Entfernungen vom Erdwärmesondenfeld und in verschiedenen Tiefen ist diese räumliche Analyse sehr gut durchführbar.

Abbildung 80 zeigt ein Beispiel dieser systematischen Auswertung. Dieses Beispiel zeigt die langfristige Abkühlung in den in Abbildung 79 dargestellten Beobachtungspunkten.

Ähnlich den in Abbildung 80 dargestellten Temperaturentwicklungen wurden diese im gesamten Modellraum berechnet.

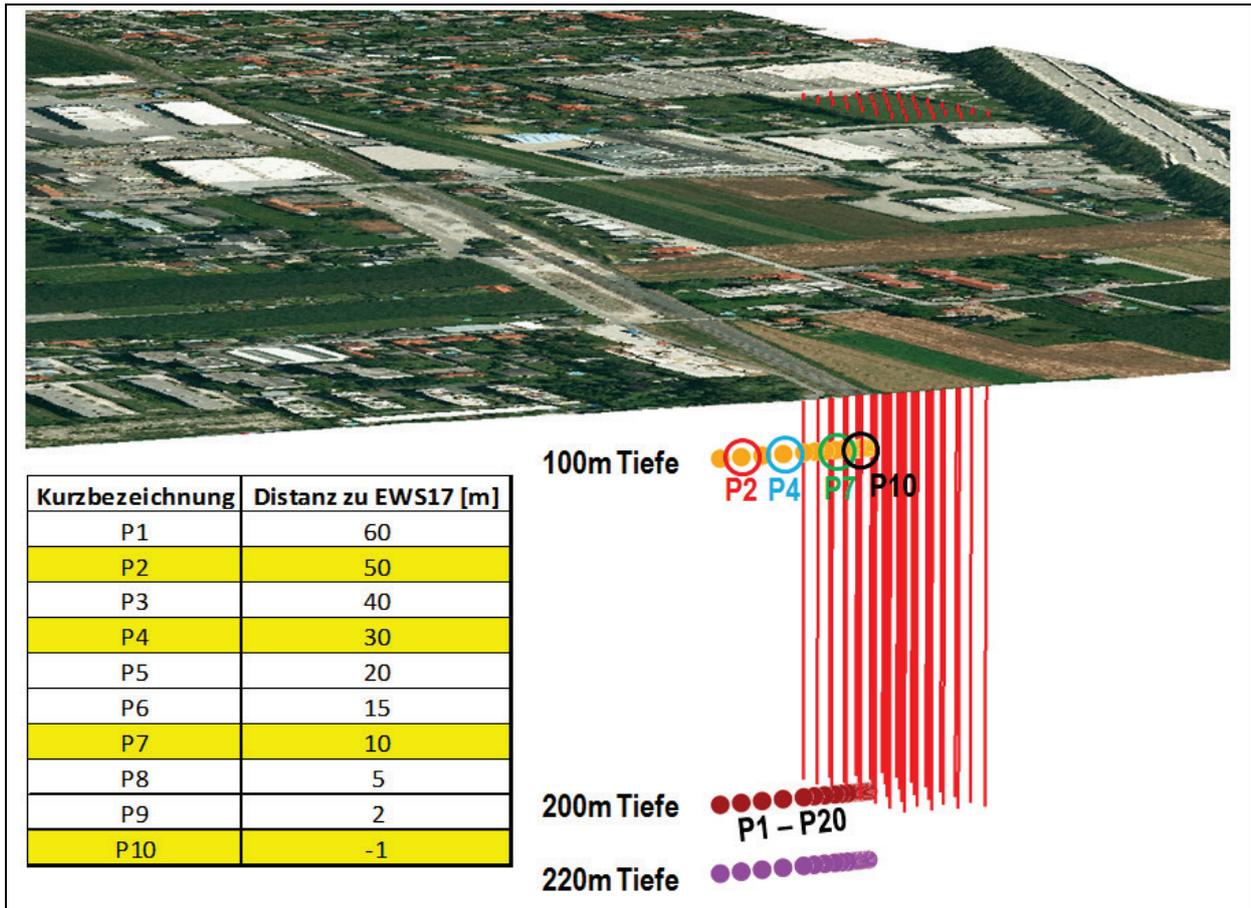


Abbildung 79: Übersicht des Erdwärmesondenfeldes und der Beobachtungspunkte der Simulation

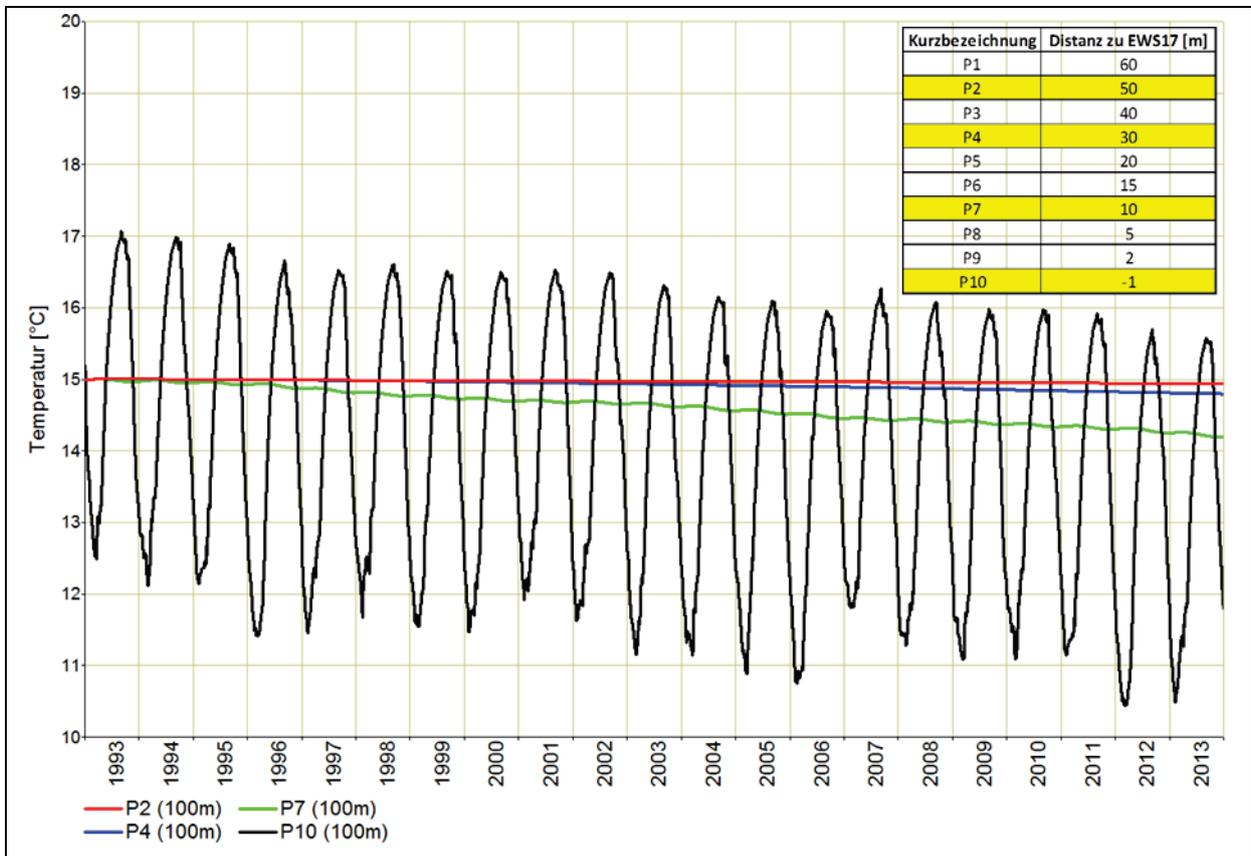


Abbildung 80: Simulierter Temperaturverlauf von Beobachtungspunkten in 100m Tiefe

Die thermische Nutzung des Untergrundes ohne Wasserentnahme führt zu einer Veränderung des Wärmehaushalts des Untergrundes.

Abbildung 81 stellt die räumliche Temperaturverteilung nach einer Nutzungszeit von 10 Jahren dar.

Das linke Beispiel in Abbildung 81 stellt das Erdwärmesondenfeld beim Standort Hafnerstraße nach einer Nutzungsdauer von 10 Jahren dar. Ohne thermische Regeneration kommt es unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu einer langsamen Abkühlung des Untergrundes im Bereich der Erdwärmesonden. Der kühle blaue Bereich visualisiert dies.

Das rechte Beispiel zeigt eine vergleichbare Nutzungssituation allerdings mit einer thermischen Regeneration des Untergrundes durch saisonale Speicherung von solarer Wärme. Der Abkühlungsbereich wird durch die Wärmespeicherung deutlich verändert und es kommt zu einer teilweisen Erwärmung bzw. eine deutlich geringeren Abkühlung des Untergrundes.

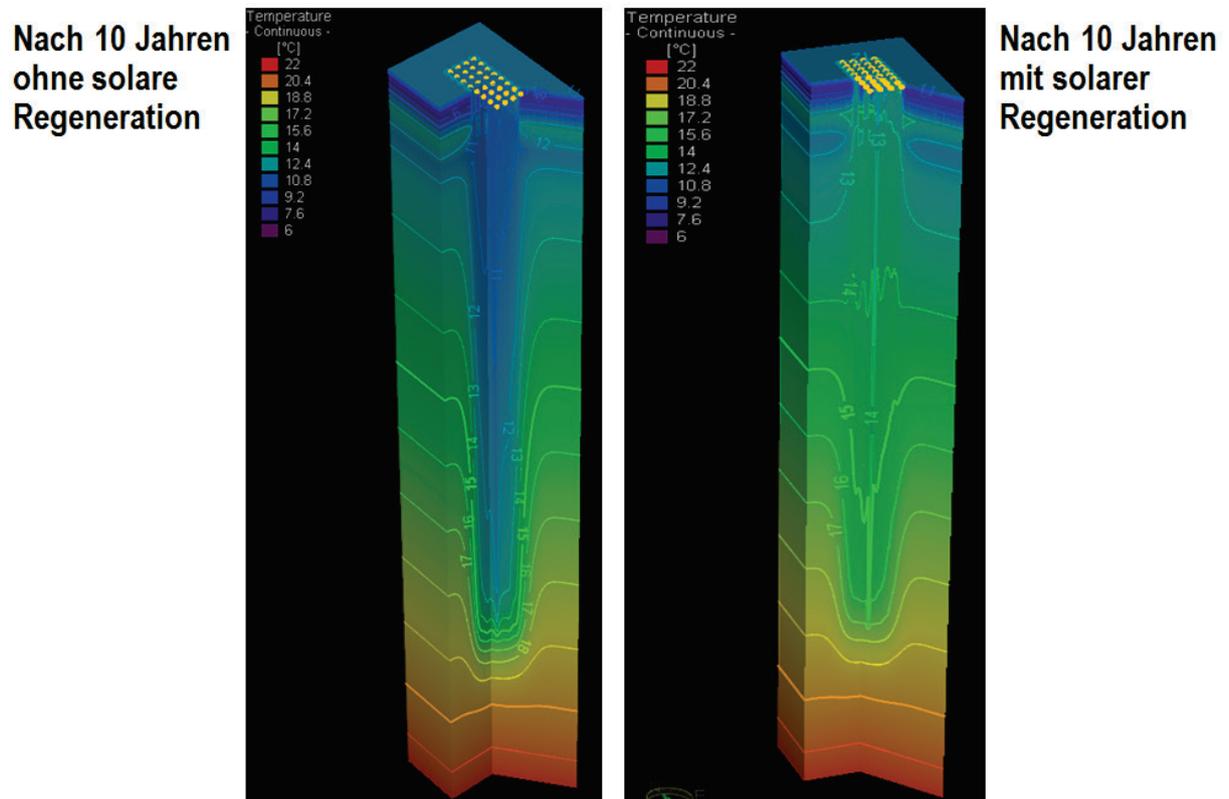


Abbildung 81: Temperaturverteilung im Untergrund nach 10 Jahren Nutzungsdauer – Vergleich mit saisonaler Regeneration und ohne Regeneration

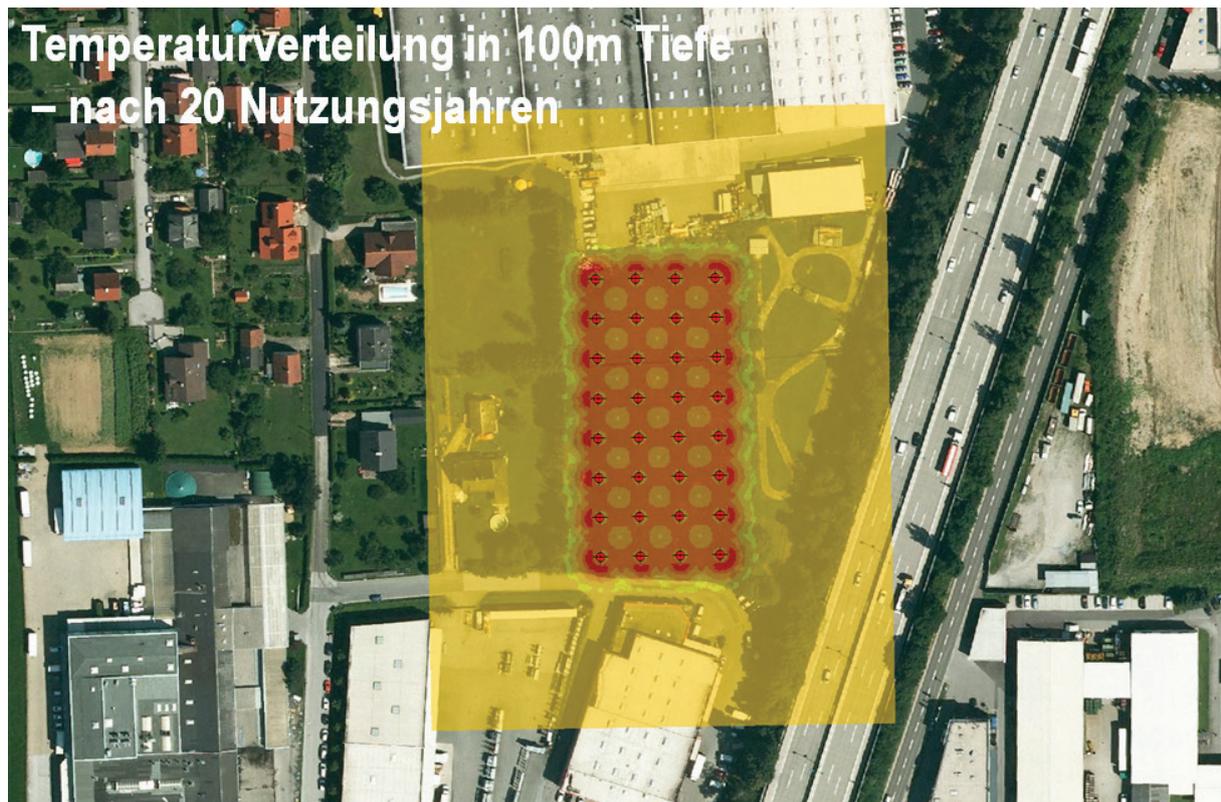


Abbildung 82: Änderung der Untergrundtemperaturen in 100m Tiefe

Folgende grundsätzliche Interpretationen sind aus den Simulationsergebnissen ableitbar:

- Die räumlichen Auswirkungen von Erdwärmesondenfeldern sind sehr begrenzt.
- In einer Entfernung von 50 m vom Erdwärmesondenfeld sind die Temperaturänderungen nicht mehr signifikant.
- Die Regeneration der Erdwärme mit solarer Wärme ist langfristig erforderlich und verbessert die Anlageneffizienz.
- Aufgrund der räumlich eng begrenzten Auswirkungen könnten in urbanen Bereichen eine Vielzahl von Erdwärmesondenfeldern ohne intensive negative Wechselwirkungen errichtet werden.
- Eine thermische Regeneration reduziert die räumlichen Wechselwirkungen noch zusätzlich und ist für eine nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden sehr wichtig.
- Die räumlichen Erfordernisse für die Errichtung von Erdwärmesondenfeldern sind in urbanen Umgebungen nicht immer gegeben.

2.3.3 Fallbeispiel „Olympiawiese“

2.3.3.1 Ökologische Bewertung

Für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt „1.3.5 Ökologische Bewertung“ zur Methodik) in der Treibhausgasemissionen und der kumulierter Energieaufwand bestimmt wurden. Die Ergebnisse beziehen sich auf 1 MWh Wärme für Heizen und Warmwasser (z.B. kg CO₂-Äq./MWh_{Heiz+WW}). Im Fallbeispiel wird die Versorgung von Neubauten mit Niedrigenergiesystemen untersucht. Die Wärme wird aus

grundwasserbürtiger Geothermie in Kombination mit einer Wärmepumpe pro Gebäude bereitgestellt. Für die Warmwasserbereitstellung wird eine elektrische Nachheizung in den einzelnen Wohnungen berücksichtigt. Für die Erzeugung des von den Wärmepumpen benötigten Stroms werden zwei Varianten betrachtet: (1) der österreichische Strommix (Strommix AT) und (2) die Stromerzeugung in einem Erdgas Gas- und Dampfkraftwerk (Erdgas GuD). Der Wärmeerzeugung aus grundwasserbürtiger Geothermie wird die Wärmeerzeugung mit Fernwärme gegenübergestellt.

In Abbildung 83 sind die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die Treibhausgas-Emissionen dargestellt. Wird der Strombedarf der Wärmepumpen und anderer Pumpen (Grundwasserpumpe, Verteilpumpe) aus dem österreichischen Strommix, mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energieträgern (89% lt. Stromkennzeichnungsbericht 2015 der E-Control) gedeckt, betragen die Treibhausgas-Emissionen $34 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./MWh}_{\text{Heiz+WW}}$. Im Vergleich zu Fernwärme mit ca. $208 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./MWh}_{\text{Heiz+WW}}$ ist das eine Reduktion von 84%. Wird der benötigte Strom in einem Erdgas-GuD-Kraftwerk erzeugt, dann erhöhen sich die Treibhausgas-Emissionen auf ca. $151 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./MWh}_{\text{Heiz+WW}}$. Im Vergleich zur Fernwärme ist das eine Treibhausgas-Reduktion von 28%. Bei der Art der Treibhausgas-Emissionen stammen bei den Varianten mit grundwasserbürtiger Geothermie ca. $4 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./MWh}_{\text{Heiz+WW}}$ aus der Gruppe der FKW, FCKW, HFCKW und CKW. Diese stammen Großteils aus Kältemittelverlusten bei der Produktion, Betrieb⁵ und Entsorgung der Wärmepumpe. Bei „grundwasserbürtige Geothermie (Strom aus Erdgas GuD)“ und „Fernwärme“ machen CH₄-Emissionen ca. 10% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus. Diese stammen bei „grundwasserbürtiger Geothermie (Strom aus Erdgas GuD)“ Großteils aus Verlusten bei der Erdgasförderung und -transport. Bei der Fernwärme stammen die CH₄-Emissionen Großteils aus CH₄-Verlusten bei der Kohleförderung und zu einem kleineren Teil aus der Erdgasförderung und -transport. Abbildung 84 zeigt die Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für die Varianten mit grundwasserbürtiger Geothermie auf die Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase. Diese Aufteilung wird durch die Art der Strombereitstellung beeinflusst. Stammt der Strom aus dem österreichischen Strommix fallen ca. 13% der Treibhausgas-Emissionen bei der Errichtung und ca. 87% im Betrieb an. Wird der Strom in einem Erdgas GuD erzeugt, macht die Betriebsphase 97% der gesamten Treibhausgas-Emissionen aus.

⁵ Kältemittelverluste im Betrieb und bei der Entsorgung wurden mit 2% angenommen. Kältemittelverluste für die Errichtung wurden aus ecoinvent (2016) übernommen.

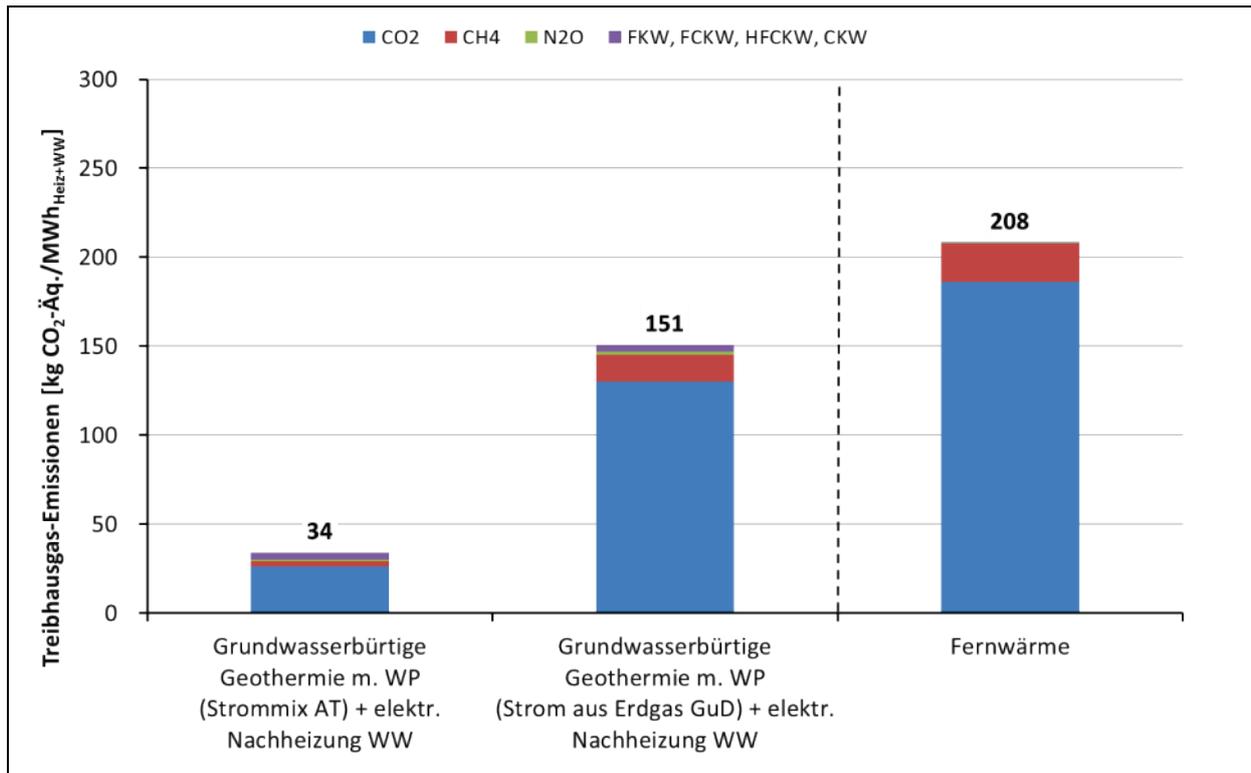


Abbildung 83: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“

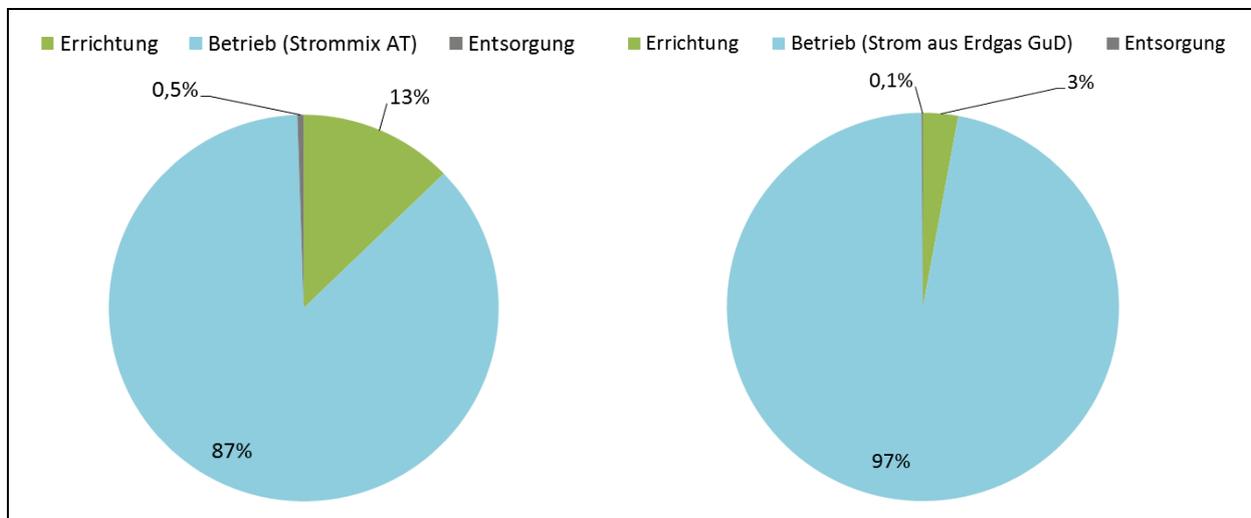


Abbildung 84: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für den kumulierten Energieaufwand sind in Abbildung 85 dargestellt. Die Heizsysteme mit grundwasserbürtiger Geothermie haben einen höheren kumulierten Energieaufwand als die Fernwärme.

Wird der österreichische Strommix in der Wärmepumpe verwendet, können 78% fossile Energie im Vergleich zur Fernwärme eingespart werden. Stammt der Strom aus einem

Erdgas-GuD-Kraftwerk ist der fossile Energieaufwand des Systems mit grundwasserbürtiger Geothermie und Wärmepumpe ca. gleich hoch wie der der Fernwärme.

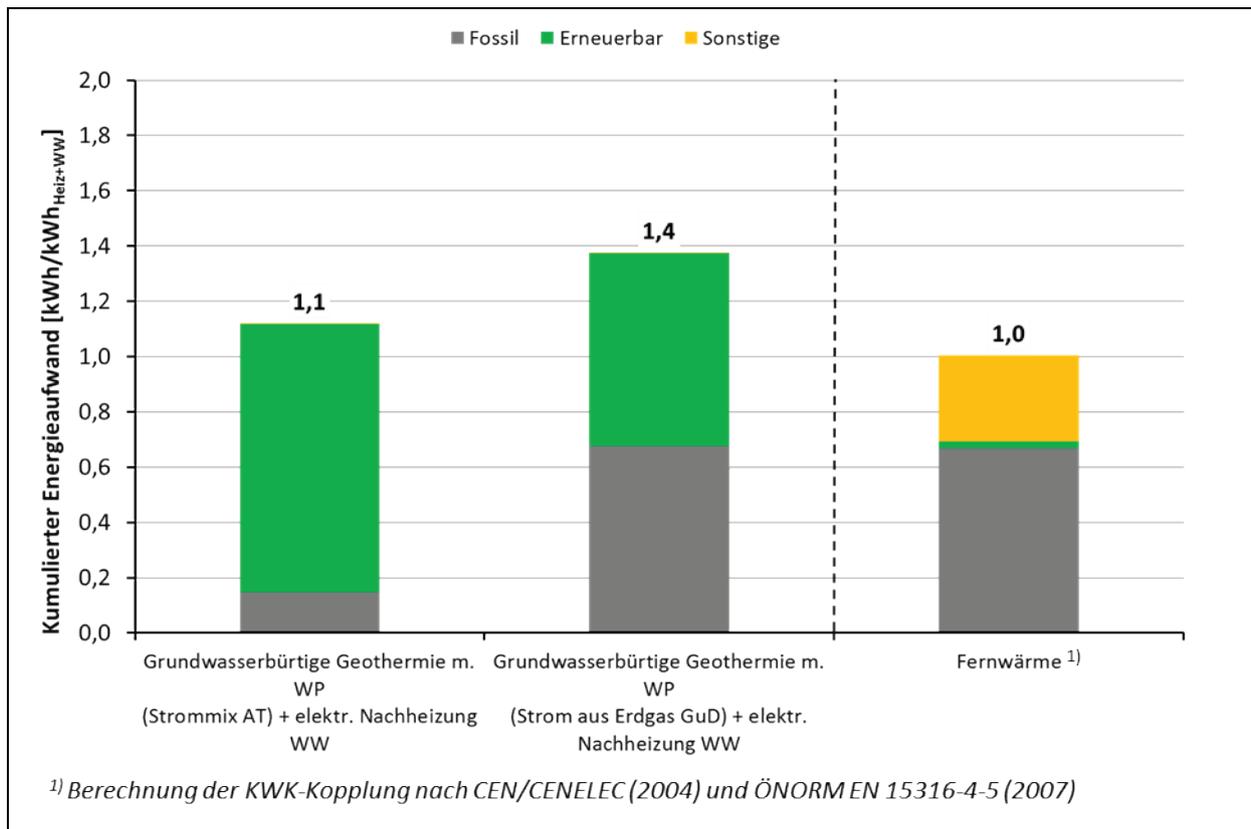


Abbildung 85: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“

2.3.3.2 Ökonomische Bewertung

Ausgehend von der verwendeten Methodik (siehe 1.3.6) und vom Energieversorgungskonzept (2 Varianten: „Neubaugebiet“ und „Potenzial“; siehe 2.2.4.3) werden die Investitionskosten in die Bereiche Grundwassernutzung (Brunnen, Grabungen, Leitungen etc.), Wärmepumpe (Variante „Neubaugebiet“: 5 Wärmepumpen mit je 91 kW Heizleistung; Variante „Potenzial“: 17 Wärmepumpen mit je 91 kW Heizleistung) und Wärmeverteilung (Hausübergabestationen, Heizstäbe für Nachheizung Warmwasser, Regelung etc.) eingeteilt. Diese Investitionskosten sind für die Variante „Neubaugebiet“ in Tabelle 31 zusammengestellt.

Tabelle 31: Grunddaten Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Grundwassernutzung	301.000	€
Wärmepumpe	128.000	€
Wärmeverteilung	132.000	€
Gesamtinvestitionskosten	561.000	€

Damit errechnen sich für die Variante „Neubaugebiet“ Jahreskosten von etwa 72.900 € und spezifische Wärmegestehungskosten von 63,0 €/MWh. Die Aufteilungen auf die Kostenanteile und auf die Investitionsbereiche sind in Abbildung 86 und Abbildung 87 dargestellt. Der große Anteil entfällt auf die Annuität durch die hohen Investitionskosten (Wärmepumpen, Hausübergabestationen, Heizstäbe): Die Jahreskosten verteilen sich etwa gleich auf die

Grundwassernutzung, die Wärmepumpe (bedingt durch die hohe Jahresarbeitszahl) und die Stromkosten für die Warmwassernachheizung.

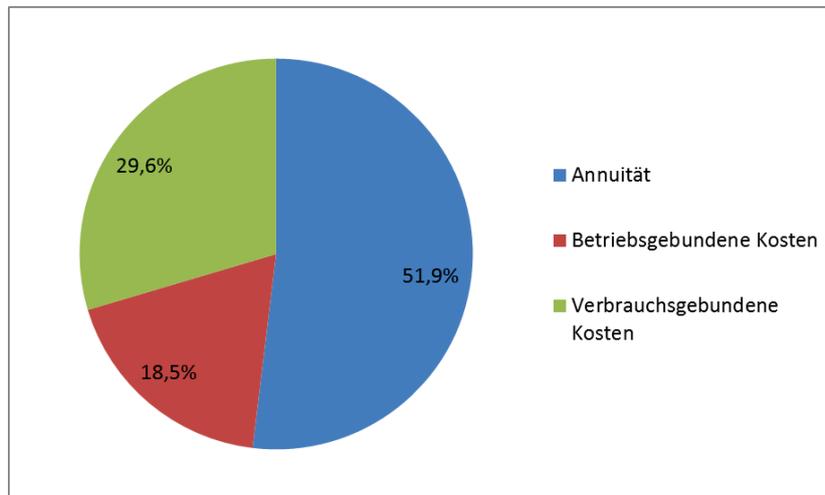


Abbildung 86: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

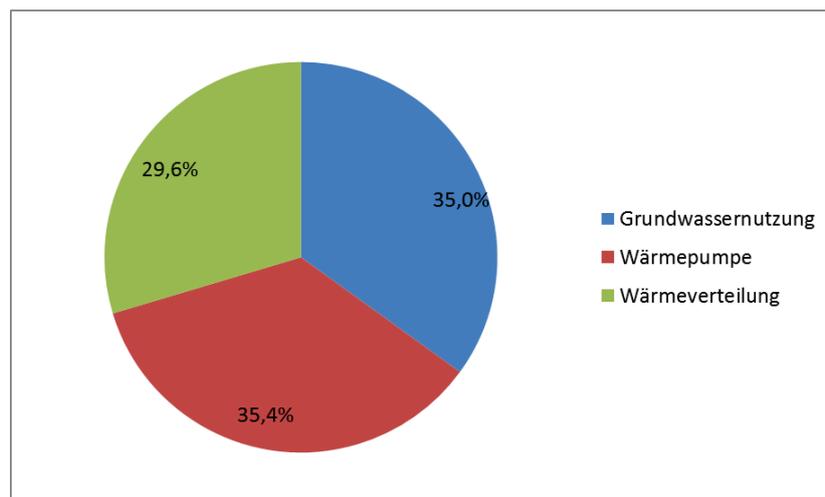


Abbildung 87: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Die Investitionskosten aufgeteilt in die Bereiche für die Variante „Potenzial“ (17 Wärmepumpen mit je 91 kW Heizleistung) sind in Tabelle 32 zusammengestellt.

Tabelle 32: Grunddaten Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Grundwassernutzung	662.000 €
Wärmepumpe	435.000 €
Wärmeeinbindung	444.000 €
Gesamtinvestitionskosten	1.541.000 €

Damit errechnen sich für die Variante „Potenzial“ Jahreskosten von etwa 217.100 € und spezifische Wärmegestehungskosten von 56,7 €/MWh. Die Aufteilungen auf die Kostenanteile und auf die Investitionsbereiche sind in Abbildung 88 und Abbildung 89 dargestellt. Der große Anteil entfällt auf die Annuität durch die hohen Investitionskosten (Wärmepumpen, Hausübergabestationen, Heizstäbe): Die Jahreskosten verteilen sich etwa gleich auf die

Grundwassernutzung, die Wärmepumpe (bedingt durch die hohe Anzahl der Wärmepumpen) und die Stromkosten für die Warmwassernachheizung.

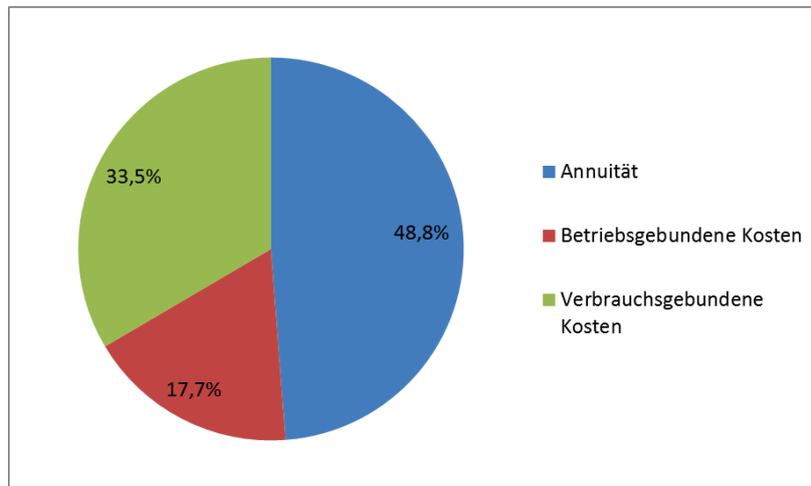


Abbildung 88: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

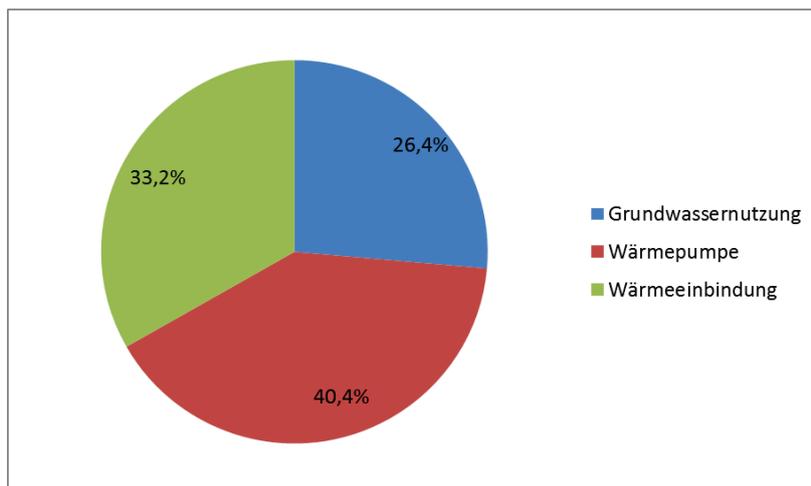


Abbildung 89: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsanteilen Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Die Investitionskosten und Ergebnisse für die Varianten „Neubaugebiet“ und „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ sind in Tabelle 33 zusammengestellt. Im größeren Versorgungsgebiet (Variante „Potenzial“) sind die spezifischen Wärmegestehungskosten um etwa 10 % geringer als für die Variante „Neubaugebiet“. Es sind zwar 2 Brunnenanlagen (2 Entnahme- und 2 Schluckbrunnen) erforderlich, aber es kann damit eine signifikant höhere Wärmeerzeugung erreicht werden.

Tabelle 33: Investitionskosten und Ergebnisse für die Varianten „Neubaugebiet“ und „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Varianten Fallbeispiel "Olympiawiese"	Investitions- kosten [€]	Jahreskosten [€/a]	Spez. Wärmegestehungs- kosten [€/MWh]
„Neubaugebiet“	561.000	72.900	63,0
„Potenzial“	1.541.000	217.100	56,7

2.3.3.3 Auswirkungen der geothermischen Nutzung auf den Untergrund

Die Energiebedarfserhebung ergab die in Abbildung 90 dargestellten Entnahmemengen für die zwei Varianten Neubauten und weiteres Potenzial Neubauten. Die Mengen für die Variante Neubauten sind aufgrund der hohen Ergiebigkeit des Aquifers in diesem Bereich aus einem fiktiven Brunnen entnehmbar. Für die Variante Potenzial Neubauten werden zwei weitere fiktive Brunnen benötigt. Die Brunnen werden für Heizzwecke und Warmwasseraufbereitung genutzt, sodass die Entnahmemengen in den Sommermonaten deutlich geringer sind. Die entnommenen Wassermengen werden unterstrom um 5 K abgekühlt (gesetzliche Vorgabe maximal 6 K) in eine fiktive Schluckbrunnen reinjiziert, die so situiert wurden, dass kein hydraulischer Kurzschluss möglich ist. Verwendet wurde ein aus dem regionalen Grundwassermodell ausgeschnittenes Detailmodell, welches die Randbedingungen und Aquiferparameter aus dem Regionalmodell übernimmt, aber mit einem auf die Fragestellung zugeschnittenen verfeinerten Elementenetz versehen wurde (siehe Potentiallinien, Flurabstände und Elementenetz in Abbildung 91, genaue Lage in Abbildung 92, Randbedingung der Lufttemperatur und der Wassertemperatur der Mur s. Abbildung 62). Die relevanten Wärmetransportparameter sind in Tabelle 34 zusammengestellt.

Die Temperaturmessdaten der Hydrographischen Landesabteilung (Abbildung 93) zeigen eine anthropogen bedingte Erwärmung, aber deutlich geringer als im Bereich Innenstadt-West. Der Vergleich mit den simulierten Daten (Abbildung 94) zeigt, dass die Dynamik sehr gut erfasst werden kann. Auch die Absolutwerte der Grundwassertemperaturen werden im Gegensatz zum innerstädtischen Bereich relativ gut erfasst. Somit ist das Wärmetransportmodell relativ gut prognosefähig.

Abbildung 96 und Abbildung 97 zeigen die simulierten Ganglinien der Entnahme- und Rückgabetemperatur, Abkühlung um 5 K).

Abbildung 95 zeigt die simulierte Temperaturverteilung bei Betrieb der fiktiven Entnahme und des Reinjektionsbrunnens für die Variante Neubauten. Sehr deutlich ist der Einfluss der Mur erkennbar sowie der weit reichende abkühlende Einfluss des reinjizierten Grundwassers, der auch in der Temperaturdifferenzkarte bei Betrieb beider Varianten in Abbildung 98 sehr klar ersichtlich wird.

Der hydraulische Einfluss auf andere Wasserrechte und auch auf die Flurabstände ist aufgrund der hohen Ergiebigkeit des Aquifers sehr gering, wie die Karte der simulierten Absenkungen und Aufhöhungen in Abbildung 99 bei Betrieb beider Varianten zeigt.

Somit können sich aus dem Fallbeispiel Olympiawiese die folgenden auf andere urbane Gebiete übertragbaren Aussagen ableiten lassen:

- Die Ergebnisse sind auf viele österreichische urbane Gebiete übertragbar, da sie überwiegend auf hydrogeologisch ähnlichen Rahmenbedingungen (gut durchlässige grundwasserführende Sande und Kiese) situiert sind.
- In periurbanen Gebieten ist der thermische anthropogene Einfluss deutlich geringer und es kann mit der verwendeten Methodik (aus dem regionalen Grundwassermodell ausgeschnittenes instationäres 2D-Detailmodell gekoppelt mit Wärmetransport) ein gut prognosefähiges Tool erstellt werden.
- In Wärmeinseln urbaner Gebiete kann durch die Nutzung mittels Wärmepumpen für Heizzwecke durch sinnvolle und optimierte Nutzungskonzepte eine deutliche und weitreichende Abkühlung des Grundwassers erreicht werden. Derartige Konzepte sind in Zukunft in Abhängigkeit von der Ergiebigkeit des Grundwasserkörpers und der Beeinflussung bestehender Wasserrechte zu entwickeln.

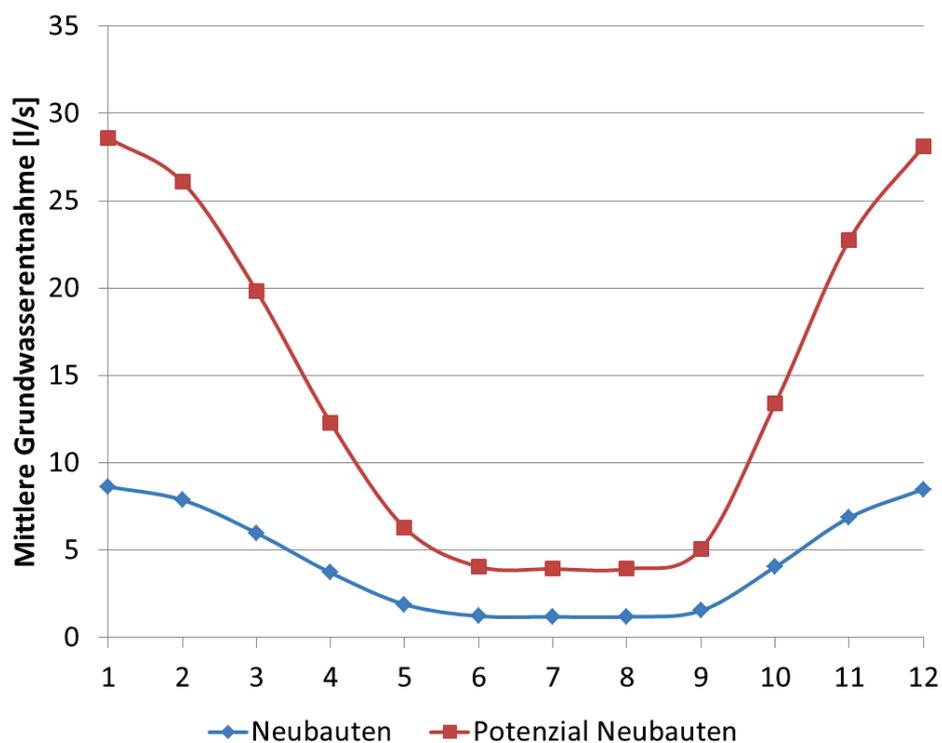


Abbildung 90: Olympiawiese - Auf Basis der Energiebedarfserhebung ermittelter mittlerer Jahresgang der Grundwasserentnahme fiktiven Brunnen für Neubauten und ein mögliches weiteres Potenzial an Neubauten.

Tabelle 34: Olympiawiese - Relevante Wärmetransportparameter

	Wärmeleitfähigkeit fluid W/(m.K) - J/m/s/K	Wärmeleitfähigkeit solid W/(m.K) - J/m/s/K	spez. Wärmekap. fluid MJ/(m3.K)	spez. Wärmekap. solid MJ/(m3.K)	Stauer Wärmeleit.	Stauer Wärmekap.	Wärme NB Wassergeh.	Bodentemp.	Wärme NB	init Temp	Entnahme l/s	Einspeisung l/s	Einspeisetemp	Heat Poros	Ref.-temp.	Mur	heat porosity	Mur Transf. IN	Top Elevation in Feflow m	Thickness of 1 Layer	max. Zeitschritt [d]	Grundlage
VDI 4640 Wasser bei 10°C / Sand gesättigt	0.59	1.5-4.0	4.15	2.2-2.8					k.		k.	k.			k.							
VDI 4640 Kies Steine trocken	k.	0.4-0.5	k.	1.3-1.6					k.		k.	k.			k.							
VDI 4640 Kies Steine gesättigt	k.	1.6-2.0	k.	2.2-2.6					k.		k.	k.			k.							
V09q	0.65	1.6	4.2	2.4	1.6	2.4	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2*)	ja	13	MM	MM	p-5K	0.2	13	pow71_Mur_ow3397_1993_b_20071231_TM.pow	0.2		DHM	1	k	V09p
V09r	0.65	1.6	4.2	2.4	1.6	2.4	10	LT+2 (0.1 wenn kl. 2*)	ja	13			p-5K	0.2	13	pow71_Mur_ow3397_1993_b_20071231_TM.pow	0.2		DHM	1	k	V09q

**Manage Geocity
Pilotgebiet 2:
Olympiawiese
GWM Grazer Feld
GW-Flurabstände
und Finite Elemente Netz
Zeitraum 2003-2013**

Bearbeitung:
T. Harum & A. Dalla-Via
JOANNEUM RESEARCH
Institut für Wasser, Energie
und Nachhaltigkeit
Forschungsgruppe
Wasserressourcen
und Umweltanalytik

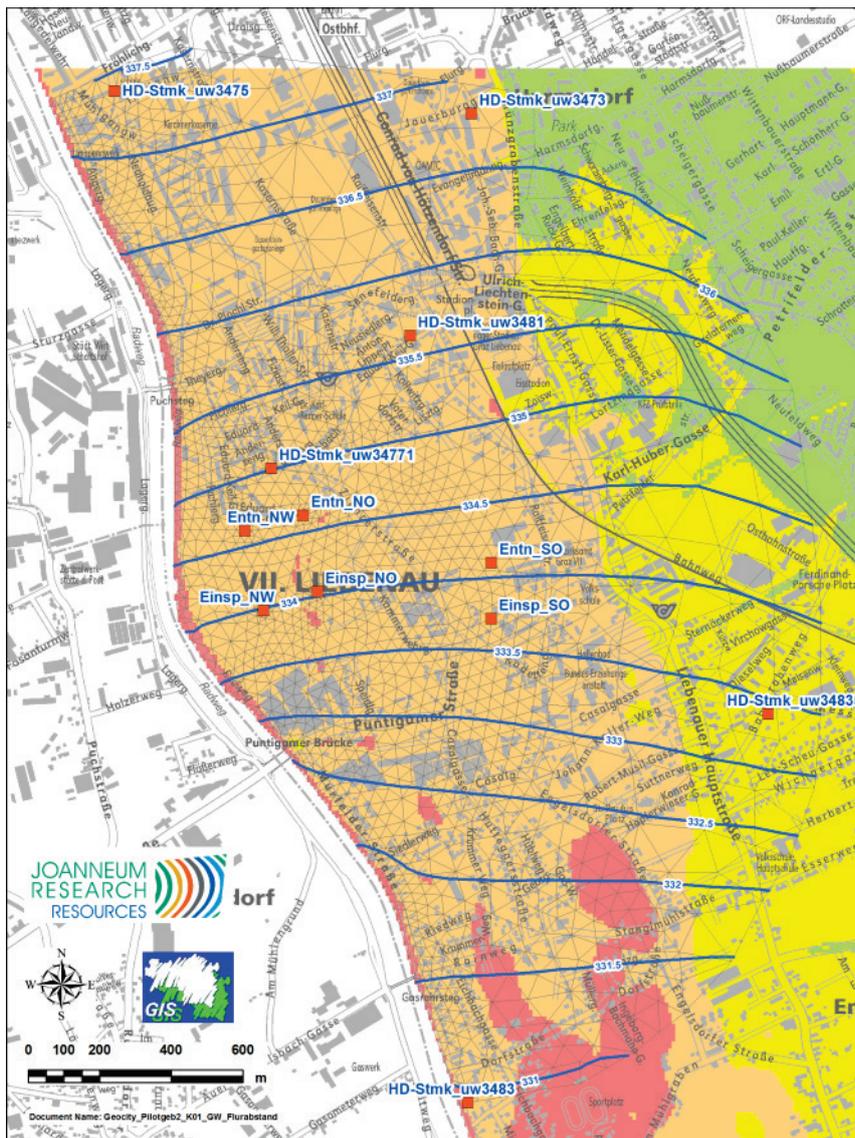


Abbildung 91: Olympiawiese - Grundwasserflurabstände, Grundwasserpotentiallinien und Finite-Elemente-Netz des Detailmodells



**Manage Geocity
Pilotgebiet 2:
Olympiawiese
Grundstücke
Entnahme und
Einspeisestellen**

Bearbeitung:
T. Harum & A. Dalla-Via
JOANNEUM RESEARCH
Institut für Wasser, Energie
und Nachhaltigkeit
Forschungsgruppe
Wasserressourcen
und Umweltanalytik

Legende:

- Entnahme
- Einspeisung
- Messstellen

Wasserrechte (WIS)

- Brunnen
- ◆ Grundwasseranlage
- ▲ Oberflächenwasseranlage
- Kläranl., Kraftwerk sonst.
- GWSP_Iso_V09t_q50
- Pilot2_GrstO
- Pilot2_GrstW
- Ehem_Olympiawiese

Abbildung 92: Olympiawiese - Lage der fiktiven Entnahme- und Einspeisungsstellen und bestehender Wasserrechte und Messstellen

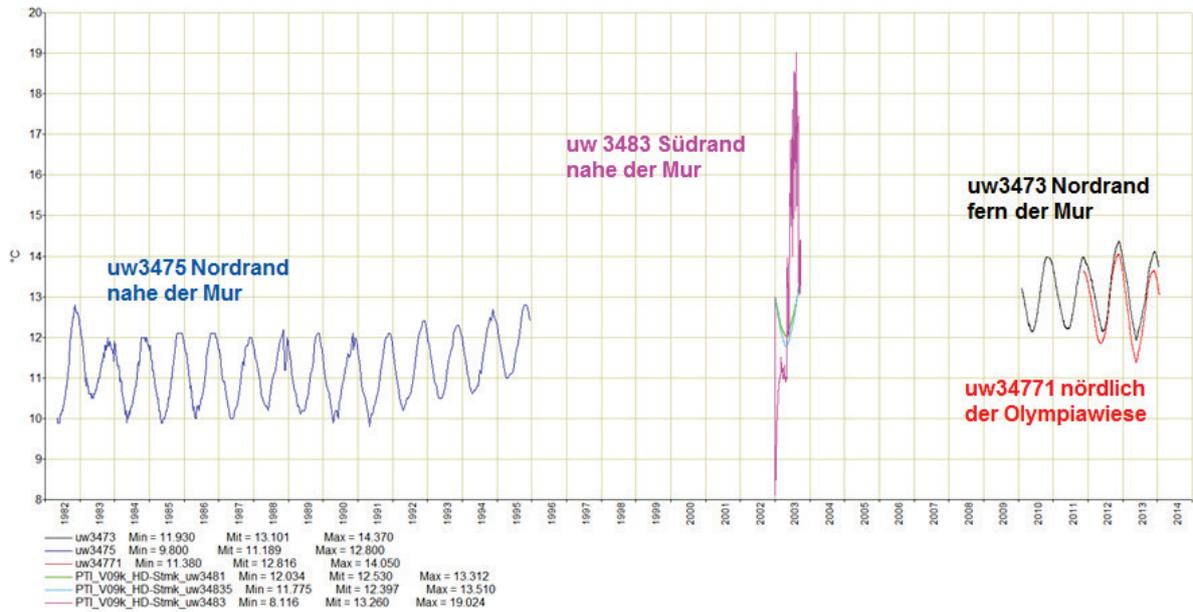


Abbildung 93: Grundwassertemperaturen Messwerte Olympiawiese

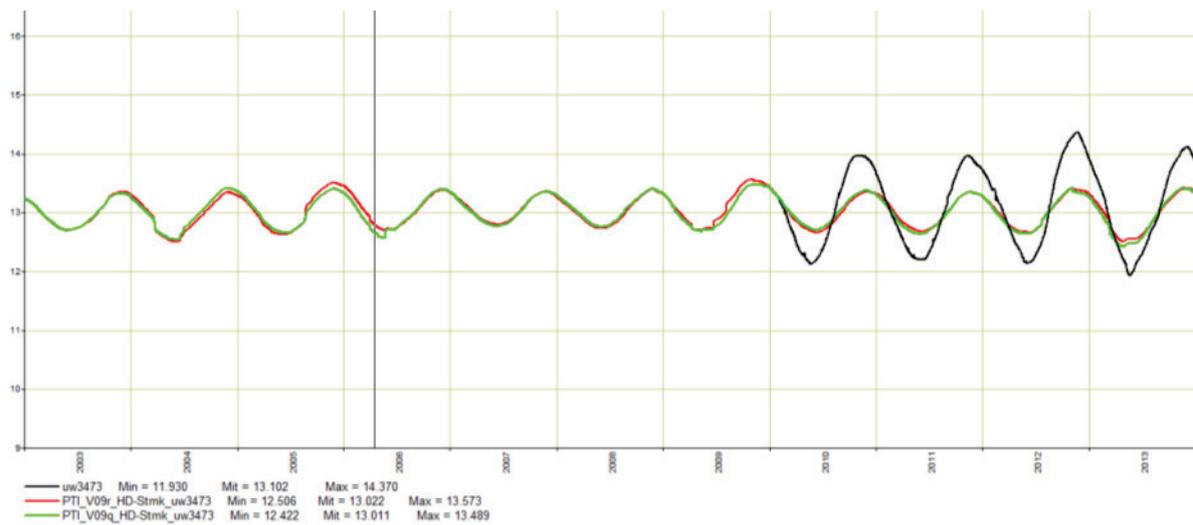
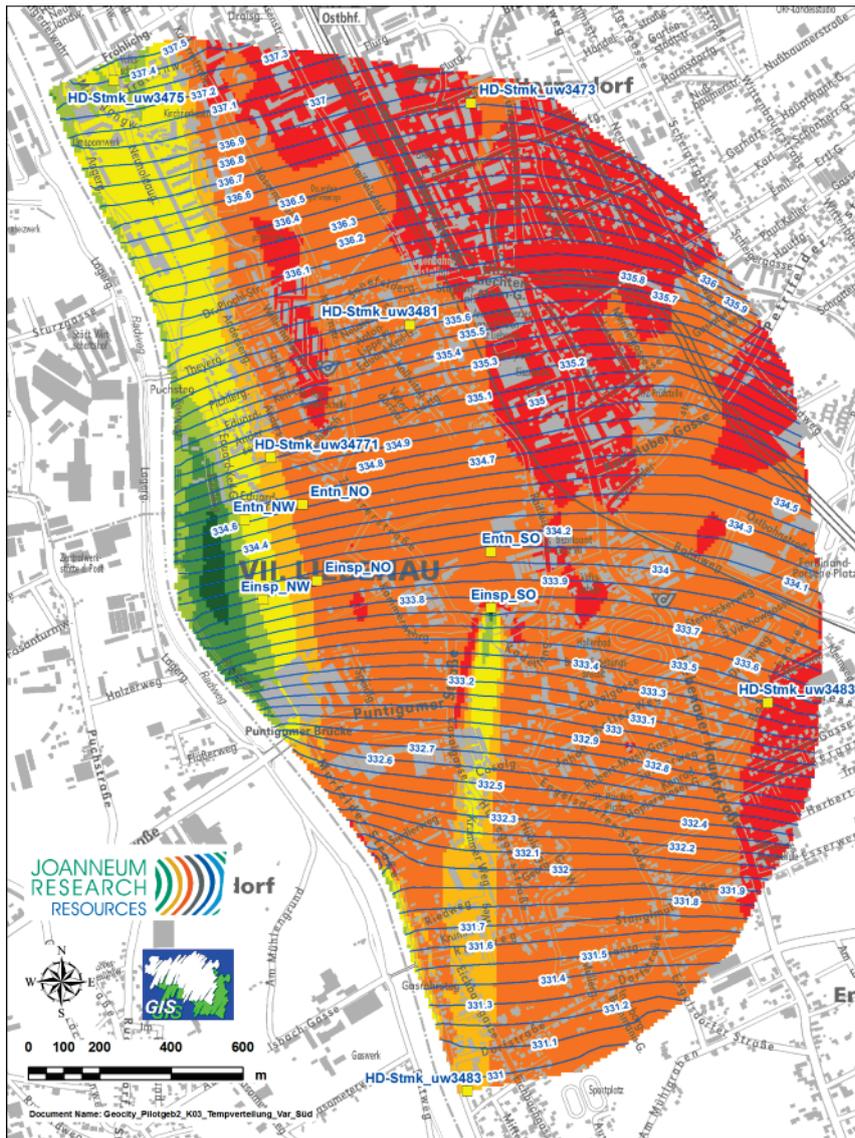


Abbildung 94: Olympiawiese, Beispiel Vergleich der gemessenen und simulierten Grundwassertemperaturen



**Manage Geocity
Pilotgebiet 2:
Olympiawiese
GWM Grazer Feld
Grundwassertemperatur
Verteilung Q50 - Var. Süd
Zeitraum 2003-2013**

Bearbeitung:
T. Harum & A. Dalla-Via
JOANNEUM RESEARCH
Institut für Wasser, Energie
und Nachhaltigkeit
Forschungsgruppe
Wasserressourcen
und Umweltanalytik

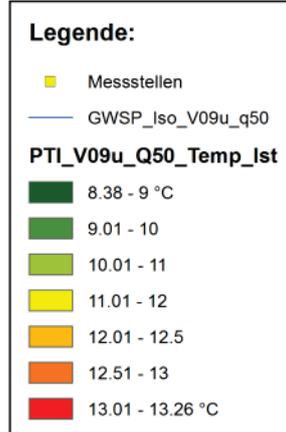


Abbildung 95: Olympiawiese, Temperaturverteilung bei Entnahme und Einspeisung bei der Variante einer Entnahme.

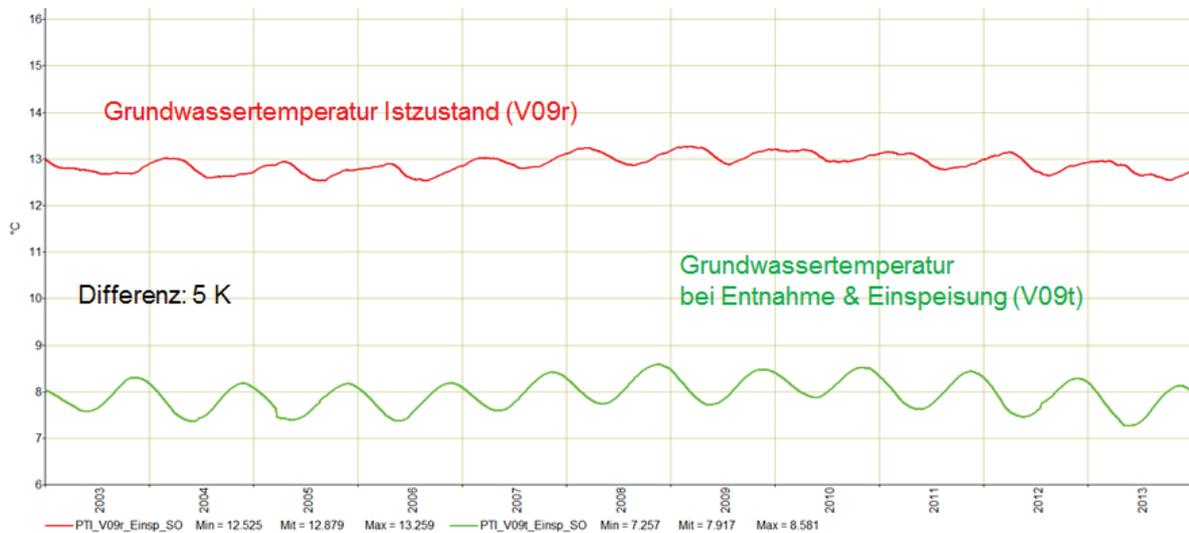


Abbildung 96: Olympiawiese, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung (SO)

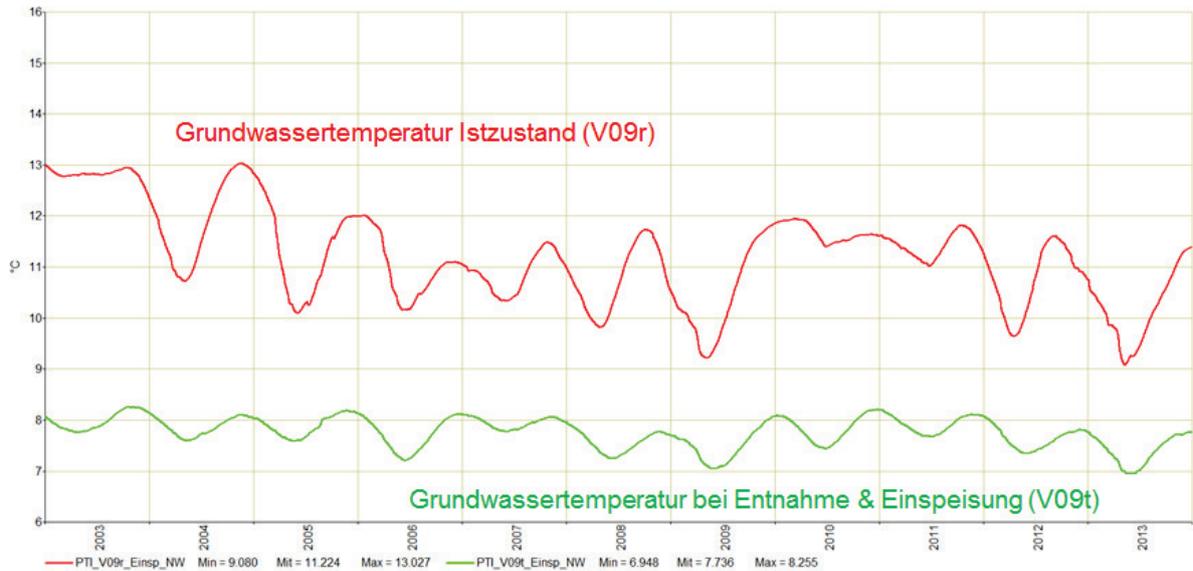


Abbildung 97: Olympiawiese, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung (NW)

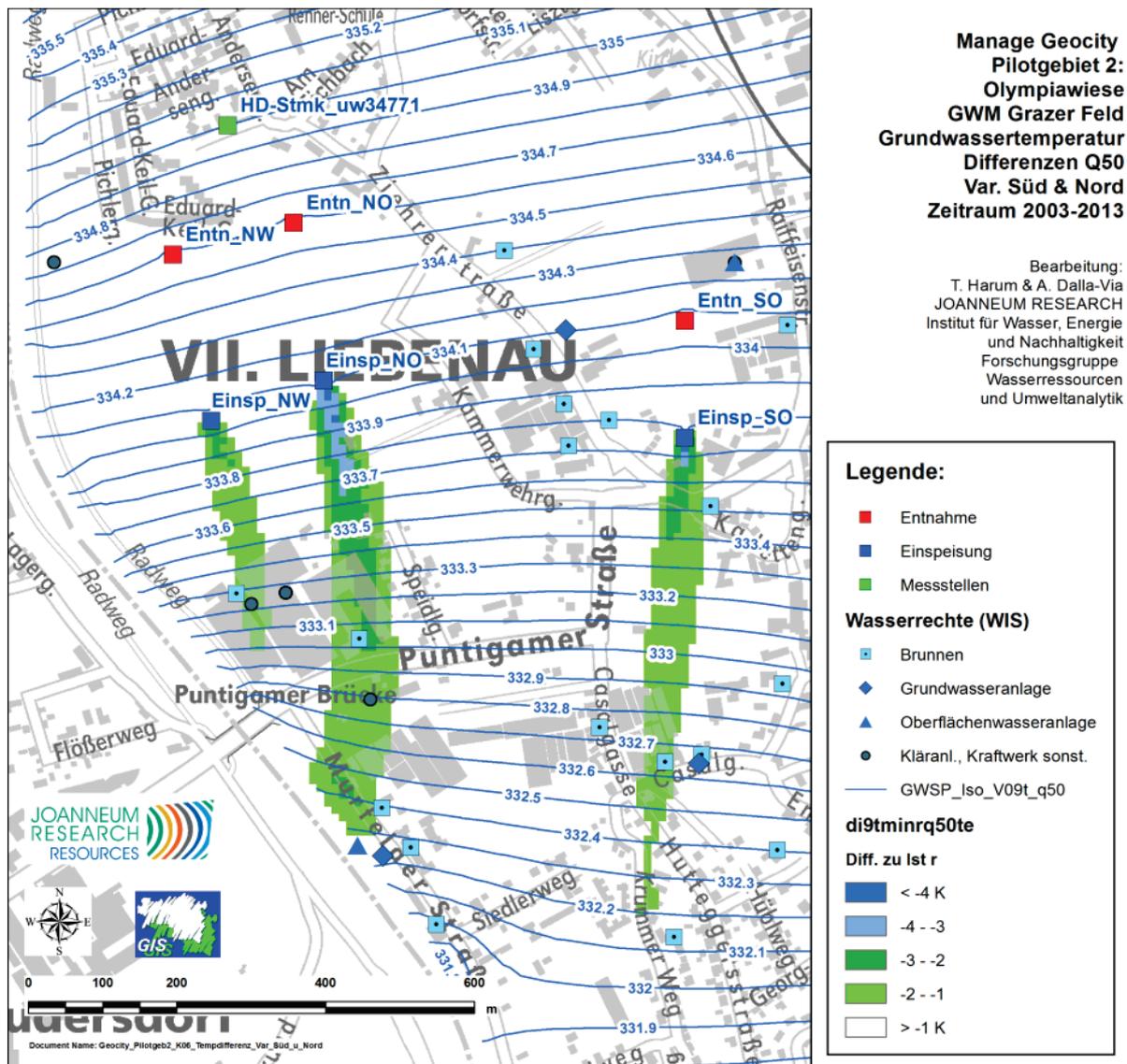
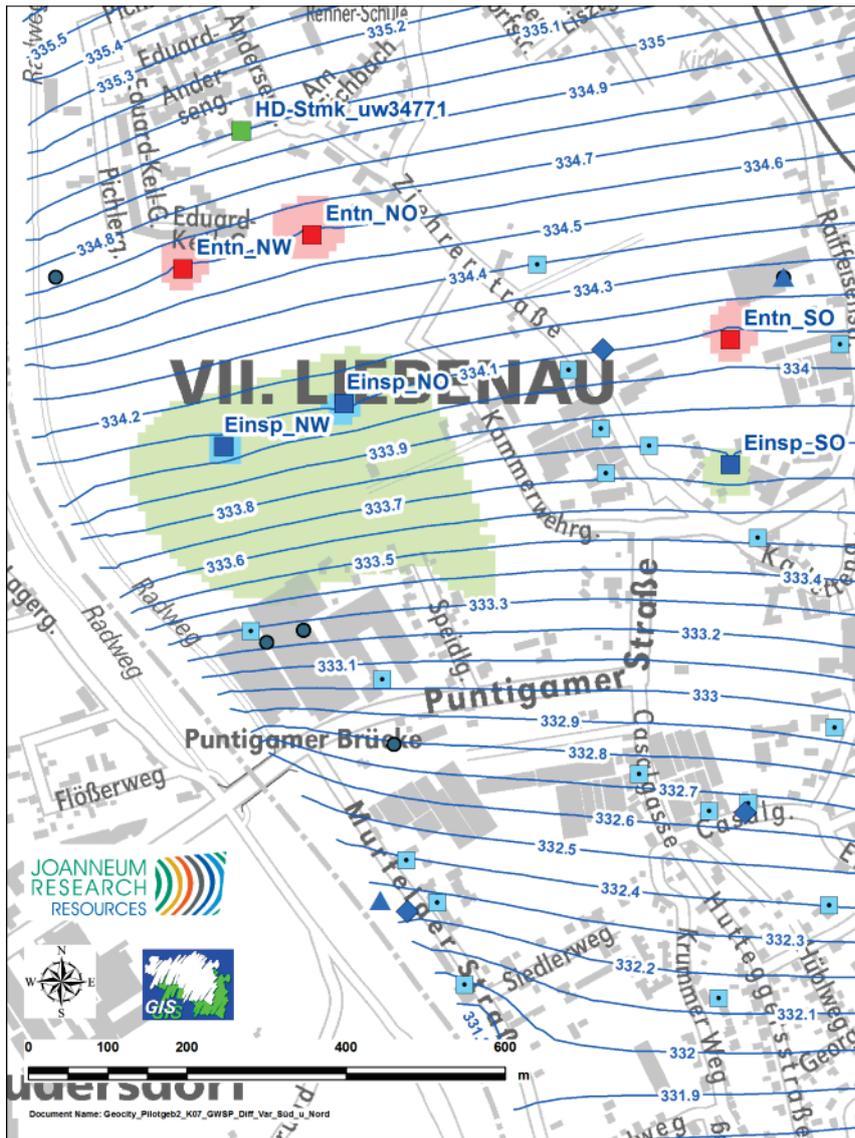


Abbildung 98: Olympiawiese, Temperaturdifferenzen bei Entnahme und Einspeisung.



**Manage Geocity
 Pilotgebiet 2:
 Olympiawiese
 GWM Grazer Feld
 GW-Spiegel
 Differenzen Q50
 Var. Süd und Nord
 Zeitraum 2003-2013**

Bearbeitung:
 T. Harum & A. Dalla-Via
 JOANNEUM RESEARCH
 Institut für Wasser, Energie
 und Nachhaltigkeit
 Forschungsgruppe
 Wasserressourcen
 und Umweltanalytik

Legende:

- Entnahme
- Einspeisung
- Messstellen

Wasserrechte (WIS)

- Brunnen
- ◆ Grundwasseranlage
- ▲ Oberflächenwasseranlage
- Kläranl., Kraftwerk sonst.
- GWSP_Iso_V09t_q50

di9tminrq50he

- < -0.06 m
- -0.06 - -0.03
- -0.03 - 0.03
- 0.031 - 0.06
- > 0.06 m

Abbildung 99: Olympiawiese, Absenkung und Aufhöhung des Grundwasserspiegels

2.4 Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Geothermie

Aufbauend auf der Bearbeitung und den vorliegenden Ergebnissen für die Fallbeispiele in Graz wurde eine Methodik für die koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme entwickelt. Die Methodik beinhaltet eine strukturierte Vorgehensweise für die Umsetzung von Erdwärmeprojekten in städtischen Gebieten, die wesentliche Aspekte wie Untergrundeigenschaften, Beeinflussung bestehender Nutzungen, Auswirkungen auf die Grundwasserqualität, Wärmegestehungskosten und Emissionsveränderungen im Vergleich zu anderen Energieversorgungskonzepten berücksichtigt. Dadurch soll ein Beitrag zu einer koordinierten Nutzung und verbesserten Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme geleistet werden. Die Methodik wurde auf Basis der Modellregion Graz entwickelt, ist jedoch universell auf städtische Gebiete in Österreich anwendbar.

Die Methodik gliedert sich in die folgenden sechs Abschnitte:

1. Neue Energieversorgung – Ausgangssituation
2. Untergrundeigenschaften
3. Systemauswahl
4. Anlagendimensionierung
5. Prüfung
6. Optimierung und Umsetzung

Die Abschnitte 1 bis 5 wurden im Rahmen des Projektes für die Fallbeispiele in der Modellregion behandelt. Abschnitt 6 „Optimierung und Umsetzung“ wurde nicht durchgeführt und stellt einen Ausblick für die Zukunft dar.

Die gesamte Methodik ist in Abbildung 100 dargestellt. In der Folge werden die einzelnen Abschnitte und deren inhaltliche Details beschrieben.

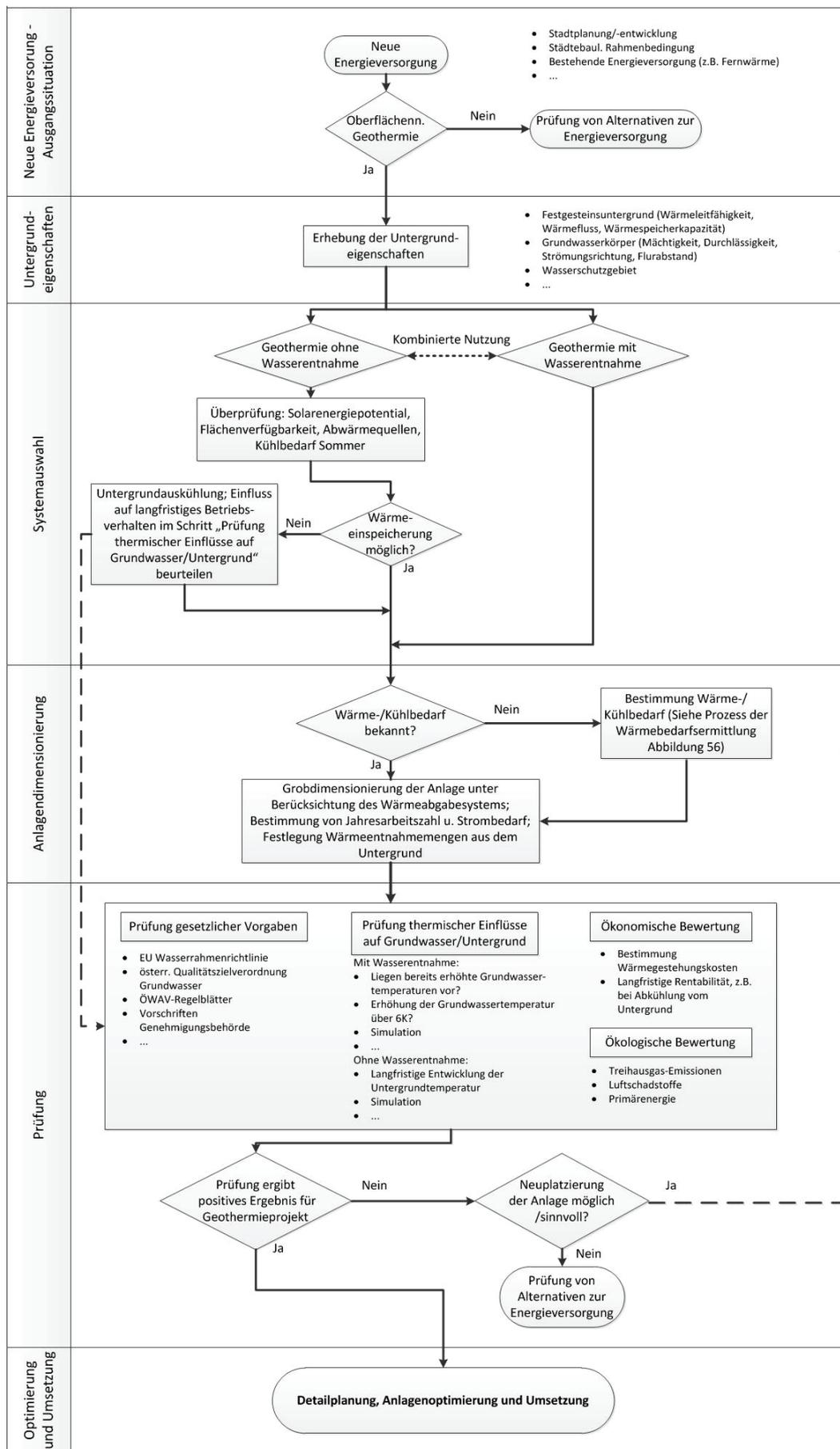


Abbildung 100: Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung von oberflächennaher Erdwärme in städtischen Gebieten

2.4.1 Neue Energieversorgung – Rahmenbedingungen

Im Allgemeinen ist der Startpunkt für ein oberflächennahes Geothermieprojekt im städtischen Raum der Bedarf für eine neue Energieversorgung mit dem Ziel mehr erneuerbare Energie für die Energieversorgung einzusetzen und weniger Treibhausgas-Emissionen und Luftschadstoffe zu verursachen. Dabei kann es sich um die Versorgung von einzelnen Gebäuden als auch von städtischen Gebieten handeln. In der hier dargestellten Methodik liegt der Fokus auf der Erneuerung der Energieversorgung für ein städtisches Gebiet. Das umfasst sowohl Bestandsgebiete als auch Neubaugebiete. Bei der grundsätzlichen Entscheidung, ob oberflächennahe Geothermie für die zukünftige Energieversorgung in Frage kommt, sind städtebauliche Rahmenbedingungen wie Stadtplanungsstrategien und Stadtentwicklungskonzepte zu beachten. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die bestehende Energieversorgung. Im ersten Schritt sollte erhoben werden wie die Wärme/Kälteversorgung derzeit erfolgt bzw. ob bereits andere Energieversorgungslösungen für ein neues Gebiet vorgesehen sind.

2.4.2 Untergrundeigenschaften

Der nächste Schritt ist die Erhebung der Untergrundeigenschaften des Gebietes, das betrachtet wird und seiner Umgebung. Das umfasst für den Festgesteinsuntergrund die Erhebung von wesentlichen Kennzahlen wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmefluss und Wärmespeicherkapazität. Liegt ein Grundwasserkörper vor sind Mächtigkeit und Durchlässigkeit, Strömungsrichtung und Flurabstand wesentliche Indikatoren. Bestehende Wasserschutzgebiete (Zone I und II) sind bei grundwasserbürtigen geothermischen Nutzungen als Verbotszonen anzusehen. Weiters ist zu berücksichtigen, ob übernatürlich hohe Grundwassertemperaturen vorliegen, die eine Nutzung für Kühlzwecke einschränken, wo jedoch durch die Nutzung für Heizzwecke ein Abkühleffekt erzielt werden kann.

Weiterführende Informationen zu Untergrundeigenschaften am Beispiel der Modellregion Graz sind in den Abschnitten „2.1. Definition von unterirdischen Gunstzonen“ und für die Fallbeispiele in den Abschnitten „2.2.2.1, 2.2.3.1. und 2.2.4.1. Geothermische Eigenschaften des Untergrunds“ angeführt.

2.4.3 Systemauswahl

Basierend auf den vorliegenden Informationen zum Untergrund ist die Entscheidung zu treffen, ob die Geothermienutzung ohne Wasserentnahme, mit Wasserentnahme oder eine kombinierte Nutzung (Kombination beider Varianten) erfolgen soll. Weiterführende Informationen dazu sind in „1.2.2 Technologien für den Wärmeentzug aus dem Untergrund“ und „1.2.3 Anwendungskonzepte für die Wärmenutzung“ dargestellt.

Bei der Geothermienutzung ohne Wasserentnahme ist zu beachten, dass die Entnahme von Wärme aus dem Untergrund ohne Wärmerückführung langfristig zu einer Untergrundauskühlung führen kann. Um dem entgegenzuwirken und die Wärmespeicherfähigkeit des Untergrunds für einen saisonalen Ausgleich zu nutzen, kann das Geothermiesystem mit anderen Wärmequellen, wie Solarwärme oder Abwärme kombiniert

werden (siehe auch „1.2.4 Saisonale Speicherung und Regeneration von Wärme im Untergrund“). Hierfür sind das Solarenergiepotenzial und mögliche Abwärmequellen zu prüfen.

Weiters ist die Flächenverfügbarkeit für das System zur Wärmeentnahme aus dem Untergrund (z.B. für ein Erdwärmesondenfeld) bzw. für etwaige Solaranlagen zu beachten. Besteht bei den Gebäuden, die im Winter beheizt werden, Kühlbedarf im Sommer, kann auch die im Sommer abgeführte Wärme im Untergrund gespeichert werden. Gibt es keine Möglichkeit Wärme in den Untergrund zurückzuführen, ist langfristig von einer Untergrundauskühlung auszugehen. In diesem Fall ist die Auswirkung der Untergrundauskühlung auf das langfristige Betriebsverhalten der Anlage zu beurteilen. Dies kann mittels Simulationen erfolgen. Am Fallbeispiel Hafnerstraße ist die Simulation im Abschnitt „2.2.3.1 Geothermische Eigenschaften des Untergrunds“ beschrieben und Ergebnisse in [Abbildung 81](#) dargestellt. Da für die Simulation bestimmte Informationen verfügbar sein müssen, die im Schritt „Anlagendimensionierung“ erhoben werden (z.B. aus dem Untergrund zu entnehmende Wärmemengen, um den Wärmebedarf zu decken), wird die Beurteilung im Abschnitt „Prüfung“ im Schritt „Prüfung thermischer Einflüsse auf den Untergrund/Grundwasser“ durchgeführt.

2.4.4 Anlagendimensionierung

Nach der grundsätzlichen Systemauswahl ist eine erste Grobdimensionierung der Anlage vorzunehmen. Diese ist abhängig vom bestehenden Wärme- und Kühlbedarf, der durch oberflächennahe Erdwärme gedeckt werden soll. Ist der Bedarf des Untersuchungsgebietes nicht bekannt, kann dieser auf Basis des in [Abbildung 101](#) dargestellten Prozesses zur Wärme- und Kühlbedarfsermittlung erhoben werden. Weitere Informationen zu möglichen Datenquellen und Vorgehensweise bei der Wärme- und Kühlbedarfsbestimmung finden sich in Abschnitt „1.3.4 Wärme- und Kühlbedarfsanalyse“

Ist der Wärme- und Kühlbedarf für das Untersuchungsgebiet bekannt, kann die Grobdimensionierung der Anlage (Wärme/Kälteleistung) unter Berücksichtigung des Wärmeabgabesystems erfolgen. Bei einer Kombination mit einer Wärmepumpe sind die Jahresarbeitszahl und der benötigte Strombedarf für den Betrieb der Wärmepumpe wichtige Kennzahlen. Darauf aufbauend können die aus dem Untergrund zu entnehmenden Wärmemengen bestimmt werden, die für die Dimensionierung der Anlagen für den Wärmeentzug (z.B. Schüttmenge, Anzahl der Brunnen, Anzahl und Tiefe der Erdwärmesonden) bestimmend sind.



Abbildung 101: Prozess der Wärme- und Kühlbedarfsermittlung

2.4.5 Prüfung

Auf Basis der bereits vorliegenden Informationen zu Untergrundeigenschaften, Energieversorgungssystem und Anlagendimensionierung erfolgt in diesem Schritt die Prüfung von gesetzlichen Vorgaben und der thermischen Einflüsse auf das Grundwasser und den Untergrund.

Zu prüfen sind bezüglich der Untergrundeigenschaften und bestehender Nutzung die folgenden Parameter bei der grundwasserbürtigen Geothermie:

- Etwaige vorhandene beeinflusste bestehende Wasserrechte, insbesondere geothermische Nutzungen und Trinkwasserversorgungen
- Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit im Grundwasserkörper
- Hydraulische Eigenschaften des Grundwasserkörpers (Durchlässigkeit, Mächtigkeit, Abstrommenge)
- Schwankungsverhalten und Flurabstand des Grundwasserspiegels
- Wärmeleitfähigkeit in der ungesättigten Zone und im Grundwasser
- Wasserqualität des Grundwasserkörpers in Abhängigkeit von vorhandenen Daten und den spezifischen Verhältnissen im Grundwasserkörper
- Ist eine Verschlechterung der Wasserqualität möglich (Verschlechterungsverbot der EU-Wasserrahmenrichtlinie)?

In einer ökonomischen Bewertung werden die Wärmegestehungskosten bestimmt, als wesentlicher Input für eine Investitionsentscheidung. Begleitend sollte in einer ökologischen Bewertung untersucht werden, welche Auswirkungen das neue Energieversorgungskonzept auf Treibhausgas-Emissionen, Luftschadstoffe (z.B. Feinstaubemissionen bei Ersatz von bestehenden Kesselanlagen) und Primärenergiebedarf hat. Wie die Ergebnisse für die Fallbeispiele der Modellregion Graz zeigen, ist es hier wichtig den gesamten Lebenszyklus zu betrachten, da bei Wärmepumpensystemen z.B. die Art der Strombereitstellung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Am Ende müssen alle Prüfungsergebnisse gemeinsam bewertet werden. Bei einer positiven Bewertung für das Geothermieprojekt kann im nächsten Schritt eine Detailplanung und Anlagenoptimierung durchgeführt werden. Bei einer negativen Bewertung des Geothermieprojektes könnten eine Neuplatzierung der Anlage überlegt werden. In diesem Fall müssen die vorangegangenen Schritte für den neuen Standort noch einmal geprüft werden.

2.4.6 Optimierung und Umsetzung

Der letzte Schritt der Methodik für eine koordinierte Nutzung Bewirtschaftung oberflächennaher Geothermie in städtischen Gebieten umfasst die Detailplanung und Anlagenoptimierung, um die Projektumsetzung vorzubereiten. Diese Schritte wurden im Rahmen dieses Sondierungsprojektes für die beschriebenen Fallbeispiele nicht durchgeführt. Es hat sich aber bei der Bearbeitung bereits gezeigt, dass Anlagenoptimierungen wesentlich sind, um die Energieeffizienz der Anlagen zu erhöhen und Wärmegestehungskosten zu reduzieren.

3 Schlussfolgerungen

Folgende Schlussfolgerungen können auf Basis der durchgeführten Arbeiten gezogen werden:

Wärme- und Kühlbedarf von Stadtgebieten

Grundsätzlich sind Grunddaten für die Bestimmung des Wärme- und Kühlbedarfs in Stadtgebieten aus verschiedenen Quellen vorhanden (z.B. AGWR, Branchenauswertung KMU Scheck, Energieausweise, Digitaler Atlas Steiermark, Luftbilder, etc.). Genauere Daten zum Wärme- und Kühlbedarf liegen in der Regel den Energieversorgern für leitungsgebundene Energieträger (Gas, Fernwärme, Strom) vor. Aus Gründen des Datenschutzes können diese Daten jedoch oft nicht für energieraumplanerische Fragestellungen herangezogen werden.

Die Aktualität und Qualität der vorliegenden Daten ist sehr unterschiedlich. Das ergibt die Notwendigkeit, die Plausibilität der Daten für die Untersuchungsgebiete objektweise zu prüfen. Dies kann mittels Vor-Ort-Besichtigungen durchgeführt werden, in denen z.B. Punkte wie konditionierte Fläche, Nutzungsart oder durchgeführte Sanierungen erhoben werden können.

In der Steiermark gibt es keine Schnittstelle zwischen Daten, die im AGWR angeführt sind, und der Energieausweisdatenbank. Auch eine zentrale „Energiebedarfsdatenbank“ ist für die untersuchte Modellregion Graz nicht vorhanden. Diese wäre jedoch eine wesentliche Grundlage für die städtische Energieraumplanung.

Weiters wurde festgestellt, dass bei Bestandsobjekten die Einbindung einer neuen Wärme-/ Kälteversorgung oft schwierig ist, da der Aufwand für die Adaption bestehender Systeme hoch ist.

Die Wärme- und Kühlbedarfserhebung für Betriebe stellt sich als schwierig dar. Energieverbrauchsdaten von Betrieben sind schwer zugänglich. Bei der Verwendung von Kennzahlen sind große Abweichungen möglich. Die Projektarbeiten haben auch gezeigt, dass bei direkter Kontaktaufnahme und grundsätzlicher Bereitschaft der Betriebe zu kooperieren die Energieverbrauchsdaten oft nur unvollständig vorliegen.

Eine Chance wird hier bei Betriebsneubauten gesehen, da eine frühzeitige Systemanpassung möglich ist. Sollte ein Abwärmepotenzial in Betrieben vorliegen, könnte dieses auch über Niedertemperaturnetze in Kombination mit Wärmepumpen in benachbarten Quartieren genutzt werden.

Bei der Definition von Energieversorgungskonzepten mit oberflächennaher Erdwärme anhand der Fallbeispiele hat sich gezeigt, dass das Temperaturniveau der Wärmeversorgung einen wesentlichen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe hat. Der Einfluss von hohen benötigten Vorlauftemperaturen (z.B. für Einspeisung in ein Fernwärmenetz und die Versorgung bestehender Gebäude) kann nur zu einem geringen Anteil durch erhöhte Grundwasser- und Untergrundtemperaturen in städtischen Gebieten ausgeglichen werden. Niedertemperatur-Wärmeabgabesysteme sollten zukünftig eine Vorgabe in Baugesetzen,

Förderrichtlinien und Ausschreibung sein, um zumindest im Neubaubereich eine effiziente Anwendung von oberflächennaher Erdwärme in Kombination mit Wärmepumpen zu ermöglichen.

Bei den untersuchten Fallbeispielen spielte der Kühlbedarf der Gebäude ein untergeordnete Rolle, was u.a. dadurch erklärt werden kann, dass die untersuchten Gebiete wenig Bürogebäude aufweisen und derzeit im Wohnbau aktive Kühlsysteme noch kein Standard sind⁶. Aufgrund von Klimaänderungen und steigender Nachfrage geht das Projektteam jedoch zukünftig von einer steigenden Bedeutung des Kühlbedarfs aus. Das Abführen von Wärme im Sommer zur Gebäudekühlung in den Untergrund stellt ein Potenzial für die Regeneration von Erdwärmesonden dar.

Oberflächennahe Geothermie mit Wasserentnahme

Mit dem vorliegenden gekoppelten hydraulischen Modell und Wärmetransportmodell ist es möglich eine Prognose der Auswirkungen von grundwasserbürtigen oberflächennahen Geothermieprojekten auf den Grundwasserkörper durchzuführen. Der Einfluss auf betroffene Wasserrechte kann bestimmt werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse kann die optimale Situierung von Entnahme- und Schluckbrunnen durchgeführt werden, um gegenseitige Beeinflussungen zu vermeiden. Die Ergebnisse der Simulationen, die für die Fallbeispiele „Innenstadt-West“ und „Olympiawiese“ durchgeführt wurden, zeigen:

- Die Ergebnisse sind auf viele österreichische urbane Gebiete übertragbar, da diese überwiegend auf hydrogeologisch ähnlichen Rahmenbedingungen (gut durchlässige grundwasserführende Sande und Kiese) situiert sind.
- In Wärmeinseln urbaner Gebiete kann durch die Nutzung mittels Wärmepumpen für Heizzwecke eine deutliche und weitreichende Abkühlung des Grundwassers erreicht werden. Voraussetzung sind entsprechende Nutzungskonzepte, die in Zukunft in Abhängigkeit von der Ergiebigkeit des Grundwasserkörpers und der Beeinflussung bestehender Wasserrechte zu entwickeln sind.
- Dies hat positive Auswirkungen auf die Grundwasserqualität.
- Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der diversen thermischen Einflüsse in urbanen Gebieten. Wie die Ergebnisse Innenstadt-West zeigen, können zwar relative Temperaturänderungen prognostiziert werden, bei den Absoluttemperaturen zeigt sich aber, dass der Einfluss zu wenig erfasst ist und auch schwierig zu erfassen ist.
- In periurbanen Gebieten (Olympiawiese) ist der thermische anthropogene Einfluss deutlich geringer und es kann mit der verwendeten Methodik (aus dem regionalen Grundwassermodell ausgeschnittenes instationäres 2D-Detailmodell gekoppelt mit Wärmetransport) ein gut prognosefähiges Tool erstellt werden.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten hydrochemischen Modellierungen haben außerdem gezeigt, dass Temperaturschwankungen im Bereich von $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$ nur sehr geringfügige Veränderungen in der Hydrochemie bewirken. Dies geht auch aus anderen

⁶ Lt. OIB-Richtlinie ist für Wohngebäude keine aktive Kühlung vorgesehen

vergleichbaren Studien (z.B. Possemiers et al., 2014) hervor. Allerdings sollte die maximal genehmigte Temperaturspanne immer auf den physikalisch, chemischen und biologischen Zustand des jeweiligen Grundwasserleiters abgestimmt sein.

Oberflächennahe Geothermie ohne Wasserentnahme

Die Ergebnisse zu den Auswirkungen auf den Untergrund für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ mit einem Erdwärmesondenfeld zeigen, dass die räumlichen Auswirkungen von Erdwärmesondenfeldern im Untergrund sehr begrenzt sind. In einer Entfernung von 50 m zum Erdwärmesondenfeld sind die Temperaturänderungen nicht mehr signifikant. Die Regeneration der Erdwärme (z.B. mit solarer Wärme, industrieller Abwärme oder Abwärme der Gebäudekühlung) ist langfristig erforderlich und verbessert die Anlageneffizienz. In urbanen Bereichen könnten eine Vielzahl von Erdwärmesondenfeldern (mit Regeneration) ohne negative Wechselwirkungen errichtet werden.

Ökologische Bewertung

Für die drei untersuchten Fallbeispiele wurden die Treibhausgasemissionen und der kumulierter Energieaufwand mittels Lebenszyklusanalyse untersucht. Die Ergebnisse der Fallbeispiele sind auf Grund unterschiedlicher Funktionen und Systemgrenzen (Bereitstellung von Wärme zur Einspeisung ins Fernwärmenetz, Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser) nicht direkt mit einander zu vergleichen. Folgende allgemeine Schlussfolgerungen können jedoch trotzdem abgeleitet werden:

- Bei den Systemen mit oberflächennaher Geothermie mit Wärmepumpen hat die Art der Strombereitstellung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis auf Grund des Strombedarfs der Wärmepumpe. Für die Varianten mit österreichischem Strommix (mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energie) liegt die Treibhausgasreduktion im Vergleich zu den Referenzsystemen zwischen ca. 75% und 85%. Wird für die Strombereitstellung ein Erdgas Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) angenommen, ist die Einsparung deutlich geringer bzw. bei einem Fallbeispiel kann keine Einsparung im Vergleich zum Referenzsystem Fernwärme erzielt werden.
- Bei der Aufteilung der Treibhausgasemissionen auf die Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase der Systeme mit oberflächennaher Geothermie mit Wärmepumpe hat in allen Fallbeispielen die Betriebsphase den größten Anteil. D.h. in weiterer Folge, dass eine hohe Anlageneffizienz von großer Bedeutung ist und das Optimierungspotenzial bei den technischen Anlagenkonzepten noch genauer untersucht werden muss.
- In Hinblick auf den kumulierten Energieeinsatz zeigen die Ergebnisse, dass durch den Einsatz von Systemen mit oberflächennaher Geothermie mit Wärmepumpen der fossile Energieanteil reduziert werden kann, vorausgesetzt der verwendete Strom stammt nicht so einem großen Teil aus fossilen Quellen.

Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung erfolgte auf Basis der Berechnung der Jahreskosten für die Wärmebereitstellung aus Grundwasser (Fallbeispiele Innenstadt-West und Olympiawiese) und aus Erdwärmesonden mit Regeneration durch Solarwärme (Fallbeispiel Hafnerstraße).

Die Wärmegestehungskosten für die Nutzung von Grundwasser liegen für die untersuchten Fallbeispiele im Bereich von 47 bis 57 €/MWh und sind vor allem abhängig von erforderlichen Investitionskosten und den Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe. Je niedriger die Temperaturen für die Heizungsanlage sind (Fallbeispiel Olympiawiese), desto höher ist die Effizienz der Wärmepumpen und dadurch niedrig die Stromkosten für den Betrieb. Bei vorgegebener hoher Temperatur (Einspeisung in das Fernwärmenetz, Fallbeispiel Innenstadt-West) sinkt die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und damit bestimmen die Stromkosten die Wärmegestehungskosten.

Bei Einsatz von Erdwärmesonden im Fallbeispiel Hafnerstraße variieren die Wärmegestehungskosten von 70 bis 106 €/MWh. Sie sind abhängig von den Investitionskosten für das Erdwärmesondenfeld, für die Solaranlage mit Speicher zur Regeneration und für die Errichtung einer Fernwärmeversorgung der zu versorgenden Objekte. Da die Annuität der Investitionskosten entscheidend für die Wärmegestehungskosten ist, kommt der Optimierung des Energiekonzeptes (Größe der Solaranlage oder Nutzung von kostengünstiger Abwärme, Wärmenetz ja oder nein) eine entscheidende Rolle zu. Zusätzlich ist bei Versorgung von bestehenden Gebäuden eine hohe Vorlauftemperatur notwendig. Das beeinflusst die Wärmegestehungskosten durch hohe Stromkosten wegen der geringeren Effizienz der Wärmepumpe.

Diese berechneten Gestehungskosten sind nicht vergleichbar mit den bekannten Preisvergleichen für Energieträger, die sich auf private Nutzung in Haushalten beziehen (siehe Propellts, 2016). Ausgehend von einem durchschnittlichen Gaspreis für Gewerbe (siehe E-Control, 2016) errechnet sich ein Vergleichspreis für Wärme aus Erdgas (bei einem angenommenen Jahresnutzungsgrad von 85 %) von etwa 35 bis 40 €/MWh.

Methodik zur koordinierten Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme

Die im Projekt entwickelte Methodik zur koordinierten Nutzung und Bewirtschaftung oberflächennaher Erdwärme beinhaltet eine strukturierte Vorgehensweise für die Umsetzung von Erdwärmeprojekten in städtischen Gebieten. Die Methodik bezieht sich primär auf die Projektplanung und beinhaltet wesentliche Aspekte wie Untergrundeigenschaften, Beeinflussung bestehender Nutzungen, Auswirkungen auf die Grundwasserqualität, Wärmegestehungskosten und Emissionsveränderungen im Vergleich zu anderen Energieversorgungskonzepten. Sie wurde auf Basis der Modellregion Graz entwickelt, ist jedoch universell für städtische Gebiete in Österreich anwendbar.

4 Ausblick und Empfehlungen

Zukünftiger Forschungsbedarf

Weiterführende Erhebungen und Bewertungen des thermischen, chemischen und ökologischen Zustands des Grundwasserkörpers in urbanen Gebieten in Österreich wird als wichtiger Schritt für zukünftige Bewirtschaftungskonzepte gesehen, in denen z.B. Temperaturgrenzen für die thermische Nutzung des Grundwassers flexibler und in Abhängigkeit der lokalen Bedingungen gesetzt werden sollten, um eine verbesserte Nutzung zu erzielen. Im Bereich der Grundwassermodellierung besteht im speziellen Forschungsbedarf bei der Wärmeeinbringung durch tiefe Einbauten. Dies ist derzeit in Modellen nicht ausreichend erfasst, hat aber in gewissen Stadtbereichen bereits jetzt einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwassertemperatur. Eine weitere Forschungsfrage betrifft die Grundwasserneubildung in Stadtgebieten. Im Gegensatz zu ländlichen Gebieten sind die stark anthropogen beeinflussten Bodentypen nicht bekannt. Zu erheben und zu bewerten wären auch die Bereiche, die in die Regenwasserkanalisation entwässern und der Einfluss der im Sinne des Hochwasserschutzes im Zuge von Bauvorhaben forcierten Versickerung von Oberflächenwässern.

Im Bereich der Wärmepumpentechnologien besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um höhere Vorlauftemperaturen bei einem wirtschaftlichen COP zu ermöglichen.

Das Thema der Langzeitspeicherung von Wärme im Untergrund gewinnt zunehmend an praktischer Bedeutung (z.B. Projekt „Big Solar“ in Graz, aber auch die Speicherung von Gebäudeabwärme im Untergrund unter den Gebäuden mittels Erdwärmesonden oder Energiepfählen). Hier sind begleitende Forschungsarbeiten wichtig, um mehr Erkenntnisse über den Einfluss solcher Speicher auf die Untergrundtemperaturen und falls vorhanden den Grundwasserkörper zu erlangen. Weiters werden Messungen der Untergrundtemperaturen zur Verifizierung und Kalibrierung der bestehenden Simulationsmodelle empfohlen.

Im Bereich der Energieraumplanung besteht Bedarf an der Entwicklung, dem Aufbau und der laufende Aktualisierung einer „Energiedatenbank“ auf Basis derer der Wärme- und Kühlbedarf und Wärmequellen (z.B. Abwärme, Solar) für urbane Bereiche bestimmt werden kann.

Aufbauend auf den Projektarbeiten stellt sich die Frage, wie hoch das Gesamtpotenzial der oberflächennahen Geothermie für eine städtisches Gebiet ist und welchen Beitrag oberflächennahe Geothermie bei der städtischen Wärmeversorgung leisten kann. Aussagen zu großflächigen Potenziale können nur getroffen werden, wenn weiterführende Informationen vorliegen (z.B. eine Energiedatenbank oder die Bewertung des Grundwasserkörpers in urbanen Gebieten in Österreich).

Empfehlungen für Stadtentwicklungsprojekte und Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Eine generelle Empfehlung die sich aus den Projektergebnissen ableiten lässt, ist die weitere Forcierung des Einbaus von Niedertemperatur-Wärmeabgabesystemen sein. Die könnte zukünftig eine Vorgabe in Baugesetzen, Förderrichtlinien und Ausschreibungen sein, um zumindest im Neubaubereich eine effiziente Anwendung von oberflächennaher Erdwärme in Kombination mit Wärmepumpen zu ermöglichen.

Bei Stadtentwicklungsprojekten bzw. größeren Neubauvorhaben sollte die Prüfung von Untergrundeigenschaften für Geothermienutzung als Standardinstrument eingeführt werden (siehe auch Kapitel „2.4.1 Neue Energieversorgung – Rahmenbedingungen“). In weiterer Folge könnten Vorranggebiete für die Geothermienutzung ausgewiesen (analog zum Fernwärmevorrang) werden.

Die Projektergebnisse haben gezeigt, dass das Potenzial für Demonstrationsvorhaben vor allem im Neubaubereich zu suchen ist, da hier bessere Rahmenbedingungen geschaffen werden können (Optimierung Bedarf, Bereitstellung und Verteilung). Die Betrachtung von Lebenszykluskosten und weitere „Ökologisierung der Förderbedingungen“ könnte wirtschaftliche Hemmnisse wie höhere Investitionskosten relativieren. Ein Hemmnis für die Umsetzung von Demonstrationsprojekten stellt der Auftrag der Wohnbauträger dar, Investitionskosten gering zu halten. Betriebskosten werden oft nicht berücksichtigt, u.a. auch weil diese für längere Zeiträume schwer vorhersehbar sind (Preisentwicklung).

Die Ergebnisse zu den Fallbeispielen könnten die Basis für zukünftige Demonstrationsvorhaben in der Modellregion Graz bilden. Um eine Entscheidung über ein Demonstrationsvorhaben treffen zu können, sind jedoch noch folgende Schritte vorab zu untersuchen:

- Untersuchung von weiteren Varianten zur technischen Anlagenauslegung und Optimierung.
- Untersuchungen der thermischen Einflüsse (Grundwasser, Untergrund) und Grundwasserneubildung: Dies ist möglich für alle urbanen Räume in Gebieten mit guter Datenlage und vorhandenen Grundwassermodellen, andere Beispiele neben Graz sind Klagenfurt, Salzburg.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erdwärmepotenzial – Tiefenlage und Nutzungsmöglichkeiten	18
Abbildung 2: Temperaturzunahme mit der Tiefe (Bockelmann et al., 2011).....	19
Abbildung 3: Prinzipien für den Erdwärmeentzug ohne Wasserentnahme aus dem Untergrund: Erdwärmesonden, Energiepfähle, Bodenabsorber/Kollektoren (Bockelmann et al., 2011)	21
Abbildung 4: Prinzip einer Erdwärmesonde (Bockelmann et al., 2011).....	21
Abbildung 5: Wichtigsten Bauformen einer Erdwärmesonde (Bockelmann et al., 2011)	21
Abbildung 6: Bau eines Erdwärmesondenfeldes (Fotos: G. Domberger)	22
Abbildung 7: Prinzipskizze eines Energiepfahls (Bockelmann et al., 2011).....	24
Abbildung 8: Thermische Nutzung von Grundwasser (Bockelmann et al., 2011).....	25
Abbildung 9: Anwendungskonzept zur Nutzung von Erdwärme ohne Wasserentnahme	26
Abbildung 10: Anwendungskonzept zur Nutzung von Erdwärme mit Wasserentnahme.....	27
Abbildung 11: Wärmeflüsse bei saisonaler Speicherung im Sommerbetrieb (Gebäudekühlung) und im Winterbetrieb (Gebäudeheizung) (Bockelmann et al., 2011).....	28
Abbildung 12: Regeneration und Saisonspeicherung bei Erdwärmesonden (Huber Energietechnik AG, aus Naef, 2015)	28
Abbildung 13: Übersicht von Wärmequellen zur Regeneration von Erdsondenfeldern bzw. Saisonspeicherung (Naef, 2015)	29
Abbildung 14: Anwendungskonzept zur indirekten Nutzung von Erdwärme mit Wärmespeicherung im Untergrund aus Solarenergie	30
Abbildung 15: Modellgeometrie und Elementenetz des Grundwassermodells Grazer Feld ..	33
Abbildung 16: Grundwassermodell Grazer Feld – Nordteil, Grundwasserisohypsen (Strömungsrichtung im rechten Winkel dazu)	34
Abbildung 17: Grundwassermodell Grazer Feld – Nordteil, Grundwassermächtigkeiten.....	35
Abbildung 18: Grundwassermodell Grazer Feld – Nordteil, Durchlässigkeiten	36
Abbildung 19: Grundwassertemperaturmessnetz der Hydrographischen Landesabteilung im Raum Graz.....	37
Abbildung 20: Trinkwasserschutzgebiete im Raum Graz (GIS Steiermark, 2015).....	38
Abbildung 21: Wasserrechte (GIS Steiermark, 2015)	39
Abbildung 22: Trinkwasserschongebiete im Raum Graz (GIS Steiermark, 2015).	40
Abbildung 23: Thermische Situation Grundwasser Graz-West und Graz-Ost (Geologie & Grundwasser GmbH 2009 und 2012).	41
Abbildung 24: Vorgeschlagene Verbotszone im Stadtzentrum von Graz für Anlagen, bei denen Grundwasser zur Gebäudekühlung verwendet wird (G. Giuliani et al., 2012)	42
Abbildung 25: Prozess der Wärmebedarfsermittlung für die Fallbeispiele.....	45
Abbildung 26: Gebäudeeigenschaften im AGWR (Statistik Austria, 2014).....	47
Abbildung 27: ZEUS-Datenbank für Energieausweise, Online Portal (Land Steiermark, 2016)	47

Abbildung 28: Austrian Heat Map – Gebiet Graz, (Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2015).....	48
Abbildung 29: Beispiel für Objekt, das nur bei vor-Ort Besichtigung als ungenutzt identifiziert werden konnte.....	50
Abbildung 30: Beispiel Darstellung Solardachkataster für das Fallbeispiel Hafnerstraße (Magistrat Graz - Stadtvermessung, 2016).....	52
Abbildung 31: Luftbilddarstellung (Bing, 2016) und Darstellung aus Digitaler Atlas Steiermark (2016).....	52
Abbildung 32: Flächenwidmungsplan und Stadtentwicklungskonzept sind über die Homepage der Stadt Graz frei verfügbar (Magistrat Graz, 2016).....	53
Abbildung 33: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse bei Errichtung, Betrieb und Entsorgung.....	56
Abbildung 34: Großgeologische Eigenschaften des Untergrunds für die Nutzung oberflächennaher Geothermie.....	62
Abbildung 35: Übersichtskarte mit 13 Gebietsvorschlägen.....	65
Abbildung 36: Luftbild Fallbeispiel Innenstadt – West (Google Maps, 2016).....	68
Abbildung 37: konditionierte Flächenanteile entsprechend Nutzung im Fallbeispiel „Innenstadt West“; in sonstiger Nutzung enthalten: Groß- und Einzelhandelsgebäude, Gebäude des Verkehrs- und Nachrichtenwesens, Gebäude für Kultur- und Freizeitzwecke sowie das Bildungs- und Gesundheitswesen.....	69
Abbildung 38: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Innenstadt – West“ ..	70
Abbildung 39: Geforderte Vorlauf-Mindestsoll-Temperatur bei Einspeisern in das Grazer Fernwärmenetz in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Energie Graz GmbH & CO KG, 2011).....	70
Abbildung 40: Stundenmittelwerte der Außentemperatur über 10 Jahre (2005 bis 2014 für den Standort Graz Nord (eigene Auswertungen auf Basis von Land Steiermark, 2016).....	71
Abbildung 41: 3D-Übersicht des Standortes Hafnerstrass.....	72
Abbildung 42: Luftbild Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (Google Maps, 2016).....	73
Abbildung 43: 5.310 m ² Dachflächen von Büro- und Gewerbebauten der Kategorie „sehr gut geeignet“ laut Solardachkataster der Stadt Graz (Magistrat Graz – Stadtvermessung, 2016).....	74
Abbildung 44: konditionierte Flächenanteile für Nutzung Wohnen und Büro im Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (Flächenanteil ohne Gewerbebetriebe).....	75
Abbildung 45: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Hafnerstraße“ ..	76
Abbildung 46: Prinzip einer Duplexsonde.....	77
Abbildung 47: Lage des Erdwärmesondenfeldes am Standort Hafnerstraße.....	77
Abbildung 48: Detaildarstellung des Erdwärmesondenfeldes am Standort Hafnerstraße.....	78
Abbildung 49: Luftbild Fallbeispiel „Olympiawiese“ (Google Maps, 2016).....	80
Abbildung 50: Auszug 3.0 Flächenwidmungsplan - Fallbeispiel Olympiawiese (Magistrat Graz - Stadtplanung, 2016).....	81
Abbildung 51: Auszug Stadtentwicklungskonzept 4.0 (STEK 4.0) - Fallbeispiel Olympiawiese (Magistrat Graz - Stadtplanung, 2016).....	82
Abbildung 52: Prinzipskizze Energieversorgungskonzept Fallbeispiel „Olympiawiese“ ..	85

Abbildung 53: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Innenstadt-West“	88
Abbildung 54: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)	88
Abbildung 55: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	88
Abbildung 56: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	89
Abbildung 57: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	90
Abbildung 58: Innenstadt-West - Auf Basis der Energiebedarfserhebung ermittelter mittlerer Jahresgang der Grundwasserentnahme aus einem fiktiven Brunnen.	91
Abbildung 59: Innenstadt-West – Lage der fiktiven Entnahme- und Einspeisungsstellen, Messstellen und bestehender Wasserrechte	93
Abbildung 60: Innenstadt-West - Grundwasserflurabstände, Grundwasserpotentiallinien und Finite-Elemente-Netz des Detailmodells.	94
Abbildung 61: Randbedingung Lufttemperatur und Wassertemperatur der Mur	95
Abbildung 62: Grundwassertemperaturen Messwerte Innenstadt-West.....	95
Abbildung 63: Innenstadt-West, Vergleich der gemessenen und simulierten Grundwassertemperaturen	95
Abbildung 64: Innenstadt-West, Temperaturverteilung bei Entnahme und Einspeisung	96
Abbildung 65: Innenstadt-West, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung ...	97
Abbildung 66: Innenstadt-West, Temperaturdifferenzen bei Entnahme und Einspeisung	97
Abbildung 67: Innenstadt-West, Absenkung und Aufhöhung des Grundwasserspiegels.....	98
Abbildung 68: Prozesse im Grundwasser die durch Temperaturveränderungen maßgeblich beeinflusst werden	99
Abbildung 69a und b: Simulierte Veränderung der Sättigungsindizes von Calcit und Aragonit und des pH-Wertes bei (a) Erwärmung und Abkühlung (b) um 5°C.....	100
Abbildung 70: Gemessene natürliche Schwankungen der Sättigungsindizes von Calcit und Aragonit im Zeitraum von 1992 – 2014.....	100
Abbildung 71: Anpassung von Mikroflora und Meiofauna an verschiedene Temperaturbereiche (nach Brielmann et al., 2009).....	101
Abbildung 72: Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiele „Hafnerstraße“	103
Abbildung 73: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesondenfeld mit Wärmepumpe und Solaranlage in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)	103

Abbildung 74: Kumulierter Energieaufwand für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiele „Hafnerstraße“	104
Abbildung 75: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“	105
Abbildung 76: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“	105
Abbildung 77: FEFLOW-Umsetzung des Erdwärmesondenfeldes für 3D-Simulation.....	107
Abbildung 78: Übersicht des Erdwärmesondenfeldes und der Beobachtungspunkte der Simulation	108
Abbildung 79: Simulierter Temperaturverlauf von Beobachtungspunkten in 100m Tiefe.....	108
Abbildung 80: Temperaturverteilung im Untergrund nach 10 Jahren Nutzungsdauer – Vergleich mit saisonaler Regeneration und ohne Regeneration	109
Abbildung 81: Änderung der Untergrundtemperaturen in 100m Tiefe	110
Abbildung 82: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“	112
Abbildung 83: Aufteilung der Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe in Errichtungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase für verschiedene Arten der Strombereitstellung für das Fallbeispiel „Olympiawiese“ (links: Strommix AT; rechts: Strom aus Erdgas GuD)	112
Abbildung 84: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“	113
Abbildung 85: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	114
Abbildung 86: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsbereichen Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	114
Abbildung 87: Aufteilung der Jahreskosten nach Kostenarten Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	115
Abbildung 88: Aufteilung der Jahreskosten nach Investitionsanteilen Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	115
Abbildung 89: Olympiawiese - Auf Basis der Energiebedarfserhebung ermittelter mittlerer Jahresgang der Grundwasserentnahme fiktiven Brunnen für Neubauten und ein mögliches weiteres Potenzial an Neubauten.	117
Abbildung 90: Olympiawiese - Grundwasserflurabstände, Grundwasserpotentiallinien und Finite-Elemente-Netz des Detailmodells	119
Abbildung 91: Olympiawiese - Lage der fiktiven Entnahme- und Einspeisungsstellen und bestehender Wasserrechte und Messstellen	120
Abbildung 92: Grundwassertemperaturen Messwerte Olympiawiese	121
Abbildung 93: Olympiawiese, Beispiel Vergleich der gemessenen und simulierten Grundwassertemperaturen	121

Abbildung 94: Olympiawiese, Temperaturverteilung bei Entnahme und Einspeisung bei der Variante einer Entnahme.....	122
Abbildung 95: Olympiawiese, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung (SO)	122
Abbildung 96: Olympiawiese, Grundwassertemperatur bei Entnahme und Einspeisung (NW)	123
Abbildung 97: Olympiawiese, Temperaturdifferenzen bei Entnahme und Einspeisung.	123
Abbildung 98: Olympiawiese, Absenkung und Aufhöhung des Grundwasserspiegels	124
Abbildung 99: Methodik für eine koordinierte Nutzung und Bewirtschaftung von oberflächennaher Erdwärme in städtischen Gebieten.....	126
Abbildung 100: Prozess der Wärme- und Kühlbedarfsermittlung	129
Abbildung 101: WebGIS-Graz – Stadtentwicklungskonzept 4.0.....	151
Abbildung 102: WebGIS-Graz – Flächenwidmungsplan	151
Abbildung 103: WebGIS-Graz – Weltkulturerbe.....	152
Abbildung 104: WebGIS-Graz - Stadtklima.....	153
Abbildung 105: WebGIS-Graz - Bohrpunkte und Baugrundkarte	154
Abbildung 106: WebGIS-Legende (Solardachkataster)	155
Abbildung 107: Screenshot – Solarkataster WebGIS Graz.....	155

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen zu Wärmeentzug und Wärmeeintrag verschiedener Nutzungstechnologien von oberflächennaher Erdwärme (Bockelmann et al., 2011).....	23
Tabelle 2: Möglichkeiten der indirekten und direkten Erdwärmenutzung mit und ohne Wasserentnahme für die Modellregion Graz.....	26
Tabelle 3: Zusammenfassung des Heizwärmebedarfs in kWh/m ² a je Baualter und Gebäudekategorie (Bestand/saniert)	49
Tabelle 4: Übersicht über Funktion und untersuchte Systeme für die Fallbeispiele.....	54
Tabelle 5: Untersuchte Treibhausgase und deren CO ₂ -Äquivalenzfaktoren (inkl. Climate Carbon Feedback) (IPCC, 2013)	55
Tabelle 6: Energieträgermix für 85% der für den Endverbrauch abgegebenen Strommenge in Österreich im Jahr 2014 lt. Stromkennzeichnungsbericht (E-Control, 2015).....	57
Tabelle 7: Energieträgermix für die Fernwärmeerzeugung in Graz im Jahr 2013 (eigene Berechnung basierend auf VERBUND Thermal Power, 2014 und Expertenschätzung)	58
Tabelle 8: Nutzungsdauer der Anlagenteile zur Berechnung der Annuität	60
Tabelle 9: Angenommene Prozentsätze zur Berechnung der Betriebsgebundenen Kosten .	60
Tabelle 10: Überblick zu den drei ausgewählten Fallbeispielen	67
Tabelle 11: Wärme- und Kühlbedarf im Fallbeispiel „Innenstadt-West“	69
Tabelle 12: Grundwassertemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2006 – 2012) und Fernwärme-Vorlauf-Temperatur	70
Tabelle 13: Übersicht Basisdaten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	71

Tabelle 14: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	71
Tabelle 15: Wärme- und Kühlbedarf im Fallbeispiel „Hafnerstraße“ für Nutzung Wohnen und Büro	75
Tabelle 16: Soletemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2011 – 2013) und Netz-Vorlauftemperatur	75
Tabelle 17: Übersicht Basisdaten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“	78
Tabelle 18: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“	78
Tabelle 19: Flächenermittlung Bruttogeschossflächen für Wohnbau.....	83
Tabelle 20: Wärmebedarf Neubauten.....	83
Tabelle 21: Anforderung an den Heizwärmebedarf im Neubau (Wohngebäude) laut OIB Richtlinie 6 (Österr. Institut für Bautechnik, 2015).....	84
Tabelle 22: Anforderungen an den Heizwärmebedarf laut Richtlinien für die ökologische Wohnbauförderung, Maximal zulässiger jährlicher Heizwärmebedarf Super-Niedrigenergiehaus (Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abt15 – Fachabteilung Energie und Wohnbau, 2015).....	84
Tabelle 23: Übersicht Wärmebedarf im Gebiet	84
Tabelle 24: Grundwassertemperatur im Monatsmittel (Durchschnittswert der Jahre 2012 und 2013) und Wärme-Vorlauf-Temperatur	85
Tabelle 25: Übersicht Basisdaten für Variante „Neubaugebiet“ und „Potenzial“	86
Tabelle 26: Übersicht Wärmeerzeugung und Stromverbrauch für Variante „Neubaugebiet“ und „Potenzial“	86
Tabelle 26: Grunddaten für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“	89
Tabelle 27: Innenstadt-West - Relevante Wärmetransportparameter	92
Tabelle 28: Grunddaten für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“.....	105
Tabelle 29: Investitionskosten und Ergebnisse bei unterschiedlichen Annahmen für das Energieversorgungskonzept für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“	106
Tabelle 30: Grunddaten Variante „Neubaugebiet“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	113
Tabelle 31: Grunddaten Variante „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	114
Tabelle 32: Investitionskosten und Ergebnisse für die Varianten „Neubaugebiet“ und „Potenzial“ für das Fallbeispiel „Olympiawiese“	116
Tabelle 33: Olympiawiese - Relevante Wärmetransportparameter	118
Tabelle 34: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Innenstadt-West“	157
Tabelle 35: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Innenstadt-West“	157
Tabelle 36: Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiele „Hafnerstraße“	158

Tabelle 37: Kumulierter Energieaufwand für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiele „Hafnerstraße“	158
Tabelle 38: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“	158
Tabelle 39: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiele „Olympiawiese“	159

5.3 Literaturverzeichnis

Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abt15 – Fachabteilung Energie und Wohnbau: Richtlinien für die ökologische Wohnbauförderung, Stand 14.04.2015

http://www.wohnbau.steiermark.at/cms/dokumente/12111495_113384013/2e48f038/20150414_%C3%96kologische%20Wohnbauf%C3%B6rderung_g%C3%BCltig.pdf (Version vom 14.04.2015) abgerufen am 09.04.2016; 10:15

Amtmann Maria, Groß Maike: Tabula – Typologie österreichischer Wohngebäude. Österreichische Energieagentur, 2011

Arning E, Kölling M, Schulz HD, Panteleit B & Reichling J: Einfluss oberflächennaher Wärmegegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. Grundwasser 11, 27–39. 2006.

Austrian Standards: ÖNorm B8110-5 Wärmeschutz im Hochbau Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile, 2011

Bing. Online-Karten

<http://www.bing.com/maps/#Y3A9NDcuMDU1MDAwfjE1LjQ0NjcwMCZsdmw9NyZzdHk9ciZ3aGVyZTE9cHVudGlnYW1lcnN0cmEIQzMIQUZlJTlwODglMjBncmF6> (abgerufen am 01.08.2016, 16:02)

Bockelmann Franziska, Fisch Norbert M., Kipry Herdis: Erdwärme für Bürogebäude nutzen – BINE-Fachbuch – Fraunhofer IRB-Verlag, 2011.

Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R. and Lueders, T. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. FEMS Microbiology Ecology 68, 273-286. 2009.

Brielmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P. and Griebler, Shallow C: Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. Grundwasser 16, 77-91, 2011.

Brons H.E., Griffioen J., Appelo C.A.J., Zehnder A.J.B.: (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res* 25: 729–736, 1991.

Brunner C., Heigl E., Slawitsch B.: Abwärmekataster für die Stadt Graz und ausgewählte Umlandgemeinden. Joanneum Research, 2009

Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft: Austrian Heat Map - Gebiet Graz, <http://www.austrian-heatmap.gv.at/karte/> (abgerufen am 01.08.2016; 13:31)

CEN/CENELEC: CEN/CENELEC Workshop Agreement – Manual of Determination of Combined Heat and Power (CHP), 2004.

Dalla-Via Andreas & Harum Till: Grazer Feld: Risikozonen hoher Grundwasserstände.- Unveröff. Bericht JOANNEUM RESEARCH, 34 S, Graz, 2015.

Diersch H.-J.G.: DHI-WASY Software FEFLOW. Finite element subsurface flow & transport simulation system. Reference Manual, DHI-WASY GmbH, Berlin, 2009.

Digitaler Atlas Steiermark. Planung & Kataster:

[http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(oa00jl1hqw2af2hetvx3nj4o\)\)/init.aspx?karte=kat&ks=das&cms=da&massstab=800000](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(oa00jl1hqw2af2hetvx3nj4o))/init.aspx?karte=kat&ks=das&cms=da&massstab=800000) (abgerufen am 01.08.2016, 16:05)

Ecoinvent: Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B.: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230, 2016.

E-Control: Stromkennzeichnungsbericht 2015. https://www.e-control.at/documents/20903/388512/Stromkennzeichnungsbericht_2015.pdf (abgerufen am 01.09.2016, 09:34)

E-Control: Gaspreise für Gewerbekunden. <https://www.e-control.at/industrie/gas/gaspreis/gewerbepreise> (abgerufen am 22.12.2016, 10:38)

Energie Graz GmbH & CO KG: Technische Anschlussbedingungen Fernwärme, Ausgabe 2011.

Engeler I., Hendricks Franssen H.J., Müller R., Stauffer F.: The importance of coupled modelling of variably saturated groundwater flow-heat transport for assessing river-aquifer interactions. *J. Hydrol.* 397:295-305. 2011.

Epting J., Händel F., Huggenberger P.: Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrol Earth Syst Sci* 17:1851-1869. 2013.

Ferguson G., Woodbury A. D.: Urban heat island in the subsurface. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34 (23), L23713, 2007.

Ferguson G.: Heterogeneity and Thermal Modeling of Ground Water. *GROUND WATER* 45(4):485-490. 2007.

Ferguson G., Woodbury A. D.: Urban heat island in the subsurface. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34 (23), L23713. 2007.

Geiger-Kaiser M., Gross R., Steidl T., Valentin G.: Leitfaden Grundwasserwärmepumpen. Unterlagen zur wasserrechtlichen Einreichung. – Land Salzburg, Reihe Gewässerschutz, Bd. 21. 2014.

GEMIS – Globales Emissions Modell Integrierter Systeme: Version 4.94, Standard-Datensatz, IINAS – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien: <http://iinas.org/gemis-de.html>, 2015.

GEMIS - Österreich: Globales Emissions Modell Integrierter Systeme für Österreich, Österreich-Datensatz, Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.at/ueberuns/produkte/gemis/>, 2009.

GEOLOGIE & GRUNDWASSER GmbH: Erhebung und Potentialanalyse der geothermischen Nutzung des Grundwassers im Raum Stadt Graz westlich der Mur.- Publ. Report, 180 p, Graz, 2009.

GEOLOGIE & GRUNDWASSER GmbH: Erhebung und Potentialanalyse der geothermischen Nutzung des Grundwassers im Raum Stadt Graz östlich der Mur.- Publ. Report, 265 p, Graz, 2012.

GEOLOGIE & GRUNDWASSER GmbH: Erhebung und Potentialanalyse der geothermischen Nutzung des Grundwassers im südlichen Grazer Feld.- Publ. Report, 307 p, Graz, 2014.

GIS Steiermark: GIS-Daten, Wasserbuch, Schutz- und Schongebiete, Laserscan. 2015.

Google Maps: <https://www.google.at/maps/@47.0838007,15.4934076,13z> (abgerufen am 16.09.2016, 14:46)

Griffioen J. & Appelo C. A. J.: Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Appl. Geochem* 8, 161–176. 1993.

Haehnlein S., Bayer P., Blum P.: International legal status of the use of shallow geothermal energy.- *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2611–2625. 2010

Hähnlein S., Bayer P., Ferguson G., Blum P.: Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59 (2013) 914-925. 2013.

Händel F.: Modellierung von Wärmetransport für flache Grundwasserleiter. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden, 145 S. 2010.

Händel F., Liedl R. Fank J. & Rock G.: Regional modeling of geothermal energy systems in shallow aquifers: the Leibnitzer Feld case study (Austria).- *Environ Earth Sci DOI* 10.1007/s12665-013-2469-x. 2013.

Hanschke Th.: Einsatz von FEFLOW für die Berechnung des Nutzungspotentials der oberflächennahen Geothermie anhand von Beispielobjekten aus der Stadt Rostock.- Kurzfassung des Vortrags zur 5.Fachtagung der WASY GmbH Berlin, 13.11.2002-14.11.2002 Titel: „Grafikgestützte Grundwassermodellierung“. 2002.

Harum T., Dalla-Via A. & Draxler J.-C.: Kollaudierung FB Grundwasser KW Gössendorf – Kalsdorf - Überprüfung der Beweissicherung Grundwasser.- Unveröff. Bericht, Joanneum Research, 149 S, Graz, 2015.

Harum T., Dalla-Via A., Rock G., Leis A. & Ruch C.: Murkraftwerk Graz, Einreichprojekt zum UVP Verfahren.- Veröff. Ber., JOANNEUM RESEARCH, Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, 179 S., 81 Abb., 25 Tab., 26 Karten, 6 Beilagen, Graz, 2011.

Harum T., Rock G., Dalla-Via A., Leditzky H.P. & Ruch C.: Wasserkraftwerke Gössendorf und Kalsdorf: Unterlagen zur Genehmigung gem. § 17 Abs. 1 UVP-G 2000 i.d.g.F.: Band 4: Grundwasser 401 Fachgutachten Grundwasser Textteil Nachbesserungen.- Veröff. Ber., JOANNEUM RESEARCH: Institut für WasserRessourcenManagement und Geoteam, 207 S., 124 Abb., 5 Anhänge, Graz, 2007.

Hidalgo J.J., Carrera J., Dentz M.: Steady state heat transport in 3D heterogeneous porous media. *Advances in Water Resources* 32:1206-1212. 2009.

Hydrographische Landesabteilung Steiermark: Grundwasserspiegeldaten Grazer Feld, Abflussdaten der Mur, Niederschlag und Lufttemperatur der Station Graz-Universität. 2015.

Ingerle K.: Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen, *Österreichische Wasserwirtschaft* 40 H. 11/12. 1988.

IPPC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Naules, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

Kapfenberger-Pock Anneliese: Grazer Solardachkataster (Solarthermie bzw. Photovoltaik) Projektbeschreibung.

http://www.geoportal.graz.at/cms/dokumente/10189544_5163127/2fa6d060/SOLAR_INFO_aktuell.pdf (abgerufen am 08.05.2016, 11:12)

Kommunalkredit Public Consulting. Abwärmepotentialerhebung 2012

<http://www.waermeatlas.at/> (abgerufen am 13.9.2016; 9:04),

Kupfersberger Hans: Heat transfer modelling of the Leibnitzer Feld aquifer, Austria. *Environ Earth Sci* 59:561–571. 2009

Land Steiermark. Landes-Umwelt-Informationssystem (LUIS), Onlinedaten Kontinuierliches und mobiles Messnetz, <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/ziel/2060750/DE/> (abgerufen am 09.06.2016)

- Ma R., Zheng C.: Effects of Density and Viscosity in Modeling Heat as a Groundwater Tracer. GROUND WATER 48(3):380-389. 2010
- Magistrat Graz - Stadtvermessung: Solardachkataster. 2016.
https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?client=core&project=solar_pv (abgerufen am 08.08.2016, 11:17)
- Magistrat Graz. 4.0 Stadtentwicklungskonzept. <http://www.graz.at/cms/ziel/5190711/DE/> (abgerufen am 08.08.2016; 11:53)
- Magistrat Graz. Flächenwidmungsplan: <http://www.graz.at/cms/ziel/3810656/DE/> und https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=flaewi_3&client=core (abgerufen am 08.08.2016; 11:58)
- Mandl Doris, Kapusta Friedrich: Auswertung der Ergebnisse der KMU-Scheck –Beratungen für sechs ausgewählte Branchen, Gastronomie, Lebensmitteleinzelhandel, Hotellerie, Einzelhandel Non Food, Friseure, Großhandel, Zusammenfassung. Energieinstitut der Wirtschaft, 2011
- Mandl Doris, Kapusta Friedrich: Auswertung der Ergebnisse der KMU-Scheck –Beratungen für sechs ausgewählte Branchen, Fleischer, Bäcker, Drucker, Metallverarbeiter, Tischler, KFZ-Betriebe, Zusammenfassung. Energieinstitut der Wirtschaft, 2011
- Menberg K., Bayer P., Blum P.: Elevated temperatures beneath cities: An enhanced geothermal resource. Conference Proceedings European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy 3-7 June 2013. 2013a.
- Menberg K., Bayer P., Zosseder K., Rumohr S., Blum P.: Subsurface urban heat islands in German Cities. Science of Total Environment 442 (2013) 123 – 133. 2013c.
- Menberg K., Blum P., Schaffitel A.; Bayer P.: Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island. Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 9747-9755. 2013b.
- Méndez, J.H., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P. (2010) Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. GROUND WATER 48(5):741-756. 2010.
- Naef, René: Regeneration von Erdsondenfeldern mit Solarwärme. Tagung Solarwärme Schweiz 2015, 30. Oktober 2015, Luzern, 2015.
- Nam Y., Ooka R.: Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment. Energy and Buildings 42:69-75. 2010.
- ÖNORM EN 15316-4-5: 2007 10 01: N. Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen – Teil 4-5: Wärmeerzeugungssystem, Leistungsfähigkeit und Effizienz von fernwärme- und großvolumigen Systemen. Wien, 2007.

Ostermann V., Götzl G., Steckler P., Zottl A., Heimrath R., Novak, A., Kalasek, R.: GEO-Pot: Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs. Überregionale, interdisziplinäre Potenzialstudie zur Erhebung und Darstellung des oberflächennahen geothermischen Anwendungspotenzials auf Grundlage eines regelmäßigen Bearbeitungsrasters. Publizierbarer Endbericht des Programms Energie der Zukunft, Wien, 13.08.2010

Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB Richtlinie 6 – Energieeinsparung und Wärmeschutz. März 2015.

http://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/12393061_58813874/60342368/OIB-Richtlinie%206_2015.pdf (abgerufen am 09.06.2016; 10:13)

ÖWAV-Regelblatt 207 (2. Aufl.): Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen (2009)

Parkhurst D.L. & Appel C.A.J.: User's guide to PHREEQC (Version2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p. 1999.

Possemiers, M., Huysmans, M. O. Batelaan: Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. Journal of Hydrology: Regional Studies 2, p. 20-34. 2014.

ProPellets Austria: Aktueller Vergleich der Energieträger.

<http://www.propellets.at/de/pelletpreise/details/> (abgerufen am 22.12.2016; 10:35)

Rauch W. :Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. Universität Innsbruck, Innsbruck. 1992.

Schnitzer Hans, Schmied Johannes, Titz Michaela, Jägerhuber Paul, Enzi Claudia, Filzwieser Paul: Abwärmekataster Steiermark - Endbericht. Technische Universität Graz, 2012.

Stadt Zürich: RegenOpt – Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Schlussbericht 05/2015

Statistik Austria: Das ADRESS-GWR im Überblick. 2014.

Statistik Austria: Standard-Dokumentation Metainformation (Definitionen, Erläuterungen, Methoden, Qualität) zum Gebäude- und Wohnungsregister. 2013.

http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&dDocName=041634 (abgerufen am 12.09.2016; 8:47)

Statistik Austria: Zugang zum AGWR. 2016.

http://www.statistik.at/web_de/services/adress_gwr_online/zugang_zum_agwr/index.html (abgerufen am 01.08.2016; 10:16)

Statistik Austria: Energiebilanzen - Energiebilanzen für Österreich ab 1970 (endgültige Ergebnisse)

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (abgerufen 20.12.2016, 15:22)

Stumm W. & Morgan JJ.: Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons, New York, NY. 1995.

Taniguchi M., Uemura, T., Jago-on K.: Combined Effects of Urbanization and Global Warming on Subsurface Temperature in Four Asian Cities. *Vadose Zone J.* 2007, 6 (3), 591–596. 2007.

VDI-4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“ Blatt 1, Blatt 2, Blatt 3

VERBUND Thermal Power GmbH & Co KG in Liqu.: FHKW Mellach/Neudorf-Werndorf, Umwelterklärungen 2014. 30.06.2014.

Würdemann H. & Blum P.: Editorial – Oberflächennahe Geothermie: Regelungsbedarf zur Berücksichtigung ökologischer und technischer Aspekte? *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* (2011) 16:67-68. 2011.

ZAMG (2015): Klimadaten und Grasreferenzverdunstung der Station Graz-Flughafen. 2015.

ZEUS-Datenbank für Energieausweise. Portal

<https://stmk.energieausweise.net/zeus/auth/login/?backurl=%2Fzeus%2Fprofile%2F> (abgerufen am 01.08.2016; 15:30)

Zhou Y., Zhou Z.: Simulation of thermal transport in aquifer: a GWHP system in Chengdu, China. *Journal of Hydrodynamics* 21(5):647-657. 2009

Zhu K., Bayer P., Grathwohl P., Blum P.: Groundwater temperature evolution in the subsurface urban heat island of Cologne, Germany. *Hydrol. Process*, DOI: 10.1002/hyp.10209. 2014

6 Anhang

6.1 Anhang 1 - GIS-Datengrundlagen

6.1.1 Digitales Geländemodell, digitales Oberflächenmodell (Rasterdatensatz)

Vom GIS-Steiermark wurde für die Projektbearbeitung die GIS-Datensätze des digitalen Geländemodells (DGM) und des digitalen Oberflächenmodell (DOM) herangezogen. Die Datensätze sind frei verfügbar und bilden eine gute Grundlage als Kartengrundlage aber auch als Analysegrundlage (z.B. zur Analyse der Gebäudehöhen).

Laserscan (hochauflösend) – DGM und DOM wäre ideal

6.1.2 Luftbilder, Satellitenaufnahmen

6.1.3 Basiskarten

- Graz-Topografie
- Graz-Stadtplan
- Graz-Straßen

6.1.4 Bestehende Infrastruktur

Die infrastrukturellen Rahmenbedingungen sind eine zentrale Basis für die Analyse und Darstellung des Bedarfs und der Möglichkeiten für den Aufbau von Energieversorgungssystemen. Für die Nutzung von Erdwärme sind weiters Freiflächen erforderlich, auf welchen Erdwärmennutzungssysteme errichtet werden können.

Folgende Infrastrukturkomponenten sind dabei von Bedeutung:

- Gebäudebestand
- Grundstücksbestand
- Verwaltungsgrenzen (Gemeindegrenzen, Bezirksgrenzen)
- Straßennetz
- Beschränkungszonen (Altstadtbereiche, Weltkulturerbe etc, andere Nutzungsbeschränkungen)
- Altstadtschutzzonen
- Einschränkungen für die Errichtung von Solarflächen
- Tiefbauten wären von großer Bedeutung

6.1.5 Raumplanung, Stadt- und Siedlungsentwicklung

- Stadtentwicklungskonzept
- Raumplanung
- Flächenwidmungsplan

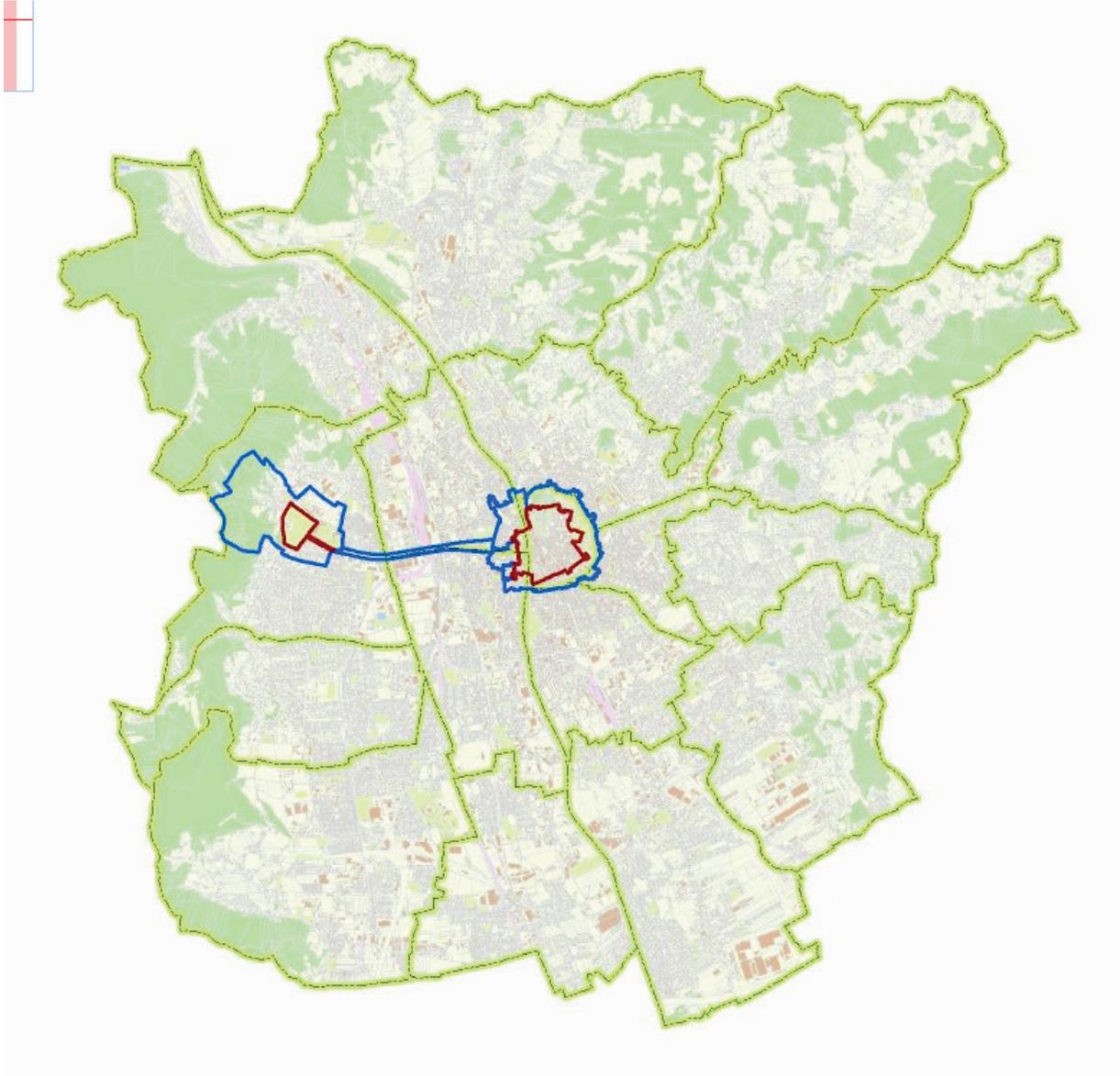


Abbildung 104: WebGIS-Graz – Weltkulturerbe

6.1.6 Stadtklima

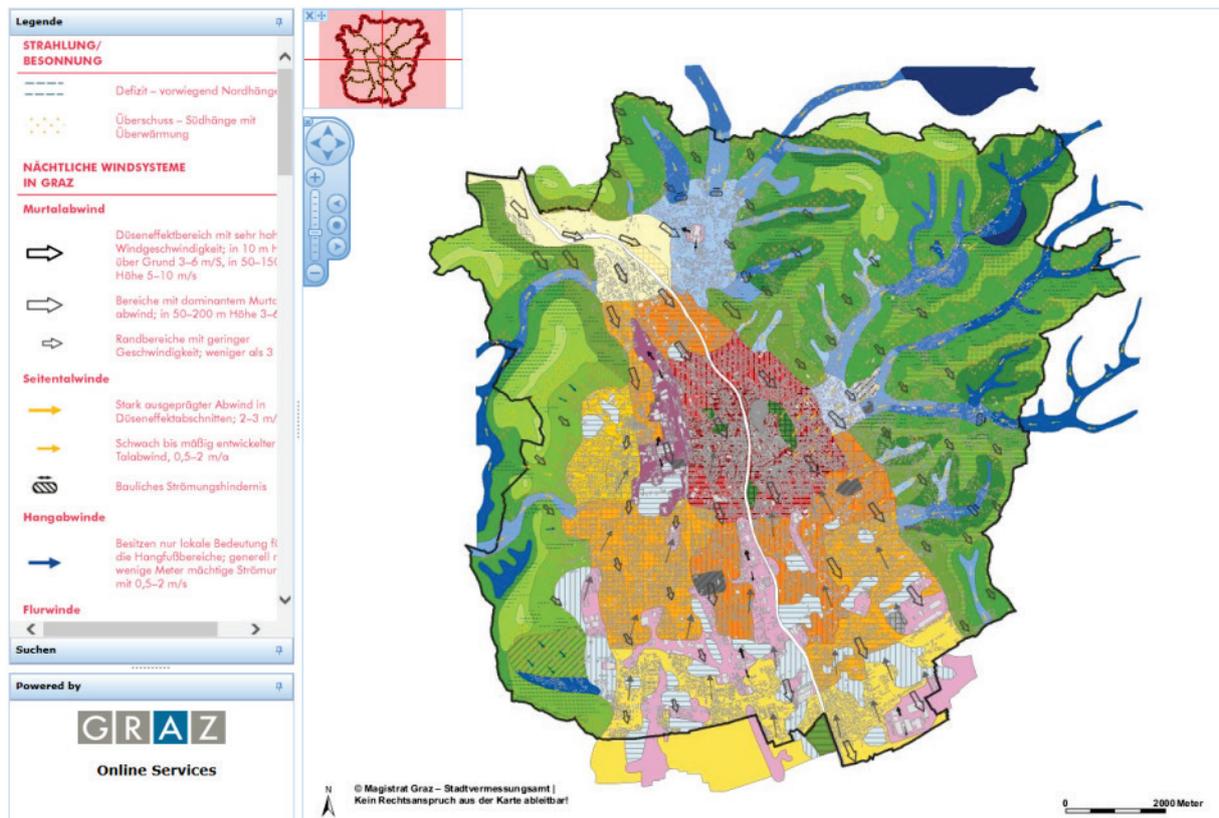


Abbildung 105: WebGIS-Graz - Stadtklima

6.1.7 Gebäudebestand

6.1.8 Bestehende Energieversorgung

Fernwärmeanschlussbereich (WebGIS Graz) – Datensatz ist im WebGIS angelegt aber leer

6.1.9 Grundlagen für die Darstellung des geothermischen Potenzials

6.1.9.1 Thermische Eigenschaften des Untergrundes

6.1.9.2 Bohrungen und Baugrunderkennung (WebGIS Graz)

Im WebGIS Graz ist ein Layer mit Baugrundeigenschaften und Bohrungen verfügbar. Diese Layer wären für die Beurteilung der Untergrundeigenschaften wichtig. Wenn den Bohrungen eine Datenbank mit Eigenschaften des Untergrundes zugeordnet ist, wäre diese ebenfalls von großer Bedeutung.

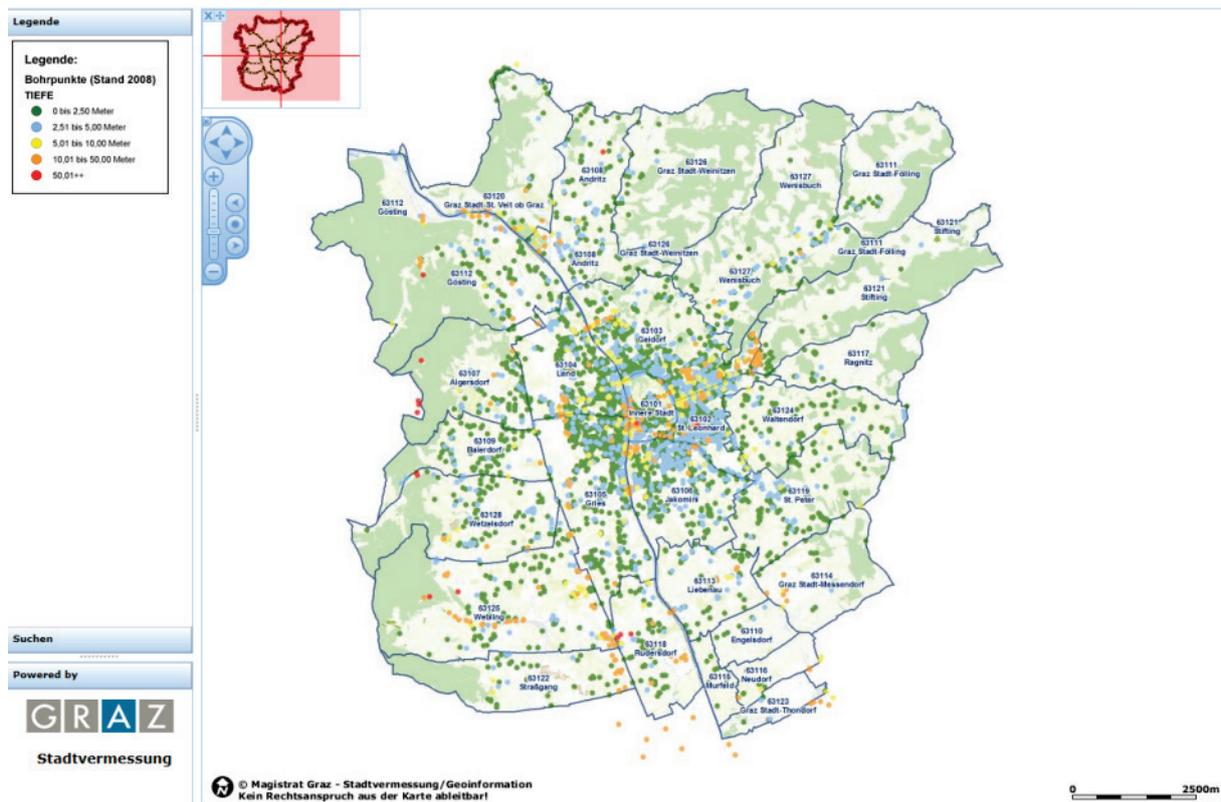


Abbildung 106: WebGIS-Graz - Bohrpunkte und Baugrunderkarte

6.1.10 Naturräumliche Gegebenheiten

6.1.10.1 Wasserrechtliche Gegebenheiten und wasserrechtliche Einschränkungen

- Wasserschutz und Schongebiete (WebGIS-Graz)
- Wasserentnahmen, Wasserrechte
- Thermisch belastete bzw. thermisch vorbelastete Bereiche
- Bestehende Erdwärmennutzungen (Erdwärmesonden, Thermische Nutzungen des Grundwassers)

6.1.11 Grundlagen für die Darstellung des solarthermischen Potenzials

6.1.11.1 Solardachkataster

Im Bereich von Graz wird von der Stadtvermessung der Stadt Graz (Magistrat Graz) ein GIS betrieben, welches im WebGIS der Stadt Graz einsehbar ist.

Thematisch ist im WebGIS vor allen der Solardachkataster für das Projekt Manage_GeoCity relevant.

Grundsätzlich wird zwischen solarthermisch nutzbaren und photovoltaisch nutzbaren Dachflächen unterschieden.

Die Ausweisung von Gebieten mit erhaltenswerten Dachlandschaften besitzt für die Projektbearbeitung große Relevanz, da dies zu Einschränkung der solaren Nutzungskomponente führt.

Diese beiden Kategorien werden weiters eingeteilt in (siehe dazu Abbildung 107):

- Sehr gut geeignete Dachflächen
- Gut geeignete Dachflächen
- Sehr gut geeignete Dachflächen in Gebieten mit erhaltenswerten Dachlandschaften
- Gut geeignete Dachflächen in Gebieten mit erhaltenswerten Dachlandschaften

Legende

-  Stadtgrenze
 -  Bezirksgrenzen
 -  Gebiete mit erhaltenswerten Dachlandschaften
- Berechnete Flächen (Solarthermie)**
-  Sehr gut geeignete Dachflächen
 -  Gut geeignete Dachflächen
 -  Sehr gut geeignete Dachflächen in Gebiet mit erhaltenswerten Dachlandschaften
 -  Gut geeignete Dachflächen in Gebiet mit erhaltenswerten Dachlandschaften
 -  Gebäudeumriss (Solarthermie)
- Berechnete Flächen (Photovoltaik)**
-  Sehr gut geeignete Dachflächen
 -  Gut geeignete Dachflächen
 -  Sehr gut geeignete Dachflächen in Gebiet mit erhaltenswerten Dachlandschaften
 -  Gut geeignete Dachflächen in Gebiet mit erhaltenswerten Dachlandschaften
 -  Gebäudeumriss (Photovoltaik)

Abbildung 107: WebGIS-Legende (Solardachkataster)

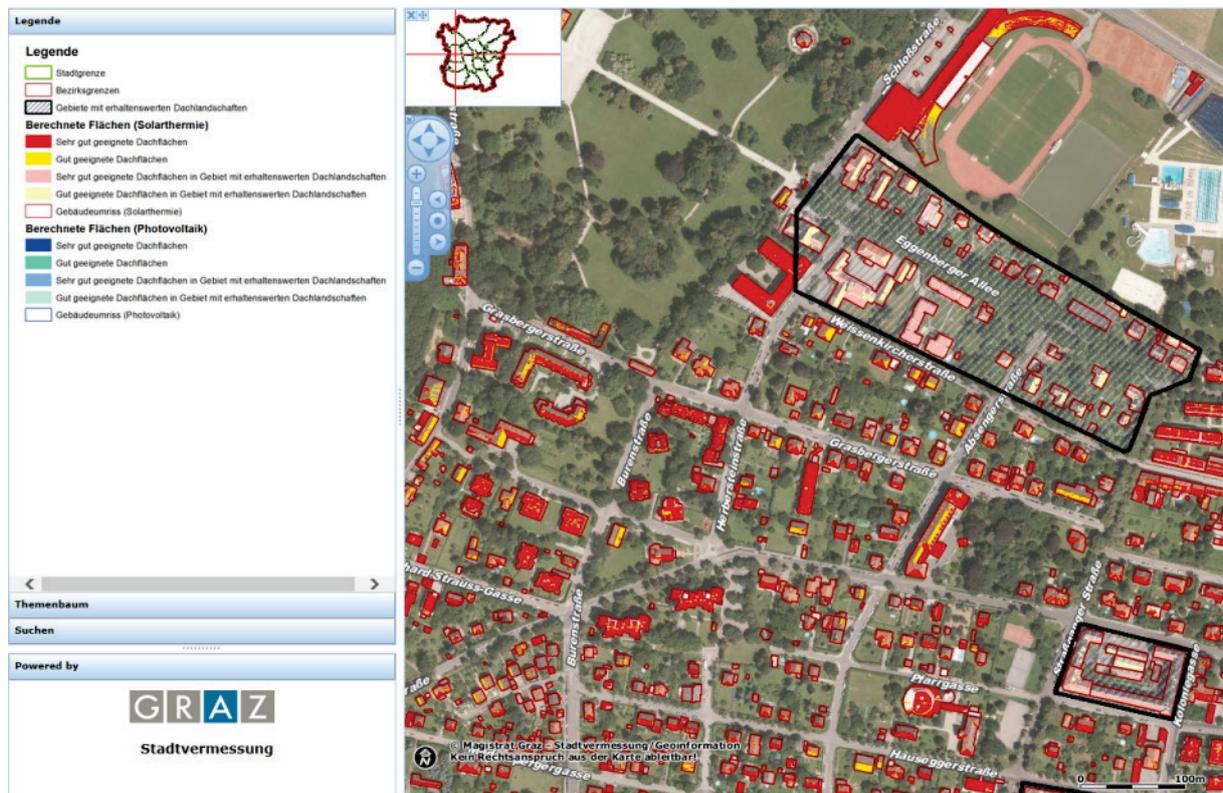


Abbildung 108: Screenshot – Solarkataster WebGIS Graz

Die solarenergetisch nutzbaren Dachflächen wurden gebäudeweise berechnet und im GIS analysiert.

Die GIS-Datensätze, die für die Darstellung der Ergebnisse im WebGIS erforderlich sind, scheinen folgende zu sein:

- Luftbilder (GIS-Rasterdatensatz)
- Stadtplan-Graz (wahrscheinlich GIS-Rasterdatensatz; auch Vektordatensatz möglich)
- Gebäudeumrisse (GIS-Vektordatensatz)
- GIS-Rasterdatensatz im Bereich der Gebäude mit Eignung für solarenergetische Nutzung (auch Vektordatensatz denkbar)
- Datenbank: In einer Datenbank sind wahrscheinlich die berechneten Flächen, die bei den einzelnen Gebäuden angezeigt werden. Die Daten könnten auch direkt beim Datensatz der Gebäudeumrisse angehängt sein.
- Abgrenzung von Gebieten mit erhaltenswerten Dachlandschaften

6.2 Anhang 2 – Ergebnistabellen ökologische Bewertung

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung sind in Abschnitt „2.3 Bewertung der Fallbeispiele in der Modellregion Graz“ in Form von Diagrammen dargestellt und beschrieben. In diesem Anhang sind die Zahlenwerte auf die sich die Ergebnisdiagramme beziehen, angeführt.

6.2.1 Fallbeispiel „Innenstadt – West“

Tabelle 35: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Innenstadt-West	Spezifische Treibhausgasemissionen				
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	FKW, FCKW, HFCKW, CKW	Gesamt
	[kg CO ₂ -Äq./MWh]				
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strommix AT)	37	4	1	9	51
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strom aus Erdgas GuD)	172	20	2	8	202
Fernwärme	186	22	0	0	208

Tabelle 36: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Innenstadt-West“

Innenstadt-West	Spezifischer kumulierter Energieaufwand			
	Fossil	Erneuerbar	Sonstige	Summe
	[kWh/kWh]			
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strommix AT)	0,20	0,94	0,00	1,14
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strom aus Erdgas GuD)	0,89	0,59	0,00	1,48
Fernwärme	0,67	0,02	0,31	1,00

6.2.2 Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Tabelle 37: Treibhausgas-Emissionen für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Hafnerstraße	Spezifische Treibhausgasemissionen				Gesamt
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	FKW, FCKW, HFCKW, CKW	
	[kg CO ₂ -Äq./MWh]				
Erdwärmesonden m. WP (Strommix AT) + Solaranlage	49	7	1	9	66
Erdwärmesonden m. WP (Strom aus Erdgas GuD) + Solaranlage	193	23	3	9	228
Erdgaskessel (Bestand)	277	57	2	0	336
Heizölkessel (Bestand)	420	5	2	0	427

Tabelle 38: Kumulierter Energieaufwand für Erdwärmesonden mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Erdgas- und Heizölkessel für das Fallbeispiel „Hafnerstraße“

Hafnerstraße	Spezifischer kumulierter Energieaufwand			
	Fossil	Erneuerbar	Sonstige	Summe
	[kWh/kWh]			
Erdwärmesonden m. WP (Strommix AT) + Solaranlage	0,43	0,99	0,02	1,44
Erdwärmesonden m. WP (Strom aus Erdgas GuD) + Solaranlage	1,17	0,61	0,02	1,80
Erdgaskessel (Bestand)	1,44	0,02	0,002	1,46
Heizölkessel (Bestand)	1,93	0,04	0,03	2,00

6.2.3 Fallbeispiele „Olympiawiese“

Tabelle 39: Treibhausgas-Emissionen für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Olympiawiese	Spezifische Treibhausgasemissionen				Gesamt
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	FKW, FCKW, HFCKW, CKW	
	[kg CO ₂ -Äq./MWh]				
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strommix AT) + elektr. Nachheizung WW	26	3	1	4	34
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strom aus Erdgas GuD) + elektr. Nachheizung	130	15	2	4	151
Fernwärme	186	22	0	0	208

Tabelle 40: Kumulierter Energieaufwand für grundwasserbürtige Geothermie mit Wärmepumpe mit verschiedenen Arten der Stromerzeugung im Vergleich zu Fernwärme für das Fallbeispiel „Olympiawiese“

Olympiawiese	Spezifischer kumulierter Energieaufwand			
	Fossil	Erneuerbar	Sonstige	Summe
	[kWh/kWh]			
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strommix AT) + elektr. Nachheizung WW	0,15	0,97	0,00	1,12
Grundwasserbürtige Geothermie m. WP (Strom aus Erdgas GuD) + elektr. Nachheizung WW	0,68	0,70	0,00	1,38
Fernwärme	0,67	0,02	0,31	1,00



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)