

ThermoCluster - Wärmegewinnung aus Infrastrukturprojekten und Einbindung in dezentrale Niedertemperatur-Wärme- und - Kältenetze für Plus-Energie- Quartiere

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 90/2025

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Thomas Geisler, BSc MSc, Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher (Technische Universität Graz)

Mag. Dr. Edith Haslinger, Mag. Dr. Renate Auer, Dr. Michael Lauermann, Robin Friedrich B.Sc. (AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

Mag. Gregor Götzl, Eszter Nyéki, MSc, Mag. Stefan Hoyer, Mag. Martin Fuchsluger, Mag. Jakob Kulich (Geologische Bundesanstalt)

Dr. Magdalena Wolf, Dr. Tobias Pröll, Dr. Wolfgang Straka, Dr. Klaus Voit (Universität für Bodenkultur)

Dr. Tobias Cordes, Mag. MSc. Ulrich Burger, Mag. Florian Lehner (BBT SE)

Dipl.- Ing. Olivier Pol, DI (FH) Milan Obradovic, (Innsbrucker Kommunalbetriebe AG)

Wien, Graz 2025. Stand: Mai 2022

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). 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 aller betroffener Bereiche 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 BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhalt

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage.....	11
3.1.	Stand der Technik	12
3.1.1.	Geogene Wärmequellen im Bereich des österreichischen Anteils des Brenner Basistunnels	12
4	Projekthinhalt	16
4.1.	Datengrundlage Brenner Basistunnel sowie dessen Nahbereich	16
4.1.1.	Das Tunnelsystem des Brenner Basistunnels.....	16
4.1.2.	Tunnelwasser am BBT.....	16
4.1.3.	Numerische Modellierung.....	21
4.1.4.	Ausgangslage des Nahbereichs BBT.....	21
4.2.	Methodik zur Potentialerhebung	22
4.2.1.	Temperatur des Tunnelwassers am Portal	22
4.2.2.	Berechnung der Wärmeleistung des Tunnelwassers	22
4.2.3.	Methodik Hydrochemie	23
4.2.4.	Methodik zur numerischen Modellierung	24
4.2.5.	Methodik der Potentialermittlung außerhalb des Tunnels (Nahbereich in Innsbruck)	24
4.3.	Datenlage Wärmeverteilung	27
4.3.1.	Erhebung und Ist-Analyse im Versorgungsgebiet Innsbruck.....	27
4.3.2.	Wärme und Kältebedarf sowie Einbindung in das Energienetz.....	32
4.3.3.	Wirtschaftlichkeitsanalyse	36
5	Ergebnisse	46
5.1.	Geothermisches Potential des Brenner Basistunnels und im Nahbereich	46
5.1.1.	Ergebnisse zum geothermischen Potential im Nahbereich des Brenner Basistunnels	46
5.1.2.	Ergebnisse zu Abflussmengen und Temperaturen	48
5.1.3.	Ergebnisse zur hydrochemischen Analyse	52
5.1.4.	Ergebnisse zur numerischen Modellierung.....	53
5.2.	Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit und Verteilung zu Konsument:innen	54
5.2.1.	Kosten der Leitungsinfrastruktur	54
5.2.2.	Kosten der Wärmepumpen.....	54
5.2.3.	Zusammenfassung der Investitionskosten.....	56
6	Schlussfolgerungen	58
6.1.	Geothermisches Potential außerhalb des Tunnels.....	58

6.2.	Geothermisches Potential der Tunnelwässer	58
6.2.1.	Abflussmenge und Temperatur des Tunnelwassers	58
6.2.2.	Geothermische Leistung des Tunnelwassers	59
6.3.	Verteilung zu Konsument:innen	61
6.3.1.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	61
7	Ausblick und Empfehlungen	62
7.1.	Geothermisches Potential außerhalb des Tunnels	62
7.2.	Geothermische Nutzung von Tunnelwässern	62
7.3.	Wärmeverteilung in Innsbruck	62
8	Verzeichnisse	64
	Abbildungsverzeichnis	64
	Tabellenverzeichnis	66
	Literaturverzeichnis	66
9	Anhang	69
9.1.	Erdwärmesonden	69
9.2.	Thermische Grundwassernutzung	69
9.3.	Data Management Plan (DMP)	71

1 Kurzfassung

Die Nutzung von Erdwärme aus Ingenieurbauwerken und Tunnels („Tunnelthermie“) bietet die Möglichkeit, die erdberührten Bauteile zur umweltfreundlichen Beheizung und Kühlung im Nahbereich zu verwenden (Adam, Markiewicz, & Oberhauser, 2005). Neben der Nutzung thermisch aktivierter Tunnelbauteile stehen im Brenner Basistunnel auch abgeleitete warme Tunnelwässer zur Verfügung. Insbesondere durch die Nutzung der Tunnelwässer können wertvolle Synergiepotenziale genutzt werden. Durch die Nähe zur Stadt Innsbruck bietet der Brenner Basistunnel (BBT) die optimalen Rahmenbedingungen, um die Wirksamkeit und Anwendungsgrenzen der Tunnelthermie zu bestimmen, die Energieverteilung in der Stadt zu simulieren und somit die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit zu erforschen. Ziel des Projekts ist es somit einerseits das geothermische Potential des BBT, sowie dessen Nahbereich zu eruieren und andererseits die Wärmeverteilung in der Stadt Innsbruck zu simulieren. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht in diese zwei Teile unterschieden. Einerseits in das Wärmepotential des Brenner Basistunnels und dessen Nahbereich, und andererseits in die Verteilung der gewonnenen Wärme innerhalb der Stadt Innsbruck.

Zu Beginn wurden die Wassermengen und Temperaturen, welche nach Abschluss der Bauarbeiten des Brenner Basistunnels am Nordportal zu Tage treten, werden prognostiziert. Hierfür wurden auf die Messdaten des BBT wie auf numerische Modelle zurückgegriffen. Mit diesen Ergebnissen konnten die nutzbaren Wärmeleistungen errechnet werden und somit das geothermische Potential in einer noch frühen Phase eingegrenzt werden. Zusätzlich wurden die hydrochemischen Parameter für die verschiedenen Wasser modelliert und die Ausfällungsraten berechnet. Das geothermische Potential im Zielgebiet wurde eine Methodik verwendet, die von der Geologischen Bundesanstalt in dem Projekt GEL-SEP erarbeitet wurde. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden dann mit Potentialanalysen die optimale Verteilungsstruktur ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das geothermische Potential der Tunnelwasser je nach Jahreszeit und Abflussentwicklung zwischen ca. 2.8 MW – 6.5 MW liegen wird. Die Nutzung von Erdwärmesonden im Zielgebiet würde eine spezifische Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden zwischen 38,2 und 40,3 W/lm für das Tiefenintervall 0 – 100 m und zwischen 39,3 und 40,8 W/lm für das Tiefenintervall 0 – 150 m betragen. Zudem variiert die Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden zwischen 80,5 und 85,6 kWh/m²/a für das Tiefenintervall 0 – 100 m und zwischen 120,8 und 125,8 kWh/m²/a für das Tiefenintervall 0 – 150 m. Die Nutzung der Grundwasserwärme ist in dem Untersuchungsgebiet generell möglich, da ein geeigneter oberflächennaher Grundwasserkörper am Standort anzutreffen ist. Beim Vergleich der verschiedenen Wärmeverteilungszenarien wurde beim Vergleich festgestellt, dass ein Anergienetz die besten Voraussetzungen für eine effiziente Wärmeverteilung hat.

Bei der Betrachtung der berechneten Energiemengen der Gebirgswassernutzung (bzw. der genannten Wassermengen sowie der Wassertemperaturen) zeigt sich, dass es noch einige Unsicherheiten gibt, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht näher eingegrenzt werden können. Diese

Unsicherheiten werden jedoch mit dem Baufortschritt beseitigt werden. Trotz dieser Unsicherheiten zeigen die Ergebnisse ein erhebliches Potenzial des BBT-Tunnelwassers auf, das es unabdingbar macht, die Idee der geothermischen Nutzung des Tunnelwassers zu verfolgen. Die Potentiale für Erdwärmesonden sind vor allem von den Systemparametern abhängig. Es ist wichtig zu betonen, dass die Systemparameter auf Annahmen basieren und die Ergebnisse daher nur für Anlagen mit der angegebenen Konfiguration gelten. Die Nutzung der Tunnelwärme auf 18-23°C in einem Anergienetz ist für die Versorgung der Stadtentwicklungsgebiete als technisch am vorteilhaftesten und ressourcenschonend zu bewerten. Mit dem Anergienetz wird die CO₂-neutrale Bergwärme am effizientesten und bedarfsgerecht mit minimalen Exergieverlusten zur Verfügung gestellt, und dezentral mittels Wärmepumpen auf das Nutztemperaturniveau der Niedrigenergiebauten gehoben. Eine Verteilung der Bergwärme mittels Anergienetzes über größere Distanzen - in andere Stadtteile Innsbrucks - ist aufgrund höherer Leitungsverluste demgegenüber als ineffizienter zu bewerten.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass am BBT die Anwendung des Systems der Teilströme und des detaillierten Monitorings die Grundlage für die Abschätzung des geothermischen Potenzials bildet. Diese breite Datenbasis ermöglicht es, bereits mehrere Jahre vor Abschluss der Bauarbeiten erste Abschätzungen vorzunehmen. Die Anwendung des Systems der Teilströme ist daher auch für andere Tunnel eine Chance. Zudem ermöglichen die Daten eine frühzeitige Optimierung. Bezüglich des Nachbereichs am Portal lässt sich sagen, dass aufgrund der thermischen Regeneration des Grundwassers bei einem Betrieb mit ausgeglichener Betriebsweise eine ungefähr drei- bis viermal höher Energiemenge erzielt werden kann als im Betrieb mit Norm-Betriebsstunden. Daher ist sowohl für Erdwärmesonden als auch für thermische Grundwassernutzung eine ausgeglichene Betriebsweise zu bevorzugen. Aus derzeitiger Sicht ist die Nutzung der Tunnelwärme mittels Anergienetz die technische empfohlene Variante, da die Tunnelwärme mit den vorherrschenden Temperaturniveaus passend für die Grundwärmeverversorgung des Stadtentwicklungsgebiets im Nahgebiet des Tunnels ist. Eine erste Abschätzung auf Basis der Investitionskosten zeigt ebenfalls, dass ein Anergienetz die wirtschaftlichste Variante ist, jedoch unter der Bedingung, dass die Investitionsrentabilität durch entsprechende Erlöse erzielt werden kann.

2 Abstract

The use of geothermal energy from engineering structures and tunnels ("tunnel thermal energy") offers the possibility of using the components in contact with the ground for environmentally friendly heating and cooling in the local area (Adam, Markiewicz, & Oberhauser, 2005). In addition to the use of thermally activated tunnel components, discharged warm tunnel waters are also available in the Brenner Base Tunnel. Especially by using the tunnel waters, valuable synergy potentials. Due to the proximity to the city of Innsbruck, the Brenner Base Tunnel (BBT) offers the optimal framework conditions to determine the effectiveness and application limits of tunnel thermal energy, to simulate the energy distribution in the city and thus to explore the technical and economic feasibility. The aim of the project is to determine the geothermal potential of the BBT and its vicinity and to simulate the heat distribution in the city of Innsbruck. For this reason, this report is divided into these two parts. On the one hand, the heat potential of the Brenner Base Tunnel and its vicinity, and on the other hand, the distribution of the heat gained within the city of Innsbruck.

At the beginning, the water quantities and temperatures that will be discharged after the completion of the construction work of the Brenner Base Tunnel at the north portal were predicted. For this purpose, the measured data of the BBT as well as numerical models were used. With these results the usable heat capacities could be calculated and thus the geothermal potential could be limited in a still early phase. In addition, the hydrochemical parameters for the different waters were modeled and the precipitation rates were calculated. The geothermal potential in the target area was calculated using a methodology developed by the Geological Survey of Germany in the GEL-SEP project. Based on these results, potential analyses were then used to determine the optimal distribution structure.

The results show that the geothermal potential of the tunnel waters will range from about 2.8 MW to 6.5 MW, depending on the season and runoff development. The use of borehole heat exchangers in the target area would have a specific extraction power for heating and cooling with standard operating hours between 38.2 and 40.3 W/lm for the 0 - 100 m depth interval and between 39.3 and 40.8 W/lm for the 0 - 150 m depth interval. In addition, the annual energy amount for heating and cooling with standard operating hours varies between 80.5 and 85.6 kWh/m²/a for the depth interval 0 - 100 m and between 120.8 and 125.8 kWh/m²/a for the depth interval 0 - 150 m. The use of groundwater heat is generally possible in the study area, since a suitable near-surface groundwater body is found at the site. When comparing the different heat distribution scenarios, it was found during the comparison that an anergy network has the best conditions for efficient heat distribution.

When looking at the calculated energy quantities of the tunnel water utilization (or the mentioned water quantities as well as the water temperatures), it can be seen that there are still some uncertainties that cannot be narrowed down at this stage. However, these uncertainties will be eliminated as construction progresses. Despite these uncertainties, the results show a significant potential of the BBT tunnel water, which makes it essential to pursue the idea of geothermal use of the tunnel water. The potentials for geothermal probes are mainly dependent on the system parameters. It is important to emphasize that the system parameters are based on assumptions,

and therefore the results are valid only for systems with the specified configuration. The use of tunnel heat to 18-23°C in an energy network is considered to be technically the most advantageous (highest annual performance factors) and resource-saving for supplying the urban development areas. With the energy network, the CO₂-neutral mountain heat is provided most efficiently and according to demand with minimal exergy losses, and is raised decentrally by means of heat pumps to the useful temperature level of the low-energy buildings. A distribution of the mountain heat by means of an energy network over longer distances - to other parts of the city of Innsbruck - is, on the other hand, to be evaluated as inefficient due to higher line losses.

At BBT, the application of the system of sectional discharges and detailed monitoring forms the basis for estimating the geothermal potential. This broad data base makes it possible to make initial estimates several years before construction work is completed. The application of the partial disturbance system is therefore also an opportunity for other tunnels. In addition, the data enable optimization at an early stage. Due to the thermal regeneration of the groundwater during operation with balanced operating hours, an approximately three to four times higher amount of energy can be achieved in this case than during operation with standard operating hours. Therefore, a balanced mode of operation is preferable for both borehole heat exchangers and thermal groundwater utilization. From the current point of view, the use of the tunnel heat by means of an energy network is the technically recommended variant, since the tunnel heat with the prevailing temperature levels is suitable for the ground heat supply of the urban development area in the vicinity of the tunnel. An initial estimate based on investment costs also shows that an energy network is the most economical variant, but under the condition that the return on investment can be achieved through corresponding revenues (from connection cost contributions, heat sales, and base or output price).

3 Ausgangslage

Angesichts des demografischen Wandels und des wachsenden Energiebedarfs sind zukunftsweisende Wärmeversorgungstechnologien wie die Geothermie von strategischer Bedeutung. Gleichzeitig wird sich der Bau von Verkehrswegen aufgrund des begrenzten Raumangebots und der aktuellen Bemühungen zum Ausbau des Infrastrukturnetzes zunehmend in den Untergrund verlagern. Darüber hinaus werden die europäischen Verkehrskorridore derzeit einheitlich ausgebaut, um ein transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-T) für einen effizienten und nachhaltigen Güterverkehr zu schaffen (European Parliament, 1996). Um den von der Europäischen Union geforderten Green Deal (European Commission, 2019) zu realisieren und die Auswirkungen des vom Menschen verursachten Klimawandels zu minimieren, ist eine Synergie verschiedener klimafreundlicher, CO₂-neutraler Technologien erforderlich. Einen innovativen Beitrag kann die geothermische Nutzung von Infrastrukturprojekten leisten. Ein Beispiel hierfür ist der Brenner Basistunnel (BBT), der Teil des europäischen Korridors SCAN-MED (Tinti et al., 2017) ist. Nach seiner Fertigstellung wird der BBT der längste Eisenbahntunnel der Welt sein und Innsbruck in Tirol, Österreich, mit Franzensfeste-Fortezza in Südtirol, Italien, verbinden.

Auf seinem Weg durchquert der Tunnel verschiedene Gebirgskämme, Täler und ein komplexes Krustengebiet in der alpinen Kollisionszone (Brandner, Reiter, & Töchterle, 2008), mit einer maximalen Überlagerung von etwa 1700 m auf der italienischen Seite und etwa 1400 m auf der österreichischen Seite (Voit & Kuschel, 2020).

Bei einem durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 25 K/km erreicht die Gebirgstemperatur auf Tunnelniveau bis zu ca. 35 °C auf der österreichischen Seite. Diese Wärme kann im konventionellen Tunnelvortrieb durch erdberührte Bauteile (Adam et al., 2005), wie Energietübbinge (Pralle et al., 2007), Energiegeotextilien(-vliese) (Markiewicz, 2004) und Energieanker (Oberhauser, Adam, Hosp, & Kopf, 2006), entzogen werden. Da der Baufortschritt des BBT zum Zeitpunkt des vorgestellten Forschungsvorhabens bereits entwickelt war, sind baubedingte Änderungen am Gesamtsystem begrenzt. Allerdings steht im BBT neben der Nutzung der Erdwärme aus erdberührten Bauteilen auch drainiertes, erwärmtes Tunnelwasser zur Verfügung. Dieses warme Wasser entsteht durch die Wechselwirkung mit dem Gebirge, durch das es sickert (Rybach, 1995a). Da tiefe Tunnels wie der BBT als Drainage fungieren, aber nur einen geringen Wasserzutritt erfahren, kann das Wasser auf dem Weg zum Portal dem Tunnel zutreten und sich darin vermischen. Am Portal könnte dann die dem Tunnelwasser innewohnende Wärme entzogen und an ein Fernwärmenetz weitergeleitet werden. Beim BBT könnte dies am Nordportal in der Siltschlucht bei Innsbruck geschehen, von wo aus es an die Verbraucher in Innsbruck (Landeshauptstadt von Tirol, Österreich) weiterverteilt werden könnte. Der Standort Siltschlucht wäre aufgrund seiner Nähe zur Stadt Innsbruck optimal. Hier wäre eine effiziente Nahwärmeübergabe in ein Wärmenetz mit niedrigen Vorlauftemperaturen sinnvoll. Durch die Nähe zur Stadt Innsbruck bietet der Brenner Basistunnel somit die optimalen Rahmenbedingungen, um die Wirksamkeit und Anwendungsgrenzen des Tunnelthermie zu bestimmen, die Energieverteilung in der Stadt zu simulieren und somit die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit zu erforschen. Somit lässt sich als übergeordnetes Projektziel die integrative Betrachtung des geothermischen Potentials des

Brenner Basistunnels sowie des Nahbereichs Portal Nord und die darauffolgende Verteilung der daraus gewonnenen Wärme hin zum Endkonsumenten in potentielle Plus-Energie-Quartiere der Stadt Innsbruck beschreiben.

3.1. Stand der Technik

Erdwärme stellt eine stabile und überall vor Ort verfügbare Wärmequelle dar. Im globalen Mittel beträgt die Zunahme der Erdtemperatur (geothermischer Gradient) mit der Tiefe ca. 3K/100m. Da der natürliche Wärmefluss aus tieferen Erdschichten im globalen Mittel mit 70 mW/m² sehr gering ist, wird in der Erdwärme vor allem die thermische Speicherefähigkeit geologischer Schichten genutzt. Lange Tunnelstrecken mit hoher Gebirgsüberlagerung, wie im Fall des BBT bis zu 1800 Meter, bieten dadurch den Vorteil eines deutlich erhöhten Temperaturniveaus (bis zu 35°C) im Bereich der Tunnelachse.

3.1.1. Geogene Wärmequellen im Bereich des österreichischen Anteils des Brenner Basistunnels

Geogene Wärmequellen im Zielbereich

Im Allgemeinen wird unter geothermischem Potential, der im Untergrund gespeicherte Wärmehalt verstanden. Der technisch gewinnbare Anteil wird als Ressource bezeichnet¹. In der oberflächennahen Geothermie wird die Energie vorwiegend durch Erdwärmesonden und durch thermische Grundwassernutzung gewonnen. Für diese Systeme werden quantitative Ressourcenabschätzungen angegeben.

Nach der Beantwortung der Frage, welches oberflächennahe Geothermie System überhaupt für die geologischen Bedingungen und möglichen Einschränkungen umsetzbar ist, kommt in der Praxis die Frage nach der erzielbaren Leistung (kW) und der Jahresenergiemenge (kWh/a). Diese ist allerdings nicht nur von geologischen Bedingungen abhängig, sondern auch von Freifläche bzw. Grundstücksgröße, Größe und Geometrie der Anlage und vor allem auch von der Betriebsweise. Letztendlich können sich benachbarte Anlagen auch gegenseitig in ihrer Leistungsfähigkeit beeinflussen. Bei Grundwasserwärmeeanlagen kann der Einflussbereich, je nach Strömungsrichtung und -stärke, mehrere Hundert Meter reichen. Bei Erdwärmesonden breitet sich der Temperatureinflussradius im Laufe der Jahre meist nur bis max. 50 m aus. Thermische Grundwassernutzungen und Erdwärmesonden können auch als Speicher betrieben werden, d.h. mit einer ausgeglichenen Jahresenergiebilanz in Wärmeentzug (Heizung) und Wärmeeintrag (Kühlung und aktive Regeneration). Diese ausbalancierte Betriebsart hält die mittlere Grundwassertemperatur bzw. die mittlere Erdreichtemperatur über die Jahre gleich, wodurch der gegenseitige Einflussbereich benachbarter Anlagen wesentlich reduziert werden kann und die Energieausbeute deutlich gesteigert wird.

Technische Lösungen zur Gewinnung von Wärme in Tunnelbauwerken

Grundsätzlich gibt es zur Nutzung von Wärme bei Tunnels zwei verschiedene Möglichkeiten. Einerseits die hydrothermale Direktnutzung von warmen Gebirgswasser und andererseits die

¹ <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/p/potenzial.html>

Nutzung von geschlossenen Systemen durch Absorberleitungen, welche in die Betontragschale des Tunnels integriert werden (Moormann, Buhmann, Friedemann, Homuth, & Pralle, 2016), beispielsweise Energietübbinge (Pralle, Franzius, Acosta, & Gottschalk, 2009) oder Energievliesen (Adam & Markiewicz, 2010). Da der Baufortschritt am BBT zum Zeitpunkt des Projekts allerdings schon fortgeschritten ist und die Bauverträge bestehen, ist eine bauliche Intervention zum jetzigen

Zeitpunkt nicht möglich und die Möglichkeit zur Nutzung von eingebetteten Absorberrohren zum nicht gegeben.

Nutzung von Tunnelwässern

In der Regel sind tiefliegende Tunnels drainierend wirkende Bauwerke die unterschiedliche hydrogeologische Komplexe queren (Burger, Geisler, Lehner, Cordes, & Marcher, 2022). Somit kommt es entlang des Tunnels, mit den tunnelbautechnischen Ausbau, zu abschnittsweisen Wasserzutritten. Dieses Wasser wird im Tunnel gefasst und dann zu den Portalen abgeführt. Je nach Felsüberdeckung des Tunnels kann die Wassertemperatur 20°C - 40°C betragen. Grundsätzlich gilt für die Energienutzung der Tunnelwässer, je wärmer und ergiebiger der Zufluss, desto besser. Jedoch aus Sicht des Errichters des Tunnels, je größer die Wasserzutritte, desto komplizierter und gefährlicher der Vortrieb. Das bedeutet, dass hier eine tunnelbautechnische Abdichtung erfolgen muss. Die Temperatur des Bergwassers entspricht in den meisten Fällen jener der Felstemperatur, die Schüttungsmenge allerdings verringert sich bis sich ein hydrogeologisches Gleichgewicht eingestellt hat (Burger et al., 2022) & (Rybach, 1995b). Neben anderen Parametern sind zur Berechnung der thermischen Leistung sind diese zwei Parameter bestimmend (Vgl. Kapitel 4.2.2). Eine Übersicht über bestehende Tunnelwassernutzungsprojekte geben beispielsweise (Stemmle, Menberg, Rybach, & Blum, 2022), (Rybach, 2010) oder (Moormann et al., 2016).

Es gilt jedoch zu beachten, dass die thermische Nutzung von Wässern in einem Gleichgewicht mit dem umgebenden Gestein grundsätzlich eine Störung des chemisch-mineralogischen Gleichgewichts der Wässer darstellt. Um sicherzustellen, dass durch die thermische Nutzung der Wässer keine unerwünschten chemischen Prozesse – wie Ausfällungs- und Korrosionsprozesse – initiiert werden, muss zuerst eine hydrochemische Charakterisierung der Wässer erfolgen. Im Anschluss wird gemeinsam mit der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der umgebenden Gesteine eine hydrochemische Modellierung der thermischen Nutzungsszenarien durchgeführt, um die optimalen Betriebsbedingungen zur Verhinderung von unerwünschten Prozessen zu erfassen.

Einbindung von Niedertemperaturwärme und geogene Kälte in Stadtquartiere:

Für die aus dem Tunnel gewonnene Niedertemperaturwärme und Kälte gibt es verschiedene Nutzungsmöglichkeiten, wobei eine direkte Nutzung der Wärme vor Ort (wenn möglich) oder die Integration in ein Wärmenetz als effizienteste Lösungen zu nennen sind. Innsbruck besitzt ein konventionelles Fernwärmenetz, mit welchem große Teile der Stadt wärmeversorgt werden. Mit dem Bau von energieeffizienten Gebäuden bzw. der thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden eröffnet sich Potenzial für die Senkung der Fernwärmeverlauftemperaturen für das erschlossene Gebiet.

Durch niedrigere Temperaturen im Fernwärmenetz erschließen sich neue Möglichkeiten der Wärmeintegration. So kann Niedertemperaturwärme, insbesondere Tunnelabwärme, Erdwärme

oder industrielle Abwärme in das Niedertemperaturnetz eingespeist werden oder der Fernwärmerücklauf zum Bilanzausgleich genutzt werden.

Sogenannte Anergienetze sind Wärmenetze, die bei sehr niedrigen Vorlauftemperaturen ($< 30^{\circ}\text{C}$) betrieben werden können. Sie besitzen den Vorteil sehr geringer Wärmeverluste aufgrund der niedrigen Netztemperaturen und gegenüber konventionellen Wärmenetzen reduzierter Leitungserrichtungskosten (kostengünstigere Verrohrung, keine Isolierung). Zudem erlauben Anergienetze eine bidirektionale Nutzung, sprich eine Einspeisung von Wärmequellen und Ausspeisung bei Bedarf der Wärme sowie die Bereitstellung von Kühlung. Vor allem in Deutschland und der Schweiz finden sich einige praktische Umsetzungen solcher Niedertemperaturnetze (Buffa, Cozzini, D'Antoni, Baratieri, & Fedrizzi, 2019).

In den Gemeinden Visp, Naters und Brig-Glis (CH) werden Anergienetze betrieben, die mit Wärme aus Oberflächengewässer, Wärme aus Grundwasser und kommunaler Abwärme gespeist werden. In Naters werden 180 Wohnungen mit einem jährlichen Wärmebedarf von 2 GWh aus dem Grundwasser versorgt. In Brig-Glis werden lokale Abwärmequellen (Tunnelabwärme, Erdwärmesonden, Abwärme von Kälteanlagen und industrielle Abwärme) in das Anergienetz eingespeist.

Auch aus den Tunneln St.Bernhard, Hauenstein und Mappo-Morretina wird Wärme in ein Niedertemperaturwärmenetz eingespeist. Der Hauenstein-Tunnel versorgt 150 Wohnungen in Trimbach (installierte Leistung: ca. 1 MW_{therm}), die durch Wasser aus dem Südportal des Tunnels (2500 l/min, 19°C) versorgt werden.

Das Tunnelwasser (983 l/min, 16°C) des Mappo-Moretina Tunnels wird am Nordportal entnommen, um das direkt am Portal gelegene Minusio zu versorgen. Die installierte Wärmepumpe erzeugt Wärme mit einer durchschnittlichen Arbeitszahl von vier (Gieré und Stille, 2004).

Eine Schlüsseltechnologie zur Nutzung von Niedertemperaturwärme sind Wärmepumpen. Mittels Wärmepumpen kann die nötige Heizwärme und Warmwasser aus Niedertemperaturabwärme erzeugt werden. Je nach Netzstruktur und örtlichen Gegebenheiten variieren Größe und Einsatzort der Wärmepumpe:

Eine Möglichkeit zum Einsatz von Wärmepumpen ist die Installation einer Wärmepumpe direkt am Standort, wo die Abwärme anfällt. Die Wärmepumpe nutzt die Abwärme, im Fall dieser Sondierung das Tunnelwasser des Brenner-Basis Tunnels, als Wärmequelle und hebt die Temperatur auf ein gewünschtes Temperaturniveau.

Dezentrale Wärmepumpe sind mehrere kleinere Wärmepumpen in einem Wärmenetz, die dezentral in den Gebäuden installiert sind, und die das Niedertemperaturnetz als Wärmequelle nutzen.

Eine zentrale Wärmepumpe hingegen stellt zentral die nötige Wärme für ein gesamtes Quartier / Stadtgebiet zur Verfügung. Die Wärmequelle kann ebenfalls das Niedertemperaturnetz oder der Rücklauf eines Fernwärmenetzes sein.

In mehreren Projekten wurde der Einsatz von Wärmepumpen in Wärmenetzen demonstriert. Im Projekt „District Boost“ (2014) wurde im Wiener Fernwärmenetz eine dezentrale Pilot-Wärmepumpe zur Versorgung einer Wohnhausanlage installiert, die den Fernwärmerücklauf als Wärmequelle nutzt. In diesem Projekt konnten erste Erfahrung zum Betrieb und zur Regelung solcher Wärmepumpen gewonnen werden. Im Betrieb konnten COPs zwischen 2.2 und 6.2, je nach Wärmequellen- und Wärmesenktemperatur, erzielt werden.

In den Heizwerken St. Gilgen, Bergheim und Flachau sowie dem Fernheizkraftwerk Tamsweg werden Wärmepumpen (600 – 1000 kW_{therm}) zur Rauchgaskondensation eingesetzt. Die produzierte Wärme wird in das angeschlossene Fernwärmenetz eingespeist.

In Graz wird Niedertemperaturabwärme (ca. 28°C-36°C, ca. 8.8 MW_{therm}) aus dem Stahl- und Walzwerk Marienhütte genutzt, um mit einer Wärmepumpe in das bestehende Nah- und Fernwärmenetz einzuspeisen (69°C bzw. 95°C).

Die Nutzung von Abwasser als Wärmequelle wird in Skandinavien, der Schweiz und Deutschland bereits in großer Zahl durchgeführt. Auch in Österreich sind bereits einige Projekte umgesetzt. In Amstetten wird Wärme aus dem kommunalen Kanalnetz entnommen und mit einer Wärmepumpe (ca. 228 kW_{therm}) in das Wärmenetz von Amstetten eingespeist. Auf einer Länge von 42 m wird die Wärme dem Abwasserkanal mit Kanalwärmetauschern entzogen und auf ein nutzbares Temperaturniveau von ca. 45°C gehoben.

Dieser Auszug an Projekten zeigt, dass Niedertemperaturnetze in Kombination mit Wärmepumpen einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung von Niedrigenergie-Quartieren liefern können. Grundvoraussetzung für den effizienten Einsatz von Niedertemperaturnetzen und Wärmepumpen ist jedoch ein sehr guter Gebäudestandard, um mit den niedrigen Temperaturen den Heizwärmebedarf zu decken. Neu entwickelte bzw. thermisch gut sanierte Stadtgebiete bieten hier großes Potenzial, durch energie-effiziente Gebäude die Implementierung eines Niedertemperaturnetzes zu realisieren. Im Stadtentwicklungsplan von Innsbruck ist die Erschließung von Neubaugebieten im Nahbereich des BBT Portals geplant. Es existiert aber auch ein Bestandsquartier in Tunnelportalnähe, in dem die Wärme eingebunden werden kann.

Im Rahmen der von der FFG geförderten Studie Degent-Net (Projektnummer 853649) wurde die Wirtschaftlichkeit von Anergienetzen anhand einer Modellstudie für den Standort Oase 22+ untersucht. In dieser Fallstudie wird die Abwärme eines Rechenzentrums für die Wärmeversorgung eines neu zu errichteten Stadtquartiers im 22. Wiener Gemeindebezirk genutzt, wobei Wärmeüberschüsse in einem Erdsonden Feld saisonal gespeichert werden. Während die Abwärme des Rechenzentrums unentgeltlich zur Verfügung gestellt wird, stellen die wesentlichen Investitionskomponenten die Erdwärmesonden (Speicher) sowie die Energiezentralen (dezentrale Wärmepumpen und Steuervorrichtungen) dar (kumulierter Kostenanteil 65%). Die Errichtung des Leitungsnetzes besitzt in dieser Modellstudie einen Kostenanteil von lediglich 19%. Die Studie ergab, dass ein Anergienetz auch unter den gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen ökonomisch sinnvoll betrieben werden kann. Wesentlich für die Wirtschaftlichkeit ist die Notwendigkeit bzw. die technische Umsetzung von Back-Up und Spitzenlast Lösungen dieser Wärmearbeit und nicht primär die Leistung der geführten Wärme- und Kältenetze.

4 Projektinhalt

Ziel des Projekts ist es einerseits das geothermische Potential des BBT, sowie dessen Nahbereich zu eruieren und andererseits die Wärmeverteilung in der Stadt Innsbruck zu simulieren. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht in diese zwei Teile unterschieden. Einerseits in das Wärmepotential des Brenner Basistunnels und dessen Nahbereich, und andererseits in die Verteilung der gewonnenen Wärme innerhalb der Stadt Innsbruck.

4.1. Datengrundlage Brenner Basistunnel sowie dessen Nahbereich

4.1.1. Das Tunnelsystem des Brenner Basistunnels

Das Tunnelsystem des Brenner Basistunnels besteht aus drei parallelen Tunnelröhren. Genauer aus zwei Haupttunnelröhren und einem Erkundungsstollen (EKS), welcher sich zentral ca. 12 Meter unterhalb der Haupttunnelröhren befindet. Während der Bauphase dient er der Optimierung der Haupttunnelvortriebe bis er in der Betriebsphase als Service- und Entwässerungsstollen genutzt werden wird (Bergmeister & Reinhold, 2017). Somit wird das gesamte dem Tunnelsystem zutretende Wasser durch den EKS zu den Tunnelportalen geleitet. Der Scheitelpunkt des Tunnelsystems befindet sich unterhalb des Brennerpasses an der Staatsgrenze zwischen Italien im Süden und Österreich im Norden. Dadurch sammelt sich das in den 32 km langen Abschnitt auf österreichischer Seite eingetretene Wasser, vermischt sich im Tunnel und mündet am Nordportal in der Sillschlucht in den Vorfluter, den Fluss Sill. Das in den südlichen Tunnelabschnitt eintretende Wasser fließt zum Südportal nach Franzensfeste-Fortezza. Das geothermische Potenzial in der Sillschlucht wird also durch das Wasser bestimmt, das in den nördlichen Tunnelabschnitt zwischen Innsbruck und dem Brennerpass Zutritt, weshalb auch nur dieser Teil evaluiert wird.

4.1.2. Tunnelwasser am BBT

Für die Bestimmung des thermischen Leistungsvermögens des abgeleiteten temperierten Tunnelwassers sind zwei Parameter von besonderer Bedeutung. Zum einen die Abflussrate und zum anderen die Temperatur des Wassers am Portal des Tunnels (Rybach, 2010). Am BBT wird neben vielen Einzelabflussmessungen das Konzept der Teilströme angewendet. Teil dieses Konzepts ist es, dass Tunnelabschnitte mit homogenen hydrologischen Bedingungen und damit homogenen Eigenschaften zu einem Cluster zusammengefasst und als Einheitssystem betrachtet werden. Ein einzelnes Cluster wird daher als Teilstrom (TS) bezeichnet. Insgesamt tragen im nördlichen Abschnitt des Brenner Basistunnels nach Abschluss der Bauarbeiten sieben Teilströme (Tabelle 1) zum Gesamtabfluss in der Sillschlucht bei (Abbildung 1). Jeder von ihnen wird hydrologisch genau beobachtet, unter anderem hinsichtlich der Parameter Temperatur und Abflussmenge (Burger et al., 2022). Nahezu alle Teilabflüsse zeigen stationäre Zustände, da sich im Laufe der Zeit ein hydrologisches Gleichgewicht eingestellt hat. Diese Messungen bilden die Grundlage für die Bewertung des geothermischen Potenzials des Tunnelwassers. Das gesamte Wasser, das auf der österreichischen Seite in den BBT einströmt, wird schließlich in der Sillschlucht in der Nähe der Stadt Innsbruck in den Fluss Sill eingeleitet. Die Summe der Teilströme sowie deren thermische

Eigenschaften ergeben folglich den Gesamtwasserabfluss (D_{total}) und dessen Temperatur (TTW) am Nordportal in der Siltschlucht nach Fertigstellung des BBT. Bevor die Daten ausgewertet werden können, muss sichergestellt werden, dass das Tunnelwasser einen stabilen Bereich von Abflussmenge und Temperatur über die Zeit aufweist. Daher werden die Ganglinien der Einzelabflüsse validiert, um sicherzustellen, dass sich alle Wasserzuflüsse bereits im stationären Zustand befinden. Am BBT ist der Tunnelvortrieb für die wesentlichen Teile des Erkundungsstollens und der Zugangsstollen bereits abgeschlossen. Das gesamte Tunnelsystem hat eine Gesamtlänge von 230 km, von denen bis Dezember 2021 bereits 145 km vorgetrieben wurden. Der EKS ist nahezu fertiggestellt, da im Dezember 2021 noch ca. 2,5 km bis zur Staatsgrenze am Brenner aufgeföhren werden müssen.

Tabelle 1: Überblick der verschiedenen zum Gesamtabfluss in der Siltschlucht beitragenden Teilströme auf der österreichischen Seite des Brenner Basistunnels

ABKÜRZUNG	TEILSTROM
TS1	GRENZE - VORTRIEBSARBEITEN
TS2	ZUGANGSTUNNEL WOLF
TS3	MONTAGEKAVERNE
TS4	ZUGANGSTUNNEL AHRENTAL
TS5	NOTHALTESTELLE
TS6	VERBINDUNGSTUNNEL
TS7	DIFFUSE WASSERZUTRITTE
GESAMTABFLUSS	SILLSCHLUCHT INNSBRUCK

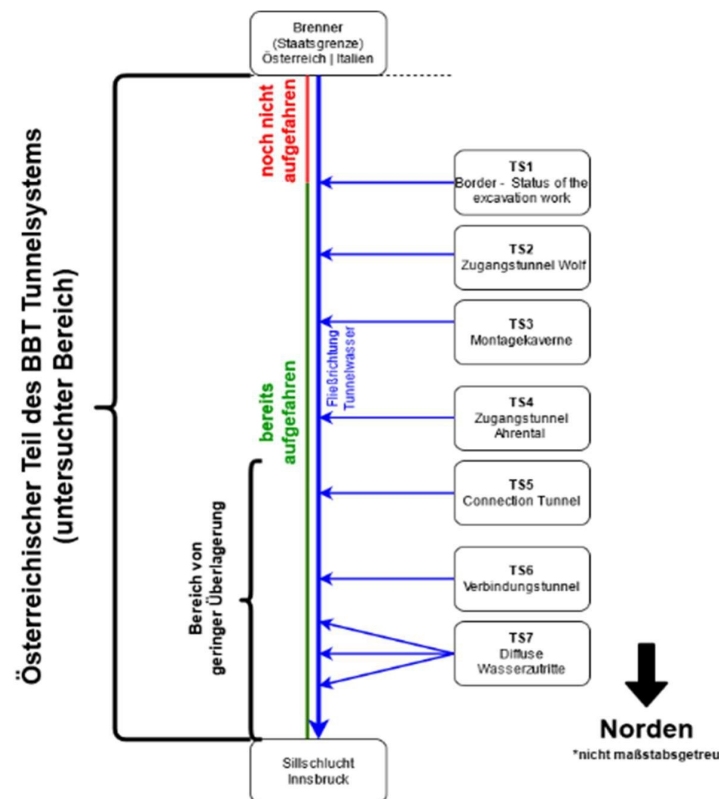


Abbildung 1: System der Teilströme aus (Geisler et al., 2022)

Der Brenner Basistunnel befindet sich noch im Bau, während der Betrieb für 2033 vorgesehen ist. Das Entwässerungssystem und damit die Abflussmengen und -temperaturen unterscheiden sich während der Bauphase und der Betriebsphase wesentlich. Während der Bauphase werden die Abflussmengen in gewissem Maße durch Betriebs- und Bauwasser beeinflusst. Darüber hinaus führen zeitweilige Umleitungen des Tunnelwassers zu Veränderungen der gesamten abgeleiteten Wassermenge und ihrer Temperatur am Tunnelportal in der Sillschlucht. Daher wurden die Daten zu Temperatur und Abflussmenge vorverarbeitet und Ausreißer darin eliminiert. Für eine adäquate Bewertung und Abschätzung des geothermischen Potenzials während der Betriebsphase müssen außerdem die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

1. Der südlichste Teil auf der österreichischen Seite der BBT (TS1) ist noch nicht aufgefahren, daher müssen die Messwerte mit den Werten aus einer hydrogeologischen Prognose für die noch nicht aufgefahrenen restlichen zwei Kilometer integriert werden. Diese Prognosen liegen im Bereich von 30- 49 l/s und bei Temperaturen zwischen 23 - 26 °C vor. Neben dem TS3 - Montagekaverne - bietet das Wasser dieses hydrologischen Homogenbereichs das größte geothermische Potenzial. Zu diesem hohen geothermischen Potenzial führen die hohe Überlagerung (bis zu 1280 m) und die daraus resultierenden hohen Temperaturen entlang der Tunnelachse in Kombination mit hohen prognostizierten Wassermengen.
2. In der Nähe des Portals (zwischen dem Zugangsstollen Ahrental und der Sillschlucht) gibt es mehrere diffuse Wasserzuflüsse (TS7). Diese Zuflüsse können nicht direkt gemessen werden, jedoch werden sie als Teil des Gesamtwasserabflusses in der Sillschlucht gemessen. Da die anderen Teilströme, die zum Gesamtwasserabfluss beitragen, quantifiziert werden, ist es

möglich, die Menge der diffusen Zuflüsse zu bestimmen, indem die einzelnen Teilabflüsse von der Gesamtwassermenge abgezogen werden. Die diffusen Zutritte treten im Bereich von geringer Überlagerung (Mittelgebirge) zu. Zudem repräsentieren diese das gleiche hydrologische Regime wie die Teilströme TS5 und TS6. Daher werden die Wassertemperaturen für die diffusen Wasserzutritte aus den Durchschnittswerten von TS5 und TS6 berechnet.

3. Während der Bauphase sind die TS1 und TS2 - südlich des Zufahrtstunnels Wolf - noch nicht in das Gesamtentwässerungssystem eingebunden. Das Wasser dieser Teilströme wird derzeit wieder an die Oberfläche gepumpt und in den Vorfluter – die Obere Sill - eingeleitet. Vor dem Betrieb des BBT- Tunnels werden TS1 und TS2 in das Hauptentwässerungssystem eingeleitet, wodurch sich die Gesamtabflussmenge erheblich erhöhen wird. Daher müssen TS1 und TS2 bei der Prognose des Wasserabflusses und der Temperatur in der Betriebsphase berücksichtigt werden.
4. Im Bereich der Siltschlucht wird die Gesamtmenge des Tunnelabflusswassers und dessen Temperatur gemessen. Diese Messstelle befindet sich innerhalb des Tunnels, aber relativ nahe an der Oberfläche. Die Luft innerhalb des Tunnels steht im Austausch mit der Luft außerhalb des Tunnels. Dadurch passen sich die Temperaturen im Tunnel an die Außentemperaturen an. Infolgedessen können die Lufttemperaturen innerhalb des Tunnels vor allem in den Wintermonaten erheblich sinken, was zu hohen Abkühlungsraten des Tunnelwassers führt, da es im Wärmeenergieaustausch mit der Tunnelluft steht. Für valide Aussagen sollten daher zumindest die Monatsmittelwerte herangezogen werden. Nach Beendigung der Bauarbeiten ist der Wärmeaustausch zwischen dem Tunnelwasser und der Tunnelluft reduziert, da sich das Entwässerungssystem in seinem endgültigen Zustand befindet. Während des Betriebes wird das gesamte Wasser innerhalb des Sohlgerinnes vom Scheitelpunkt unterhalb der Staatsgrenze bis in die Sill fließen. Außerdem wird die Fließgeschwindigkeit durch die größeren Wassermengen erhöht und somit die Zeit der möglichen Abkühlung verkürzt.
5. Bislang sind nur kleine Teile der Haupttunnel ausgebrochen worden. Sobald die Haupttunnel ausgebrochen sind, wird die Wassermenge, die in die Tunnel eintritt, in den hydrologisch homogenen Bereichen, in denen die Haupttunnel ausgebrochen sind, ebenfalls zunehmen. Dies hängt mit der Vergrößerung der Oberfläche zusammen, durch die das Wasser in den Tunnel eindringen kann. Diese Zunahme der Abflussmenge wird auf der Grundlage der Erfahrungen mit den ersten ausgebrochenen Haupttunnelabschnitten auf einen Faktor von 1,1 bis 1,3 geschätzt.
6. Hinsichtlich der Bandbreiten von TS1 und TS3 wurden zwei Szenarien ausgearbeitet. Szenario 1 geht davon aus, dass TS1 während der Betriebsphase eine Abflussmenge von 30 l/s und 23 °C hat. Für TS3 wird eine Erhöhung des Abflusses um den Faktor 1,1 angenommen, die sich aus dem Ausbruch der Haupttunnel ergibt. Szenario 2 geht von einem Beitrag von TS1 zur Wasserabflussmenge von 49 l/s und 26 °C während der Betriebsphase aus. Für TS3 wird eine Erhöhung des Abflusses um den Faktor 1,3 durch den Ausbruch der Haupttunnel angenommen.

Angesichts dieser Unterschiede werden die Abflussrate (D_{tot}) und ihre Temperatur (T_{total}) während des Baus wie folgt definiert:

- TS3
- TS4
- TS5
- TS6
- TS7
- Lufttemperatur im Inneren des Tunnels im Bereich der Siltschlucht

Nach der Fertigstellung werden die Abflussrate (D_{tot}) und die Temperatur (T_{total}) durch folgende Faktoren bestimmt:

- Sd1 unter Berücksichtigung von Szenario 1 (30 l/s bei 23 °C) oder Szenario 2 (49 l/s bei 26 °C)
- Sd2
- Sd3 unter Berücksichtigung von Szenario 1 (multipliziert mit 1,1) oder Szenario 2 (multipliziert mit 1,3)
- Sd4
- Sd5
- Sd6
- Sd7
- Lufttemperatur innerhalb des Tunnelbereichs der Siltschlucht *BBT*

Die Datengrundlage bilden somit Messwerte von Mai 2020 bis Mai 2021, die ein ganzes Jahr repräsentieren. Tabelle 2 zeigt die mittleren Abflussmengen und mittleren Temperaturen der einzelnen Teilströme, die zum Gesamtabfluss des Tunnelwassers nach Fertigstellung beitragen. Die untere Zeile zeigt den mittleren Gesamtabfluss sowie die gemessene mittlere Temperatur während der Bauphase.

Tabelle 2: Mittlere gemessene Abflussmengen und deren Temperaturen (Geisler et al., 2022)

#	Abflussrate [l/s]	Temperatur [°C]
TS1 (Prognose)	30 - 49	23 - 26
TS2	15.0	12.2
TS3	26.5	23.7
TS4	5.4	16.3
TS5	0.5	15.6
TS6	2.5	14.7
TS7	10.9	15.2
Gemessener Gesamtabfluss (Bauphase)	45.8	17.8

Zu den erläuterten Temperatur- und Abflussdaten der einzelnen Teilströme wurden für die hydrochemische Evaluierung weitere Daten verwendet. Diese sind:

- pH - Wert
- Leitfähigkeit, Karbonathärte, Nichtkarbonathärte, Gesamthärte
- Kationen: Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, NH₄ inkl. Ionenbilanz
- Anionen: F, Cl, HCO₃, NO₂, NO₃, SO₄, PO₄ inkl. Ionenbilanz

Diese hydrochemischen Daten waren verfügbar für den Zeitraum 26.22.2016 – 7.5.2021 für insgesamt 12 Einzelzutritte zwischen Projekt-km 10,3 und 29,5 und folgende für den Projektumfang relevante Teilströme

- Portal Siltschlucht
- Zugangstunnel Ahrental
- Nothaltestelle
- Verbindungstunnel
- Erkundungsstollen Ahrental (Montagekaverne)
- Zugangstunnel Wolf

Die Wässer am Portal Siltschlucht setzen sich aus den Teilströmen Zugangstunnel Ahrental, Nothaltestelle, Verbindungstunnel, Erkundungsstollen Ahrental sowie nicht weiter spezifizierte diffuse Zutritte zusammen.

Zum Zeitpunkt des Projekts waren die letzten 2,5 km des Erkundungsstollens noch nicht aufgefahren. In diesem Bereich befindet sich die Hochstegenzone, wo erhöhte Wasserzutritte zu erwarten sind. Die Chemie dieses Wassers wurde mathematisch modelliert basierend auf der bekannten Geologie dieser Zone sowie der Zusammensetzung von Quellwasser, das dieser Zone entspringt.

4.1.3. Numerische Modellierung

Die quantitative Prognose der Wasserzutritte in Tunnels durch nicht-triviale Geologie leiden alle an der Schwierigkeit, dass weder die Einzugsbereiche der Wässer noch die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im Untergrund hinreichend bekannt sind. Man kann die Voraussetzungen versuchen zu verbessern, indem man zumindest die – im Allgemeinen besser bekannte – dreidimensionale Verteilung der geologischen Einheiten und deren geohydrologischer Eigenschaften in einem numerischen Modell abbildet. Ein wichtiger, ca. 630 m langer Abschnitt in sog. kalkreichen Bündnerschiefern (ca. EKS Tunnelmeter TM 12+570 bis ca. TM 13+200), der den größten Teil der Gesamtschüttung aus dieser geologischen Einheit beisteuert, wurde nun einer genaueren Betrachtung unterzogen, unter Verwendung eines Rechenmodells nach der Finite-Element-Methode (Programm: FEFLOW).

4.1.4. Ausgangslage des Nahbereichs BBT

Zur Gewährleistung einer geothermischen Versorgung in frühen Bauphasen wurden Konzepte zur Nutzung des oberflächennahen Untergrunds im Bereich der neu errichteten Stadtquartiere angedacht, die später mit der Nutzung der Tunnelwärme kombiniert werden könnten.

Für ein ausgewähltes Untersuchungsgebiet in Innsbruck Süd wurden die Leistungs- und Energieressourcen für die thermische Grundwassernutzung und die Nutzung durch Erdwärmesonden ermittelt. Als erster Schritt der Potentialabschätzung wurden geologische und hydrogeologische Daten erhoben. Auf Basis dieser Daten konnten geologische und hydrogeologische Basisdatensätze erstellt werden, die für die Potentialberechnungen für Erdwärmesonden und thermische Grundwassernutzung erforderlich sind.

4.2. Methodik zur Potentialerhebung

4.2.1. Temperatur des Tunnelwassers am Portal

Im Bereich der Sillschlucht kommt es zu einer Abkühlung des Tunnelwassers, begründet durch den Wärmeenergieübergang [J] des warmen Tunnelwassers in Richtung der kälteren Tunnelluft. Um Informationen über das Ausmaß dieser Abkühlung zu erhalten, ist die theoretische Mischtemperatur (T_{TWtheo}) mit Hilfe der Richmann'schen Mischungsregel (Richmann, 1750) zu berechnen. Die theoretische Mischtemperatur stellt die Temperatur des Tunnelwassers unter Vernachlässigung des Einflusses der Tunnelluft bzw. des Ausfließens zum Portal dar. Das Ausmaß der Abkühlung wird durch das Delta (ΔT) der theoretischen Mischtemperatur und der tatsächlich gemessenen Temperatur (T_{TWmes}) dargestellt (1), da die tatsächlich gemessene Temperatur die durch das Ausfließen verursachte Abkühlung enthält.

$$T_{TWtheo} - T_{TWmes} = \Delta T \quad (1)$$

Die Wärmeenergie (Q) [J], die während der Bauphase vom Tunnelwasser an die Umgebungsluft abgegeben wird, hängt mit der Temperaturänderung ΔT des Tunnelwassers zusammen. Um einen Referenzwert für die Kühlung zu erhalten, muss die vom Tunnelwasser an die Tunnelluft abgegebene Wärmeenergie (Q) [J] berechnet werden. Da sich der Aggregatzustand nicht ändert, wird die übertragene Wärmeenergie nach Gleichung (2) berechnet. Q steht für die Wärmeenergie [kJ], m für die Masse des Fluids [kg] und c für die Wärmekapazität von Wasser (4,183 J/kgK bei 20 °C):

$$Q = m * c * \Delta T \quad (2)$$

Die während der Bauphase abgegebene Wärmeenergie gibt einen Maximalwert für die Betriebsphase an. Um die maximale Abkühlung des Tunnelwassers während der Betriebsphase zu berechnen, wird die Formel nach ΔT umgestellt. Es müssen das berechnete Q und die Masse m des Wassers, die während der Betriebsphase zu erwarten ist, eingesetzt werden. Das neu berechnete ΔT wird von der theoretischen Mischtemperatur während der Betriebsphase subtrahiert. Das Ergebnis ist die Mindesttemperatur für das Tunnelwasser während der Betriebsphase.

4.2.2. Berechnung der Wärmeleistung des Tunnelwassers

Wenn man den Tunnelwasserabfluss (D_{total}) und seine Temperatur (T_{TW}) kennt, kann man die Wärmeleistung berechnen. Die Wärmeleistung P_{TW} wird wie folgt berechnet (Rybach, 1995b), wobei ρ_{Wasser} die Dichte des Wassers ($=1000\text{kg/m}^3$) und (ΔT_{TW}) die Temperaturspanne (T_{TW} -

T_0 ist; T_0 = Temperatur, auf die das Tunnelwasser abgekühlt wird) (3):

$$P_{TW} = c * \rho_{Wasser} * D_{total} * \Delta T_{TW} \quad (3)$$

Die Absenkungstemperatur ΔT_{TW} wird durch zwei Faktoren bestimmt. Zum einen von der Wärmeentzugsleistung des Wärmetauschers und zum anderen von der Menge und Temperatur des Tunnelwassers, das unter Einhaltung der Umweltvorschriften in den Vorfluter eingeleitet wird. Für die Berechnung der thermischen Leistung wird in diesem Projekt eine Abkühlungstemperatur T_0 von 10°C verwendet.

4.2.3. Methodik Hydrochemie

Um etwaige Ausfällungs- und Korrosionsprobleme rechtzeitig zu erkennen und mit entsprechenden Maßnahmen kompensieren zu können, wurde anhand der vorhandenen hydrochemischen und geologischen Daten ein dreistufiger Prozess gewählt:

1. Modellierung der finalen chemischen Zusammensetzung
2. Modellierung des Ausfällungs- und Korrosionsverhaltens (thermodynamisch)
3. Modellierung des Ausfällungs- und Korrosionsverhaltens (kinetisch)

Es wird erwartet, dass ein signifikanter Teil der Gesamtschüttungsmenge aus der Hochstegenzone kommt. Dieser Bereich ist zum Zeitpunkt des Projektendes noch nicht aufgefahren, daher können nur Schätzungen zu Schüttung, Temperatur und Chemie getroffen werden (vgl. Kapitel 4.1.2).

Zur Schätzung der Hydrochemie der Hochstegenzone wurden zwei Methoden gewählt:

- Szenario a)
Modellierung des Wassers in Kontakt mit reinem Kalzit mit PHREEQC
- Szenario b)
Mittelwert der physikalischen und hydrochemischen Daten von 10 Quellen, die der Hochstegenzone zugeordnet werden können (Burger, Millen, & Kirschner, 2003)

Ad 2) Das Mischwasser wurde für alle in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Fälle (Szenario 1+ Szenario 2; vgl. 4.1.2, Hochstegen Modell und Hochstegen Quellen) mit Hilfe von PHREEQC modelliert. Unabhängig von den gewählten Szenarien, ist das Mischwasser übersättigt in Bezug auf Kalzit und Dolomit. Überraschender- und erfreulicherweise ergibt die Modellierung keine sulfatischen Ausfällungen und entsprechend wird kein korrosives Verhalten des Tunnelwassers erwartet.

Je nach Annahme, ergibt die Modellierung Ausfällungsmengen von 171 (Szenario 1 Modellierung) - 454 (Szenario 2 mit PHREEQC simulierter Waserzusammensetzung von Hochstegen) t/a Kalzit und bis zu 39 t/a Dolomit, um das thermodynamische Gleichgewicht zu erreichen. Es ist jedoch bekannt, dass Kalzit- und Dolomitausfällungen kinetisch bedingt sind (Kai Zeppenfeld, 2010). Daher wurde in Folge die kinetische Wachstumsrate von Kalzit berechnet (Dolomitausfällungen sollten um eine Größenordnung geringer ausfallen. Entsprechend wurden sie in der folgenden Betrachtung vernachlässigt.).

Ad 3) Zur Berechnung der Kalzitwachstumsrate wurde folgende Formel für Lösungen mit üblicher

Ionenstärke von $I=0.001-0.7M$ (d.h. kein Meereswasser) herangezogen (Wolthers, Nehrke, Gustafsson, & van Cappellen, 2012):

$$R = I^{-0.004} pH^{-10.71} r_{aq}^{-0.35} (S - 1)^2$$

wobei

R	...	Kalzitwachstumsrate in m/s
I	...	Ionenstärke in mol/l
$r_{aq} = [Ca^{2+}] / [CO_3^{2-}]$...	Verhältnis der Aktivitäten
$S = ([Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}] / K_s)^{1/2}$...	Sättigungsindex mit
$K_s = 10^{-8.42}$...	thermodynamisches Löslichkeitsprodukt von Kalzit
[x]	...	Aktivität der Ionenspezies x

4.2.4. Methodik zur numerischen Modellierung

Die Geometrie des angetroffenen Grundwasserleiters (Aquifers) wurde zunächst dreidimensional konstruiert. Der Aquifer ist eine schmale, West–Ost erstreckte (quer zur Tunneltrasse streichende) und sehr steil stehende Zone mit einer relativ hohen hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit, jedoch unklarer, möglicherweise nicht sehr (einige km) weiter, Erstreckung gegen Osten. Die Grundwasser-Anströmung ist aus Osten anzunehmen, im tieferen Gebirge wahrscheinlich aber durch eine mehrweniger undurchlässige Zone östlich des Tunnels stark herabgesetzt oder blockiert. Dafür spricht der zeitliche Verlauf (die Ganglinie) des gemessenen Wasserabflusses aus dem Erkundungsstollen (Messstelle “EKS Ahrental”). Angesichts der konstruierten Lageverhältnisse wurde einer 2D-Modellierung gegenüber einem zunächst angedachten 3D-Modell der Vorzug gegeben. Berechnet wurde die Porendruckverteilung im Gebirge, zunächst ungestört (stationär, ohne Tunnel) und dann die zeitliche Entwicklung nach Absenkung der Druckhöhe im Tunnel bis auf Null (atmosphärische Bedingungen), für einen Zeitraum von 20.000 Tagen (etwas mehr als 50 Jahre). Für den Ort des Tunnels im Modell wurde eine zeitabhängige Ausflussrate ausgegeben, die mit der gemessenen Abfluss-Ganglinie verglichen werden konnte.

4.2.5. Methodik der Potentialermittlung außerhalb des Tunnels (Nahbereich in Innsbruck)

Um die Anwendungspotentiale für Erdwärmesonden und thermische Grundwassernutzungen zu ermitteln, wurde die Methodik verwendet, die von der Geologischen Bundesanstalt in dem Projekt GEL-SEP (Steiner et al., 2021) erarbeitet wurde. Die Potentialkarten zeigen im Wesentlichen einen Standortvergleich für eine oberflächennahe Geothermie Anlage mit festgelegten Systemparametern (Geometrie und Betriebsfunktion). Bei den Erdwärmesonden wurde für die Leistungskarte als Geometrie eine Einzelsonde mit 100 m bzw. mit 150 m Länge festgelegt und für die Energiekarten ein Sondenfeld mit ca. 1156 m² Größe. Bei den Grundwasserwärmeanlagen wurde der Brunnenabstand zwischen Entnahme und Rückgabe auf 50 m fixiert. Die Leistungs- und Energiekarte ist jeweils für 2 Betriebsarten berechnet: „Heizen und Kühlen mit Norm–Betriebsstunden“ und „Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Bilanz“. Die Karten geben also jeweils die Leistung bzw. Energie für die gewählte Geometrie (Einzelsonde, Brunnendublette mit 50 m Abstand, Sondenfeld mit 1156 m²) mit den angegebenen Betriebsweise (Norm–Betriebsstunden

oder ausbalanciert) am jeweiligen Standort wieder. Ein Einfluss bestehender benachbarter Systeme kann hier pauschal nicht berücksichtigt werden.

Erdwärmesonden

Die Leistungsfähigkeit einer Erdwärmesonde ist abhängig von den Untergrundparametern (nutzbare Temperaturdifferenz und Wärmeleitfähigkeit), der Ankopplung der Sonde an den Untergrund (Bohrlochwiderstand), der Geometrie der Sonde (Bohrradius, Tiefe der Sonde, Größe des Sondenfeldes, Sondenabstand eines Feldes) und der Betriebsweise (Volllaststunden Heizen und Kühlen, Energiebilanz Heizen/Kühlen). Für die standortabhängigen Parameter hat die Geologische Bundesanstalt Karten als Inputs für die Berechnung erstellt. Abbildung 2 skizziert, welche Datensätze für die Erstellung der Inputkarten verwendet wurden.

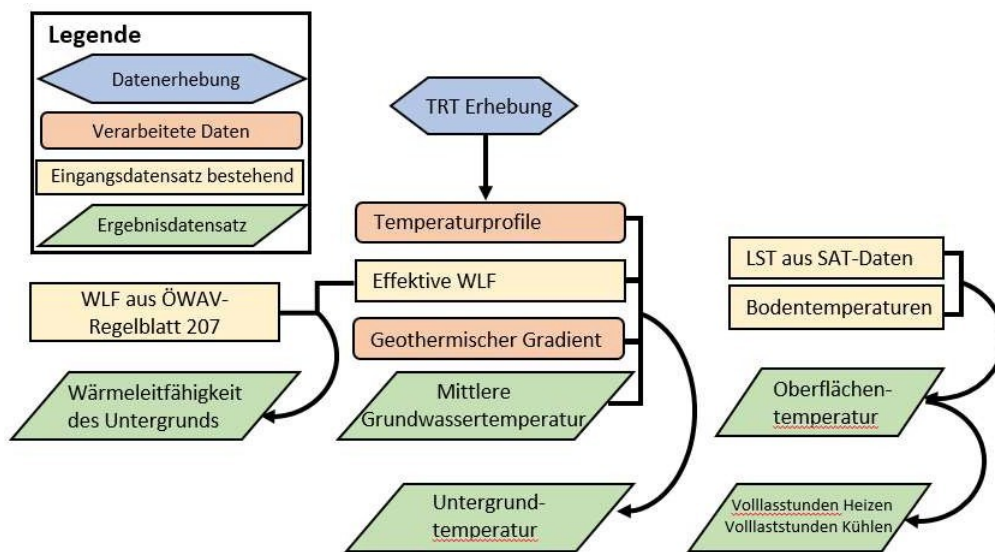


Abbildung 2: Prozess zur Erstellung der standortabhängigen Eingangskarten (Ergebnisdatensatz) zur Ressourcen-Berechnung für Erdwärmesonden. TRT = Thermal Response Test. LST = Oberflächentemperatur aus Satelliten-Daten. WLF = Wärmeleitfähigkeit (GeoSphere, 2023)

Zur Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen für Erdwärmesonden wurde das im Zuge des Projekts GEL-SEP entwickelte Python-Programm „BHEseppy“ (Borehole Heat Exchanger Spatial Energy Planning with pygfunction) verwendet, das auf der Theorie der endlichen Linienquelle beruht (finite line source) und auf Basis der g-Funktionen nach Eskilson et al. 1987² aufgesetzt ist (Steiner et al., 2021). Diese können analytisch berechnet werden und sind dementsprechend schnell kalkulierbar. Die g-Funktionen werden grundsätzlich mit dem Python Plugin „pygfunction“ ermittelt, die von Massimo Cimmino³ entwickelt und frei verwendet werden können.

² Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes. <https://www.buildingphysics.com/download/Eskilson1987.pdf>

³ Cimmino, M. (2018). pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields. Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada (pp. 492-501). Montréal QC, Canada: IBPSA-Canada. <http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2018/2-3-A-4.pdf>

Die Leistungs- und Ressourcenkarten können mit dem BHEseppy berechnet werden, wobei jeder Rasterpunkt der Karte mit unterschiedlichen standortabhängigen Parametern als Input dient. Die Geometrie der Sondenfelder ist fixiert (Konstante Parameter und Formel für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen) und es werden Norm-Betriebsstunden als Volllaststunden vorgegeben. Diese sind abhängig vom Klima am Standort bzw. dem langjährigen Durchschnitt der Bodentemperatur.

Thermische Grundwassernutzung

Im Gegensatz zu den Erdwärmesonden ist die Nutzung der Grundwasserwärme primär davon abhängig, ob überhaupt ein geeigneter Grundwasserkörper am Standort anzutreffen ist. Liegt der Standort innerhalb eines geeigneten Grundwasserkörpers, ist die Leistungsfähigkeit einer Grundwasserbrunnendublette primär abhängig von den Aquifereigenschaften, wie Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Aquifertiefe und der Grundwassertemperatur. Bei der Ressourcenberechnung zur thermischen Grundwassernutzung wurden die in dem Projekt GEL-SEP (Steiner et al., 2021) festgelegte „systemabhängige und konstante Parameter“ übernommen.

Um die Ressourcen in Energie- und Leistungseinheiten berechnen zu können müssen zuerst die Aquiferparameter als Karten erstellt werden. Abbildung 3 zeigt alle Daten, die für die Berechnung dieser Parameter verwendet wurden, inklusive aller Zwischenergebnisse.

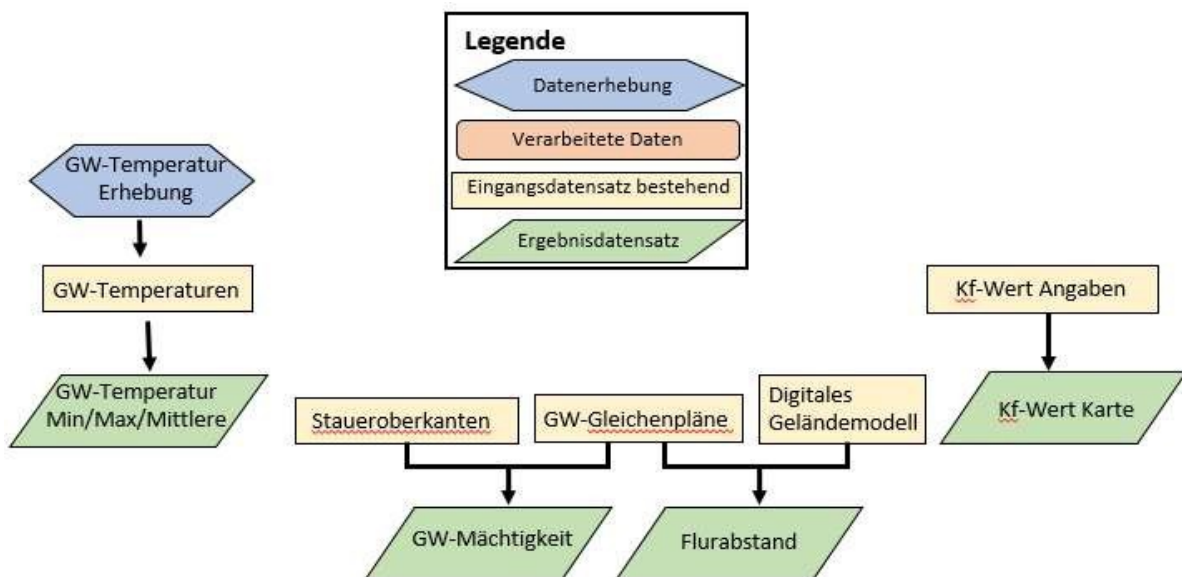


Abbildung 3: Prozesse zur Erstellung der standortabhängigen Eingangskarten (Ergebnisdatensatz) zur Ressourcen-Berechnung für die thermische Grundwassernutzung. GW – Grundwasser (GeoSphere, 2022).

Für die Berechnung der Potentiale für thermische Grundwassernutzung wurde die Methodik von GEL-SEP (Steiner et al., 2021) verwendet.

Die **Berechnung der Brunnenleistung** basiert auf der Formel nach Dupuit-Thiem für frei aufspiegelndes Grundwasser, entnommen aus dem ÖWAV Regelblatt 207, 2. Auflage, S.27 (ÖWAV, 2009). Die Berechnung der **Grundwasserenergie** basiert auf dem Speicherinhalt des

Grundwasserkörpers. Dieser berechnet sich aus der Wärmekapazität des Aquifers, der Mächtigkeit und der nutzbaren Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückgäbebrunnen. Zusätzlich wurde ein geometrischer Nutzungsfaktor $r_f=0.75$ eingeführt, da durch die dipolartige Dublettenanordnung nicht der gesamte Grundwasserkörper genutzt werden kann.

Ähnlich wie bei den Erdwärmesonden gibt es auch für die thermische Grundwassernutzung konstante Parameter (Konstante Parameter und Formel für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen). Außerdem werden die in Tabelle 10 gelisteten Limits berücksichtigt, um zu vermeiden, dass es zu einer zu starken Absenkung des Grundwassers kommt, und, dass ein sehr hohes Potential ausgegeben wird, welches nur mit vermutlich unverhältnismäßig großem technischen bzw. ökonomischen Aufwand nutzbar gemacht werden könnte.

4.3. Datenlage Wärmeverteilung

4.3.1. Erhebung und Ist-Analyse im Versorgungsgebiet Innsbruck

In einem ersten Schritt wird im Süden von Innsbruck, in der Nähe des Tunnelportals, ein Gebiet definiert, das aufgrund der geografischen Lage für die Nutzung der Tunnelwärme als geeignet erscheint. In der Zeit, wo das Forschungsprojekt bearbeitet wird, liegt für die Stadt Innsbruck noch keine Energieraumplanung vor, auf jener Basis ein mögliches Versorgungsgebiet für die Tunnelwärmenutzung definiert werden könnte. Es sind dafür eigene Kriterien zu definieren und anzuwenden, um sinnvolle Versorgungsgrenzen eines möglichen Gebietes festlegen zu können. Die Kriterien werden aus den Hauptparametern abgeleitet, die in der Regel die Machbarkeit einer leitungsgebundenen Wärmeversorgungsinfrastruktur beeinflussen. Abbildung 4 zeigt das Versorgungsgebiet, das anhand der folgenden Kriterien ausgewählt wurde:

- a. Nähe des Tunnelportals
- b. Hohe Wärmebedarfsdichte aufgrund der städtebaulichen Gegebenheiten und Entwicklungspläne
- c. Bedarf an einer fossilfreien Wärmeversorgungsinfrastruktur
- d. Eignung einer leitungsgebundenen Wärmeversorgungsinfrastruktur aus geografischer, infrastrukturtechnischer und städtebaulicher Sicht
- e. Eignung einer Niedertemperaturwärmeversorgung

Das in Abbildung 4 dargestellte Versorgungsgebiet wird als „Pradl Süd“ bezeichnet. Auf der südlichen Seite ist das Gebiet nur durch die Autobahntrasse, die Gleisinfrastruktur der Straßenbahn und eine innerstädtische Verkehrsachse von der Siltschlucht getrennt, in der sich das Tunnelportal befindet.

Von der geografischen und infrastrukturtechnischen Seite handelt es sich um einen signifikanten Knotenpunkt der Stadt Innsbruck, wo sich verschiedene Wege und Medien in unterschiedlichen Höhenlagen physisch kreuzen (Gewässer mit der Sillmündung in das Inntal, Fern- und Nahverkehrswege auf Straßen und Schienen, Verbindungen zu den alpinen Naherholungsgebieten Bergisel, Siltschlucht und Lanser Köpfl, Energieversorgungstechnische Infrastrukturen wie die Ausleitung aus dem Wasserkraftwerk der Innsbrucker Kommunalbetriebe (IKB) „Untere Sill“).

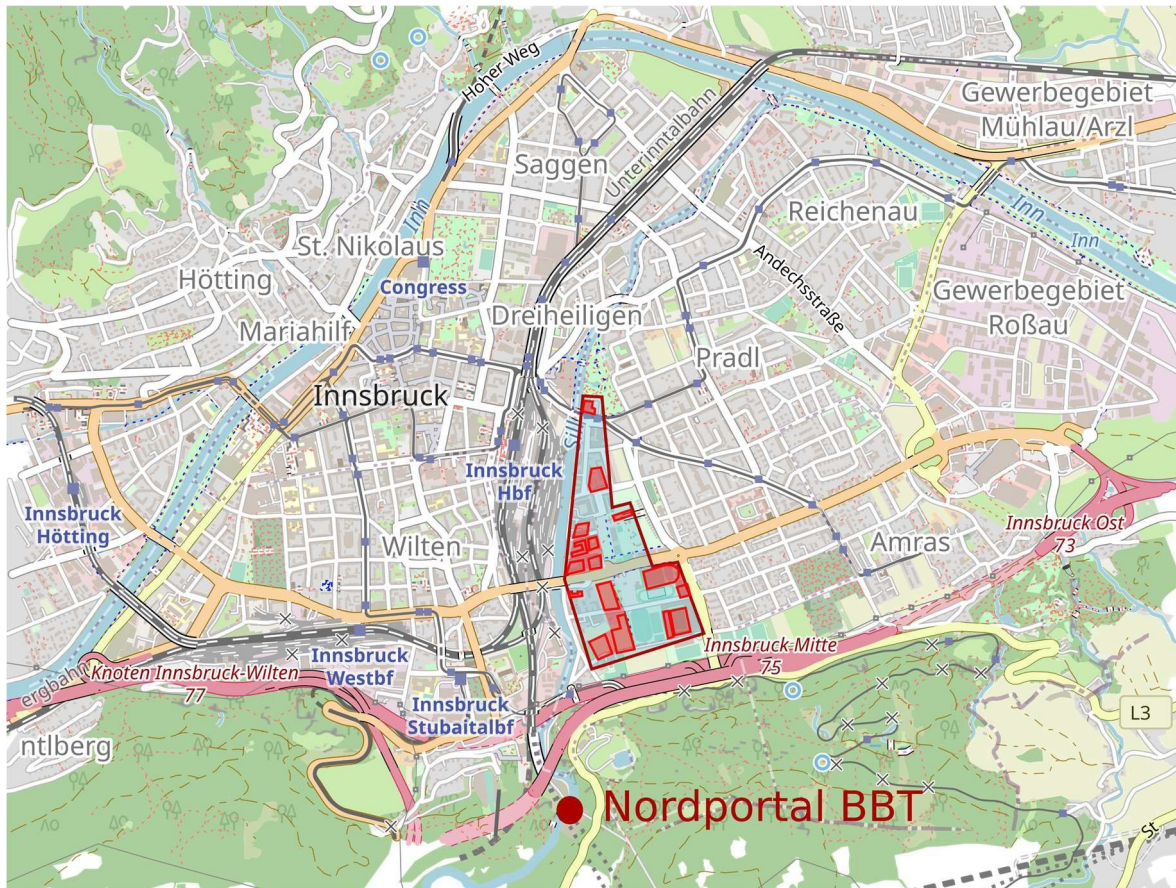


Abbildung 4: Verortung des Versorgungsgebietes im südlichen Innsbruck, das für eine Nutzung der Tunnelabwärme in Frage kommt ("Versorgungsgebiet") (IKB, 2022)

Der Fluss „Sill“ fließt weiter Richtung Norden und bildet daher eine weitere geografische Barriere für das Versorgungsgebiet, vor allem aus städtebaulicher Sicht. Das Gebiet östlich der Sill bietet zweifellos die besseren Voraussetzungen für die Nutzung der Tunnelwärme, alleine aufgrund der Tatsache, dass Großteils des Gebiets westlich der Sill von einer wesentlichen Logistikinfrastruktur der Stadt Innsbruck (Bahnhof, Güterbahnhof, Gleisinfrastruktur, Logistikhallen) belegt ist. Da eine Kreuzung mit der Sill nur über die bestehende Brückeninfrastruktur im Bereich des Knotenpunkts in unmittelbarer Nähe des Tunnelportals möglich ist, wird entschieden, ausschließlich das Gebiet östlich der Sill zu untersuchen.

Städtebaulich ist dieses Gebiet durch eine Mischnutzung mit für die Stadt Innsbruck sehr großen Bauobjekten gekennzeichnet (siehe Abbildung 5):

- Das Gebiet zeichnet sich vor allem durch für die Stadt Innsbruck wesentliche Freizeit- und Veranstaltungseinrichtungen (Veranstaltungshalle, Eishalle, Fußballstadion, Freibad, Hallenbad) aus.
- Das Gebiet besteht dann zum Großteil aus Wohnobjekten, mit kleineren Ein- und Mehrfamilienhäusern im südlichen Bereich und größeren Wohnobjekten im mittleren und nördlichen Teil des Gebiets. Ein für die Stadt Innsbruck signifikantes Stadtentwicklungsgebiet befindet sich südlich der Olympiastraße, die praktisch das gesamte

Gebiet verkehrstechnisch in zwei Stadtteilen nördlich und südlich dieser wesentlichen Verkehrsachse trennt. Die Olympiastraße kann jedoch an zwei Stellen gut unterquert werden, auch mit einer potenziellen leitungsgebundenen Wärmeversorgungsinfrastruktur. Daher wird die Olympiastraße nicht als physische Grenzlinie des Versorgungsgebietes wie die Sill gesehen.

- Entlang der Hauptverkehrsachsen sind auch Objekte mit gewerblichen Nutzungen (Hotel, Heime, Büro, Handel) sowie Gesundheits- und Sicherheitseinrichtungen (Feuerwehr). Östlich wird das Gebiet mit der Verkehrsachse Resselstraße / Anton- Eder-Straße abgegrenzt. Die ersten Wärmebedarfsberechnungen zeigen, dass westlich dieser Achse bereits genug potenzielle Abnehmer für die Nutzung der Tunnelwärme bestehen, und eine Erschließung des Gebiets östlich der Achse Resselstraße / Anton-Eder-Straße nicht begründet werden kann.

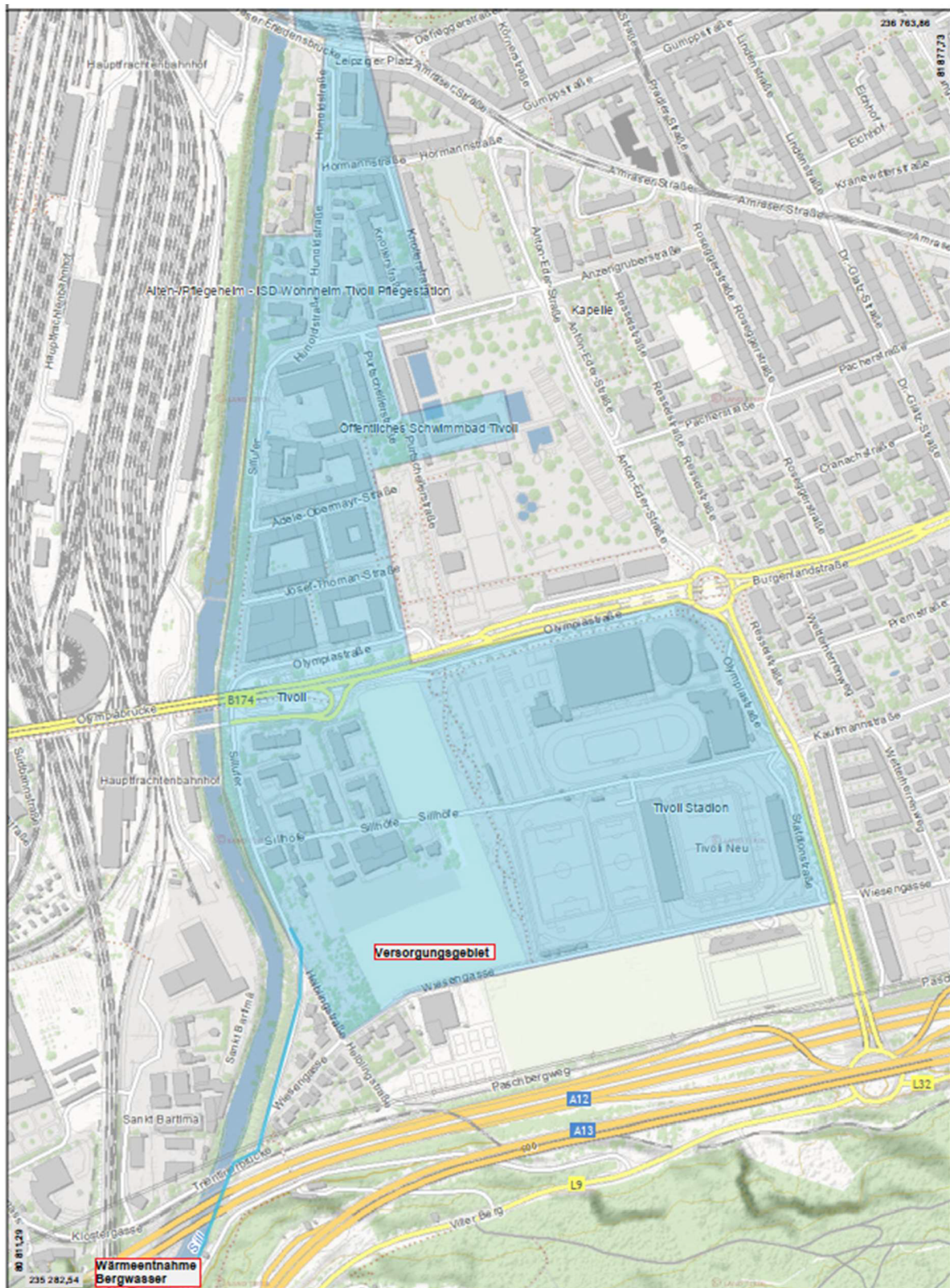


Abbildung 5: Detailaufnahme des Versorgungsgebietes (IKB, 2022)

Das Gebiet ist derzeit vollflächig gasversorgungstechnisch erschlossen und die Gebäude und Einrichtungen in den betroffenen Stadtteilen werden primär über Gas oder Heizöl versorgt. Die

Innsbrucker Hochtemperaturfernwärme ist in diesem Gebiet nicht vorhanden und es ist auch nicht geplant, einen Ausbau der Fernwärme in diesem Gebiet zu forcieren, weil andere Stadtteile in Innsbruck höhere Ausbauprioritäten haben. Der Bedarf an einer fossilfreien Wärmeversorgungsinfrastruktur ist daher hier eindeutig gegeben.

Die Amraser Straße bildet absichtlich die nördliche Grenze des Versorgungsgebietes aus, weil hier das Hochtemperaturfernwärmeversorgungsgebiet anfängt und somit auch ein energetischer Zusammenschluss beider Systeme entlang dieser Achse möglich ist, um Synergien zwischen beiden Wärmeversorgungssystemen zu schaffen.

Die Größe und Nähe der potenziell zu versorgenden Objekte, die Straßenbreiten und Querungsmöglichkeiten von Verkehrsachsen sowie die Untergrundbelegung durch Ver- und Entsorgungsinfrastruktur in dem beschriebenen Versorgungsgebiet sind wichtige physische Eignungsfaktoren für die Versorgung durch eine Leitungsgebundene Wärmeversorgungsinfrastruktur. Das beschriebene Gebiet erfüllt eindeutig die Anforderungen.

Zuletzt ist gegenüber anderen Stadtteilen in Innsbruck der Niedertemperaturwärmebedarfsanteil in dem beschriebenen Gebiet ganzjährig vorhanden (siehe 4.3.1). Die Eignung einer Niedertemperaturversorgungsschiene ist somit eindeutig gegeben.

Es wird bewusst der Ansatz verfolgt, keine vollflächige und vollständige Erhebung bzw. Schätzung des gesamten Wärmebedarfs in dem beschriebenen Versorgungsgebiet zu führen. Zu diesem Zweck müssten entweder aufwändige fragebogenbasierte Ansätze verfolgt werden, wo die Aussagekraft zu sehr von der Qualifikation der Befragten abhängig wäre, oder GIS- basierte Methoden zum Ansatz kommen, wo die zu Grunde legenden Berechnungsansätze (Ableitung aus geschätzten Flächenermittlungen usw.) aufgrund der besonderen Gebäudestruktur zu großen Fehlern führen würde.

Da das Versorgungsgebiet von großen bestehenden Objekten geprägt ist, wird entschieden, gezielte Erhebungen bei diesen Großobjekten zu führen, um möglichst belastbare Daten sammeln zu können, auf jener Basis eine solide Wirtschaftlichkeitsberechnung geführt werden kann. Der pragmatische Ansatz besteht darin, die Wirtschaftlichkeit des Projektes anhand dieser Objekte nachzuweisen.

Die potenziellen, aus Datenschutzgründen bewusst anonymisierten und in Abbildung 6 dargestellten, Objekte sind:

1. Hallenbad
2. Freibad
3. Fußballstadion
4. Rasenheizung im Fußballstadion
5. Veranstaltungshalle und Eishalle
6. Wohngebiet „Bestand“
7. Wohngebiet „2“
8. Wohnneubaugebiet „Pradl Süd“
9. Wohnneubaugebiet „Nord“

Abbildung 6 zeigt die im Versorgungsgebiet ausgewählten Objekte und Quartiere.

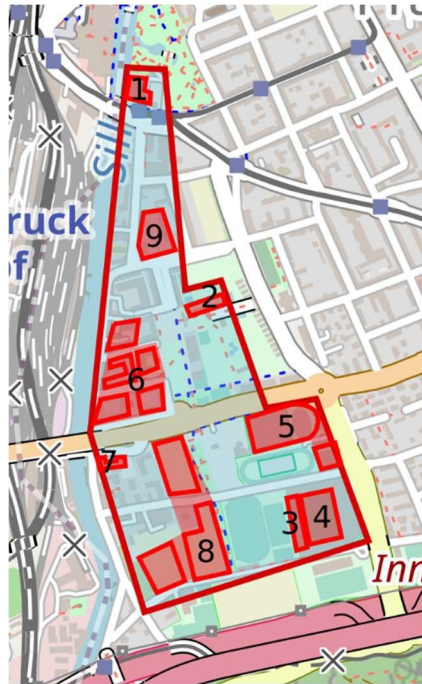


Abbildung 6: Im Versorgungsgebiet werden verschiedenste Objekte und Quartiere ausgewählt, die für eine Detailbetrachtung einer potenziellen Wärmeeinbindung in Frage kommen (IKB, 2022).

4.3.2. Wärme und Kältebedarf sowie Einbindung in das Energienetz

Für die bestehenden Objekte Hallenbad, Freibad, Rasenheizung, Veranstaltungs- und Eishalle, Wohngebiet „Bestand“ sowie Wohngebiet „2“ wird der Wärmebedarf anhand von Aufzeichnungen der letzten Jahre ermittelt.

Im Nahbereich des Tunnelportals wird von gemeinnützigen Wohnbauträgern das Wohnneubaugebiet „Pradl Süd“ entwickelt. In diesem Areal entstehen drei Baufelder mit insgesamt ca. 450 und im Endausbau ca. 800 Wohneinheiten. Diese Neubauten werden nach dem Stand der Technik in Niedrigenergiebauweise, mit einer dichten, thermisch gut gedämmten Gebäudehülle erstellt. Die Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Heiztemperaturniveaus liegen hierdurch deutlich niedriger gegenüber den im Nahbereich des Tunnelportals vorhandenen Bestandsbauwerken.

Für dieses Neubaugebiet „Pradl Süd“ sowie auch für das Wohnneubaugebiet „Nord“ wird der Wärmebedarf anhand von Planungsunterlagen bzw. Basisdaten der errichtenden Bauträger errechnet. Konkret wird mit dem Ansatz Wohnfläche x 50 kWh/m².a und Gewerbefläche x 40 kWh/m².a bei 1.800 Volllaststunden gerechnet. Die Berechnung ergibt einen jährlichen Wärmebedarf im Versorgungsgebiet von 15.6 GWh, wovon ca. 78% auf Hochtemperaturwärme (50°C bis 70 °C) und ca. 22 % auf Niedertemperaturwärme (30°C bis 40°C) entfallen.

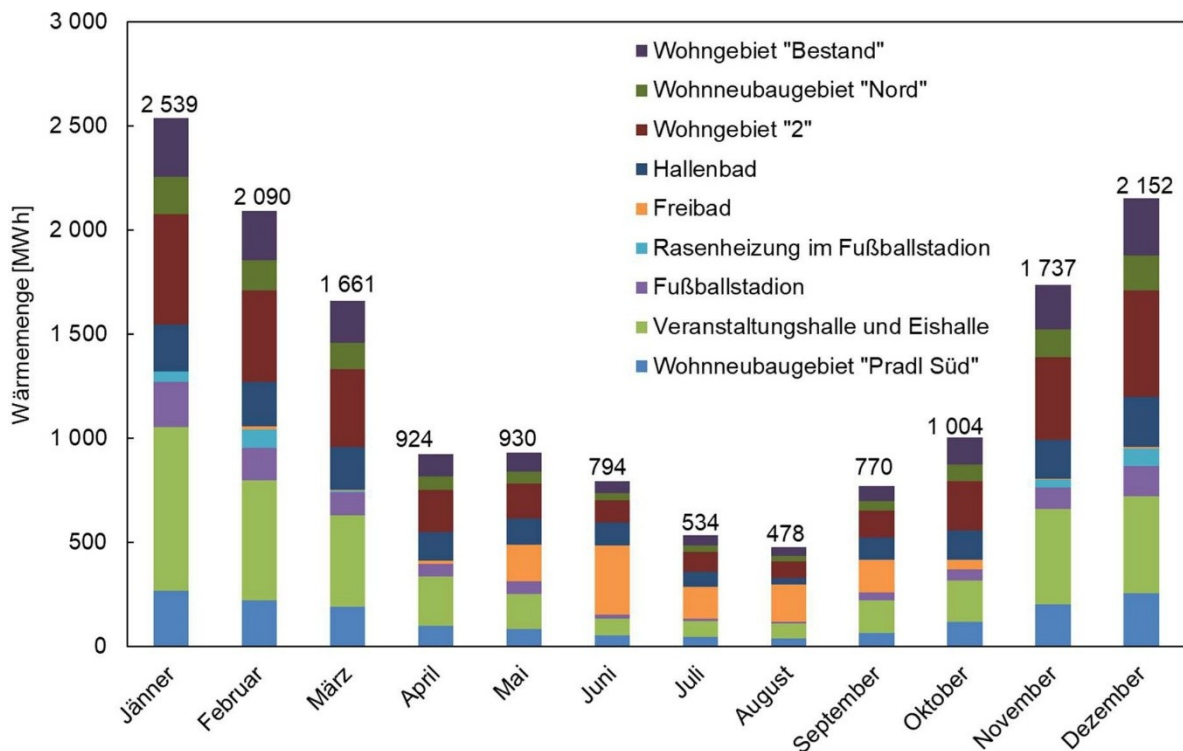


Abbildung 7: Übersicht des monatlichen Wärmebedarfs gegliedert in die untersuchten Gebäude (IKB, 2022).

Abbildung 7 zeigt den erhobenen monatlichen Wärmebedarf im Versorgungsgebiet gegliedert nach den untersuchten Gebäuden. Der monatliche Wärmebedarf schwankt im jährlichen Verlauf zwischen 2 539 MWh im Jänner und 478 MWh im August.

Es ist zu erkennen, dass in den Bestandsgebäuden Wohngebiet „Bestand“ und Wohngebiet „2“ sowie in der Veranstaltungshalle und der Eishalle der Wärmebedarf in den Wintermonaten am höchsten ist. Das Freibad hingegen hat den höchsten Wärmebedarf in den Sommermonaten von Mai bis September, in den restlichen Monaten erfolgt nur eine sehr geringe bis gar keine Wärmeabnahme. Der Wärmebedarf gliedert sich in zwei Temperaturniveaus (Hochtemperaturwärme mit ca. 70°C / Niedertemperaturwärme mit ca. 40°C).

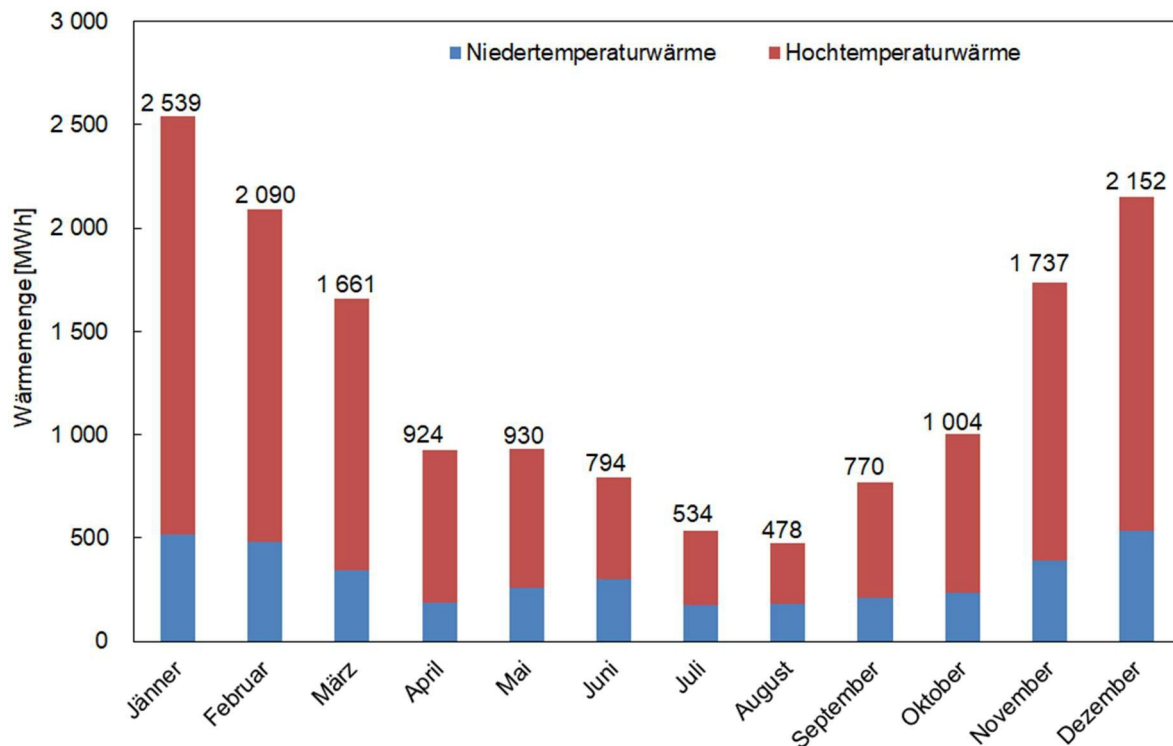


Abbildung 8: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs im Versorgungsgebiet mit Unterscheidung in Niedertemperatur-Wärme (bis 40°C) und Hochtemperatur-Wärme (bis 70°C) (IKB, 2022).

Abbildung 8 zeigt die monatlichen Wärmebedarfsdaten gegliedert in einen Hoch- und Niedertemperaturbereich. Es ist zu erkennen, dass ganzjährig ein nahezu konstanter Bedarf an Niedertemperaturwärme vorliegt. Im Mittel werden monatlich 318 MWh an Niedertemperaturwärme im Versorgungsgebiet benötigt, während der durchschnittliche monatliche Hochtemperaturwärmebedarf bei ca. 983 MWh liegt.

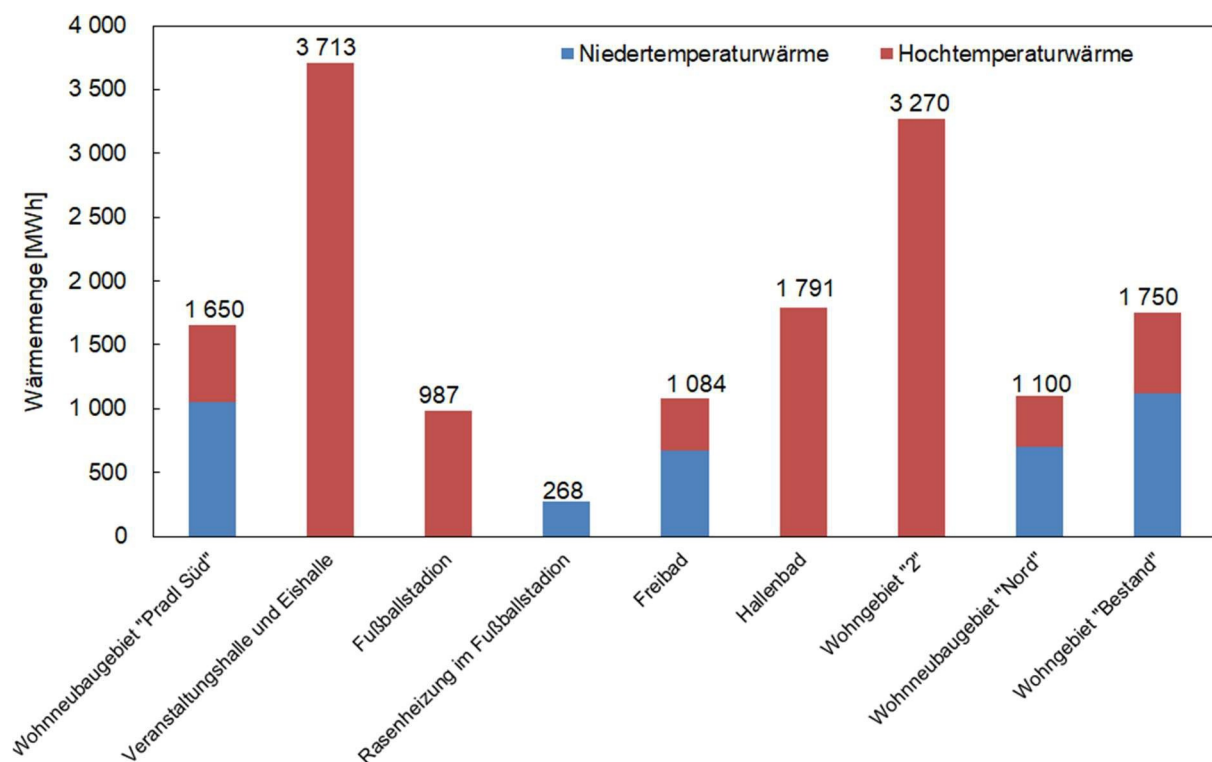


Abbildung 9: Jährlicher Wärmebedarf der einzelnen Objekte im Versorgungsgebiet, gegliedert in Niedertemperatur-Wärme (bis 40°C) und Hochtemperatur-Wärme (bis 70°C) (IKB, 2022).

Abbildung 9 zeigt den jährlichen Wärmebedarf der einzelnen Objekte gegliedert in einen Hoch- und Niedertemperaturbereich. Während bei den Wohnneubaugebieten "Pradl Süd" und "Nord" sowie beim Freibad der Niedertemperaturwärmebedarf überwiegt, ist im Bestandsbau Wohngebiet "2", in der Veranstaltungshalle und Eishalle, im Fußballstadion und im Hallenbad im Jahr 2021 von einem reinen Hochtemperaturwärmebedarf auszugehen.

Maßnahmen, wie die thermische Sanierung der Gebäudehülle, können helfen, den Bedarf an Hochtemperaturwärme zu reduzieren. Bei manchen Objekten (z.B. Fußballstadion) bzw. bei der Veranstaltungshalle ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund der den Objekten inne liegenden Nutzung und einem hohen Bedarf an Warmwasser, ein Großteil der Wärme auch weiterhin auf hohem Temperaturniveau zur Verfügung gestellt werden muss. Lediglich die Rasenheizung im Stadion kann ganzjährig mit Niedertemperaturwärme betrieben werden.

In Tabelle 3 sind ergänzend zu den bereits dargestellten Wärmemengen auch die mit Stand 2021 installierten Heizleistungen der vorwiegend fossilen Wärmeerzeuger dargestellt. Im Versorgungsgebiet entfallen 88% der installierten Heizleistung auf den Hochtemperaturbereich und 12% auf den Niedertemperaturbereich.

Tabelle 3: Zusammenfassung der angeschlossenen Heizleistungen der einzelnen Objekte im Versorgungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Hochtemperatur- und Niedertemperaturwärme (IKB, 2022).

Objekte / Bezeichnung	Installierte Heizleistung Hochtemperatur (70°C / 50°C) [MW]	Installierte Heizleistung Niedertemperatur (40°C / 30°C) [MW]	Installierte Heizleistung Gesamt [MW]
Hallenbad	4,4	-	4,4
Freibad	1,2	0,35	1,55
Fußballstadion	0,65	-	0,65
Rasenheizung	-	0,2	0,2
Veranstaltungshalle und Eishalle	2,2	-	2,2
Wohngebiet "Bestand"	1,8	-	1,8
Wohngebiet "2"	0,5	-	0,5
Neubau Wohngebiet "Pradl Süd"	0,5	0,5	1,0
Neubau Wohngebiet "Nord"	0,6	0,9	1,5
Summe	13,85	1,95	15,8

4.3.3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Gegenüberstellung der untersuchten Netzvarianten

Es werden drei potenziellen Netzvarianten von Wärmeverteilsystemen für die Tunnelwärme identifiziert (siehe Abbildung 10):

- Anergienetz
- Mitteltemperaturnetz
- Hochtemperaturnetz

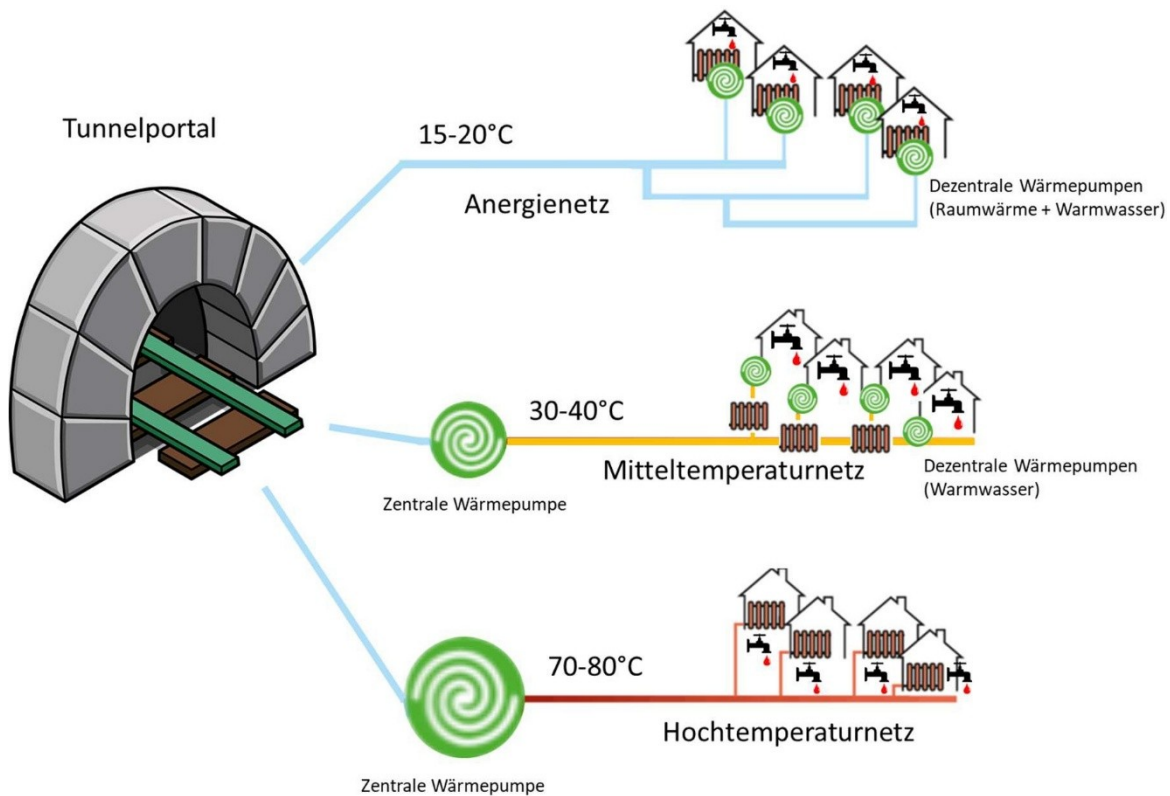


Abbildung 10: Schematische Darstellung der identifizierten Netzvarianten (SEEP, 2022).

Variante Anergienetz

Die Vorlauftemperatur des Anergienetzes beträgt zwischen 15°C und 20°C . Bei dieser Variante wird am Tunnelportal die Wärme mittels Wärmeübertrager in das Anergienetz übertragen. Das Anergienetz wird mit Kunststoffrohren (PE) ohne Wärmedämmung ausgeführt.

In den versorgten Gebäuden wird die Wärme mit dezentralen, in Kaskade geschalteten Wärmepumpen bedarfsgerecht bereit. Abbildung 11 zeigt eine Konzeptdarstellung der Wärmebereitung in den Gebäuden. Das Anergienetz dient hierbei als Wärmequelle für die dezentralen Wärmepumpen. In einer ersten Wärmepumpenstufe wird auf das Raumwärmtemperaturniveau des Gebäudes gehoben. In einer zweiten Wärmepumpenstufe wird auf Brauchwassertemperaturniveau gehoben.

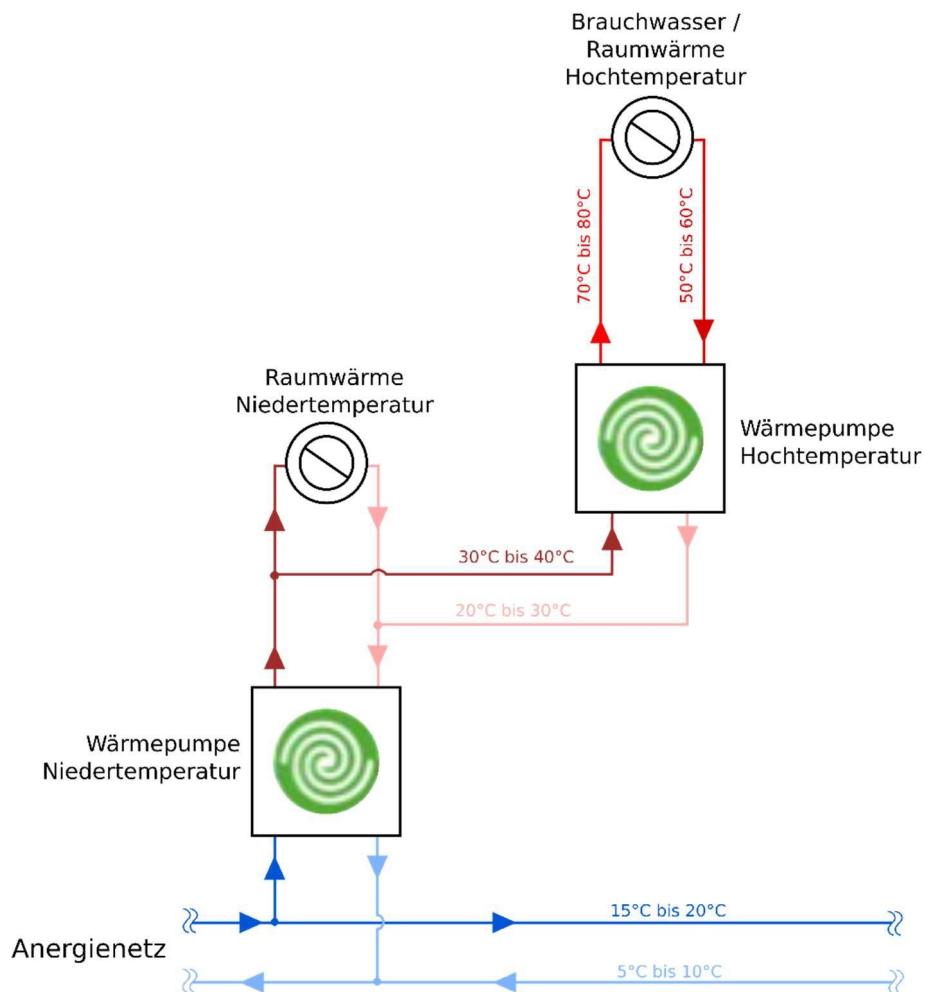


Abbildung 11: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung für die Variante „Anergienetz“. Die Wärme wird mittels in Kaskade geschalteten Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau erzeugt. Die Wärmepumpe für Niedertemperatur nutzt das Anergienetz als Wärmequelle und erzeugt die Wärme für die Niedertemperaturwärmeschiene im Gebäude. Eine zweite Wärmepumpe nutzt die Niedertemperaturwärmeschiene als Wärmequelle und erzeugt Hochtemperaturwärme für Brauchwasser bzw. für sonstige Abnehmer, die Wärme auf hohem Temperaturniveau benötigen (SEEP, 2022).

Das niedrige Temperaturniveau des Anergienetzes bietet mehrere Vorteile. Neben geringen Wärmeverlusten an das Erdreich ist die Einbindung von weiteren Abwärmequellen möglich. Zudem kann das Anergienetz für gleichzeitige Kälteanwendungen herangezogen werden, wenn die tiefe Netzzücklauftemperatur zu Kühlzwecken geeignet ist. Abbildung 12 zeigt schematisch die Kühlmöglichkeiten für verschiedene Anwendungsfälle mit dem Anergienetz.

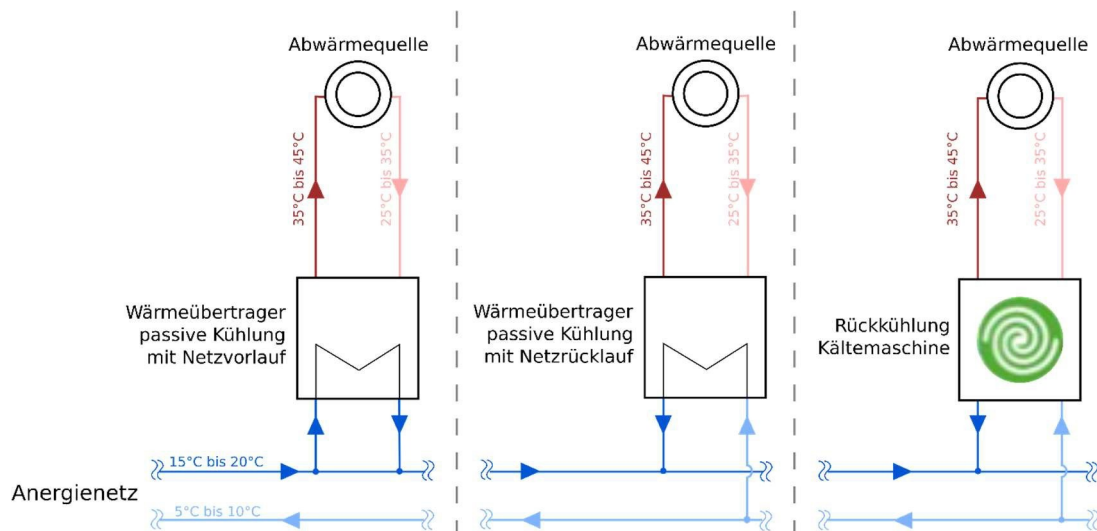


Abbildung 12: Kühlmöglichkeiten durch das Anergienetz. Mit dem Anergienetz kann passive Kühlung mittels Vorlauf oder Rücklauf erfolgen, je nachdem wieviel Wärme und bei welchem Temperaturniveau die Wärme aus dem Objekt abgeführt werden muss. Die Abwärme wird im Anergienetz wieder als Wärmequelle für andere Objekte genutzt. Zusätzlich kann das Anergienetz als Rückkühlmöglichkeit für aktive Kühlung mittels Kältemaschinen genutzt werden (SEEP, 2022).

Tabelle 4 fasst die Vor- und Nachteile der Variante „Anergienetz“ zusammen.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile Anergienetz

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Netzverluste • Geringe Betriebskosten für den Netzbetreiber • Flexibler Netzbetrieb mit Nutzung des Vor- oder Rücklaufs zu Heiz- oder Kühlzwecken, ggfls. gleichzeitig • Einbindung von zusätzlichen Niedertemperatur- und Abwärmequellen (Wärme aus Grundwasser und Erdsonden als Redundanzlösung) • Effiziente und bedarfsgerechte Wärmebereitung durch hohe Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen, ggfls. in Vergleich zu erdreichgekoppelten Wärmepumpensystemen • Kühlmöglichkeiten über passive Kühlung und Rücklaufnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand für dezentrale Wärmepumpen, die in jedem Fall bedarfsgerecht auszulegen sind (Temperaturniveau Wärmebedarf) • Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten in den Objekten zur Aufstellung der dezentralen Wärmepumpen • Kostenübernahme der dezentralen Wärmepumpen • Gebäude mit niedrigen Temperaturanforderungen für Heizung nötig • Geringe Unterschiede zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen; dies führt zu höheren Durchflussraten, die größere und teurere Rohre erfordern.

Variante Mitteltemperaturnetz

Die Vorlauftemperatur des Mitteltemperaturnetzes beträgt zwischen 30°C und 40°C, um hiermit die Möglichkeit zu haben, ohne weitere Wärmepumpen Niedertemperaturwärmeanwendungen direkt bedienen zu können. Am Tunnelportal wird die Tunnelwärme mittels zentraler Wärmepumpe auf das Netztemperaturniveau gehoben. Das Mitteltemperaturnetz wird mit gedämmten Stahlrohren ausgeführt.

In den versorgten Gebäuden wird die Wärme auf Mitteltemperaturniveau direkt für Raumwärmezwecke genutzt (siehe Abbildung 13). Mittels Wärmepumpe wird das Brauchwasser erwärmt bzw. die Hochtemperaturwärme bis 70°C für Heizsysteme erzeugt, die auf dieses Temperaturniveau ausgelegt sind. Hierfür wird das Mitteltemperaturnetz als Wärmequelle verwendet.

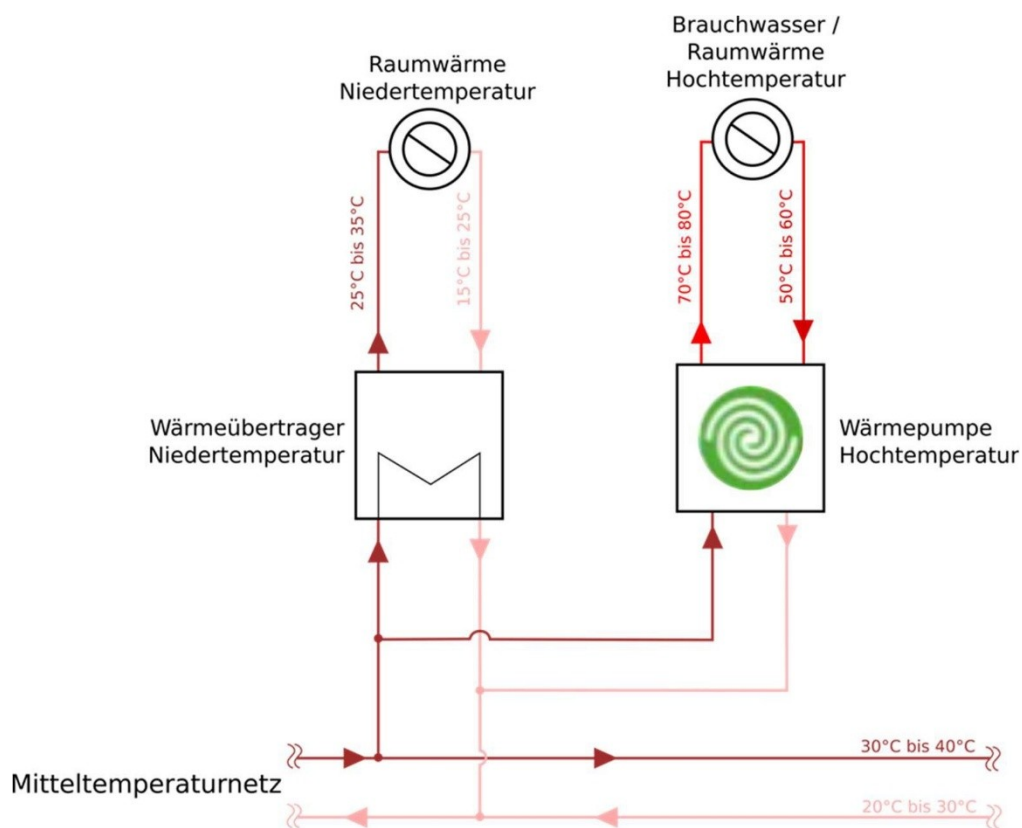


Abbildung 13: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung Variante „Mitteltemperaturnetz“. Die Wärme für die Niedertemperaturraumwärme wird direkt aus dem Mitteltemperaturnetz mittels Wärmeübertrager entnommen, während die Wärme für die Brauchwasserbereitung bzw. Hochtemperaturraumwärme wird mittels dezentraler Wärmepumpe erzeugt (SEEP, 2022).

Durch die niedrigeren Temperaturniveaus im Mitteltemperaturnetz können die Wärmeverluste im Erdreich im Vergleich zu einem klassischen Fernwärmenetz im Durchschnitt von ca. 10% auf ca. 7% reduziert werden. Die Einbindung von Abwärmequellen (bis ca. 50°C) in das Mitteltemperaturnetz ist dabei auch möglich. Tabelle 5 fasst die Vor- und Nachteile der Variante „Mitteltemperaturnetz“ zusammen.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile Mitteltemperaturnetz

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Netzverluste im Vergleich zu Hochtemperaturfernwärmenetzen • Flexibler Netzbetrieb • Einbindung von Niedertemperaturwärmequellen teilweise noch möglich • In Objekten muss nur mehr Hochtemperaturwärme (ca. 70°C) erzeugt werden, wo diese wirklich gebraucht wird • Effiziente Wärmebereitung (hohe COPs möglich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten in den Objekten zur Aufstellung der dezentralen Wärmepumpen • Kosten der dezentralen Wärmepumpen höher als größere Wärmepumpen (economy of scale) • Hohe Investitionskosten durch zentrale und dezentrale Wärmepumpen • Gebäude mit niedrigen Temperaturanforderungen für Heizung vorteilhaft • Keine Kühl- oder Rückkühlmöglichkeiten

Variante Hochtemperaturnetz

Die Vorlauftemperatur des Hochtemperaturnetzes beträgt zwischen 70°C bis 80°C. Am Tunnelportal wird die Tunnelwärme mittels zentraler Wärmepumpe auf das maximale Netztemperaturniveau gehoben, das in den zu versorgenden Gebäuden gebraucht wird. Das Fernwärmenetz wird mit gedämmten Stahlrohren ausgeführt.

Dadurch, dass das Fernwärmenetz die Wärme auf jenes Temperaturniveau verteilt, das direkt für alle Heizungs- und Warmwasserbereitungsanwendungen genutzt werden kann, sind abgesehen von Standardfernwärmeübergabestationen keine weiteren Anlagenteile bei den Kundenanlagen nötig. Abbildung 14 zeigt die Konzeptdarstellung der Wärmebereitung der Variante „Hochtemperaturnetz“.

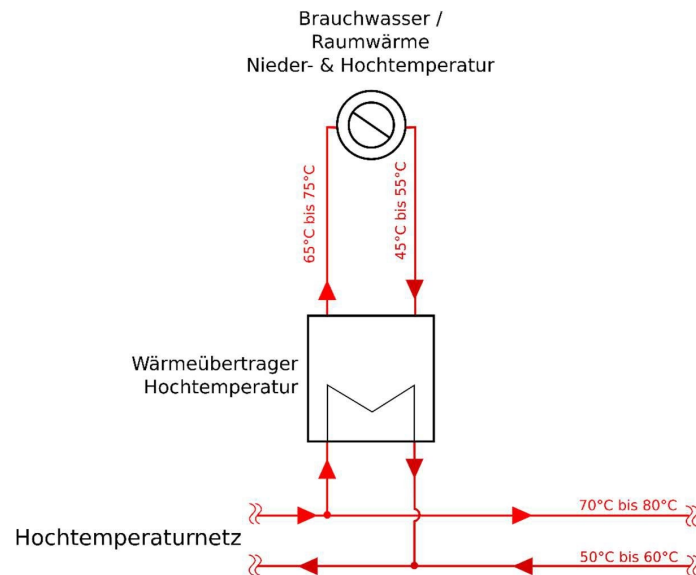


Abbildung 14: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung Variante „Hochtemperaturnetz“. Die Wärme wird direkt aus dem Hochtemperaturnetz mittels Wärmeübertrager entnommen (SEEP, 2022).

Die Vorteile dieser Variante liegen in der einfachen Installation bei den Kundenanlagen und dem geringen Platzbedarf in den Gebäuden sowie der Bekanntheit dieser Form der Wärmeversorgung (Standardhochtemperaturfernwärme). Ein wesentlicher Nachteil dieser Lösung besteht darin, dass der gesamte Wärmebedarf im Versorgungsgebiet zuerst mit niedrigen COP-Werten auf Hochtemperaturniveau abgedeckt werden muss, um in einem nächsten Schritt bei den Kundenanlagen auf Niedertemperaturniveau abgegeben zu werden (Exergieverlust). Tabelle 6 fasst die Vor- und Nachteile der Variante „Fernwärmenetz“ zusammen.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile Hochtemperaturnetz

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Die derzeit gängige Fernwärmetechnik Es werden handelsübliche Komponenten verwendet, die nach bekannten Methoden installiert werden. Direkte Nutzung der erzeugten Wärme Platzbedarf in den Objekten gering Keine zusätzlichen technischen Geräte (Wärmepumpen) bei Kundenanlagen nötig Gebäude jeglicher Art können mit Wärme versorgt werden Direkte Verbindung an der Hochtemperaturfernwärme möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Exergieverluste Höhere Netzverluste Höhere Netzbetriebskosten Niedrigere COP Limitierung der thermischen Leistung durch Auslegungsgröße der Hochtemperaturwärmepumpen Einbindung von Wärmequellen nur sehr eingeschränkt möglich Keine Kühl- oder Rückkühlmöglichkeiten

Trassierung des Wärmenetzes

Die Trassierung des geplanten Wärmenetzes ist bereits in Ausarbeitung. Dabei muss auf bauliche Hindernisse bzw. bauliche Herausforderungen (Brücken, Straßen, etc.) sowie bereits im Erdreich erlegte Infrastruktur (Gas, Wasser, Abwasser, Strom) beachtet werden. Abbildung 15 zeigt die derzeit geplante Trassenführung für das Wärmenetz.



Abbildung 15: Derzeit geplante Trassenführung (IKB, 2022).

In klassischen Hochtemperaturfernwärmenetzen sind die Vorlauftemperaturen hoch genug, um den typischen Wärmebedarf in Gebäuden ohne zusätzliche Wärmeversorgung zu liefern. Dem gegenüber werden in Anergiesystemen sehr niedrige Vorlauftemperaturen bereitgestellt. Dementsprechend ist dann eine zusätzliche Wärmeversorgung bei den Kundenanlagen erforderlich, um die typischen Temperaturanforderungen zu erfüllen. Im Projekt ThermoCluster wird zusätzlich eine Mitteltemperaturvariante betrachtet. Die wesentlichen Merkmale von den drei Konfigurationen werden in diesem Abschnitt, einschließlich typischer Temperaturniveaus, gegenübergestellt. Die Temperaturniveaus für Vor- und Rücklauf sind als jährliche, über die Zeit gemittelte Werte ausgedrückt. Schwankungen treten täglich, stündlich und saisonal auf. In Tabelle 7 sind abschließend die technisch relevanten Kriterien der untersuchten Netzvarianten zusammengefasst.

Zur Beurteilung der Gesamteffizienz der unterschiedlichen Systeme im Vergleich wird eine Systemleistungszahl definiert, die sich analog eines COPs aus dem Verhältnis zwischen Heizleistungsbedarf im Versorgungsgebiet und Stromaufnahmeleistung für den Betrieb der Wärmepumpen rechnet. In einer ersten Annäherung wird die Pumpenstromaufnahmeleistung in diesem Vergleich nicht herangezogen. Die Detailberechnung zur Systemeffizienz ist ergänzend im Anhang im Kapitel 9.1 bis 9.2 angeführt.

Tabelle 7: Zusammenfassung der technischen Kriterien der betrachteten Netzvarianten.

	Anergienetz	Mitteltemperaturnetz	Hochtemperaturnetz
Vorlauftemperatur	15°C – 20°C	30°C – 40°C	70°C – 80°C
Rücklauftemperatur	5°C – 10°C	20°C – 30°C	50°C – 60°C
Leitungsmaterial	PE	Stahl	Stahl
Wärmedämmung	-	PU mit PE-HD Mantel	PU mit PE-HD Mantel
Dimension Hauptstrang	250 mm	250 mm	200 mm
Anteilmäßige Wärmeverteilungsverluste	0,1%	7%	10%
Entzugsleistung Tunnel	3,77 MW	3,77 MW	3,77 MW
Nutzbare thermische Leistung beim Endkunden⁴	5,32 MW	4,96 MW	5,07 MW
Aufzubringende elektrische Leistung	1,56 MW	1,48 MW	1,86 MW
Systemeffizienz⁵	3,4	3,3	2,7

⁴ Durch Wärmepumpen auf Nutztemperaturniveau gehoben und unter Berücksichtigung der Verluste im Wärmenetz

⁵ Die Berechnung der Systemeffizienz ist im Anhang in Kapitel 9.1 bis 9.3 nachzulesen. Der COP der Wärmepumpen der drei Varianten errechnet sich aus dem Produkt der Leistungszahl nach Carnot für Wärmepumpen $\epsilon_{C,WP}$ und dem Gütegrad. Der Gütegrad wird mit 50% für alle Varianten konstant angenommen. Für die Leistungszahl nach Carnot werden die mittleren Temperaturniveaus der Wärmequelle und der Wärmesenke herangezogen.

Tatsächlicher Heizleistungsbedarf im Versorgungsgebiet (ohne Gleichzeitigkeitsfaktor))	15,8 MW	15,8 MW	15,8 MW
Verhältnis abgegebene thermische Leistung am Tunnelportal zu tatsächlichem Heizleistungsbedarf	33,7%	31,4%	32,1%

5 Ergebnisse

5.1. Geothermisches Potential des Brenner Basistunnels und im Nahbereich

5.1.1. Ergebnisse zum geothermischen Potential im Nahbereich des Brenner Basistunnels

Im Folgenden werden die erarbeiteten Ergebnisdatensätze vorgestellt. Auf Basis der erhobenen Eingangsdaten wurde zur Kartendarstellung ein Gebiet ausgewählt, das sich über das Untersuchungsgebiet erstreckt.

Erdwärmesonden

Für Erdwärmesonden liegt generell überall ein Potential vor. Sie können in allen Gebieten errichtet werden, wo keine Einschränkungsgründe vorliegen.

In dem Untersuchungsgebiet variiert die spezifische Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen mit Norm- Betriebsstunden zwischen 38,2 und 40,3 W/lm für das Tiefenintervall 0 – 100 m und zwischen 39,3 und 40,8 W/lm für das Tiefenintervall 0 – 150 m. Die Differenz zwischen den Entzugsleistungen der zwei Tiefenintervalle beträgt maximal 1,1 W/lm. Die spezifische Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise wurde für 0 – 100 m und 0 – 150 m Tiefe dargestellt (Abbildung 16 und Abbildung 17). Die Entzugsleistung bei ausgeglichener Betriebsweise beträgt in dem Untersuchungsgebiet 40,4 – 42,5 W/lm bis 100 m Tiefe und 41,8 – 43,2 W/lm bis 150 m Tiefe. Die Differenz zwischen den zwei Tiefenintervallen ist in beiden Fällen unbedeutend. Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Betriebsweise bei Normbetriebsstunden zeigt jedoch, dass mit ausgeglichener Betriebsweise etwas höhere Leistungen erreicht werden können.

Die Jahresenergiemengen für Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden für 0 – 100 m und 0 – 150 m Tiefe werden in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. In dem Untersuchungsgebiet variiert die Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden zwischen 80,5 und 85,6 kWh/m²/a für das Tiefenintervall 0 – 100 m und zwischen 120,8 und 125,8 kWh/m²/a für das Tiefenintervall 0 – 150 m. In dem Untersuchungsgebiet beträgt die Jahresenergiemenge bei ausgeglichener Betriebsweise 299,5 – 314,2 kWh/m²/ für 0 – 100 m und 463,4 – 477,8 kWh/m²/a für 0 – 150 m.

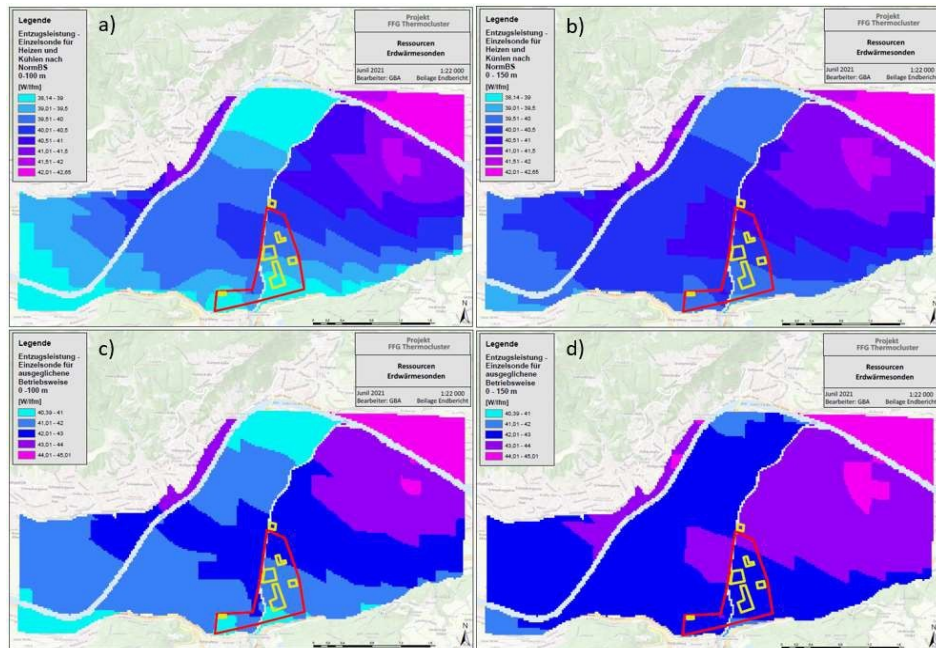


Abbildung 16: Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen nach Norm–Betriebsstunden für das Tiefenintervall a) 0 – 100 m, b) 0 – 150 m. Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise für das Tiefenintervall c) 0 – 100 m, d) 0 – 150 m. Rote Umrandung: Zielgebäude, NormBS – Norm–Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).

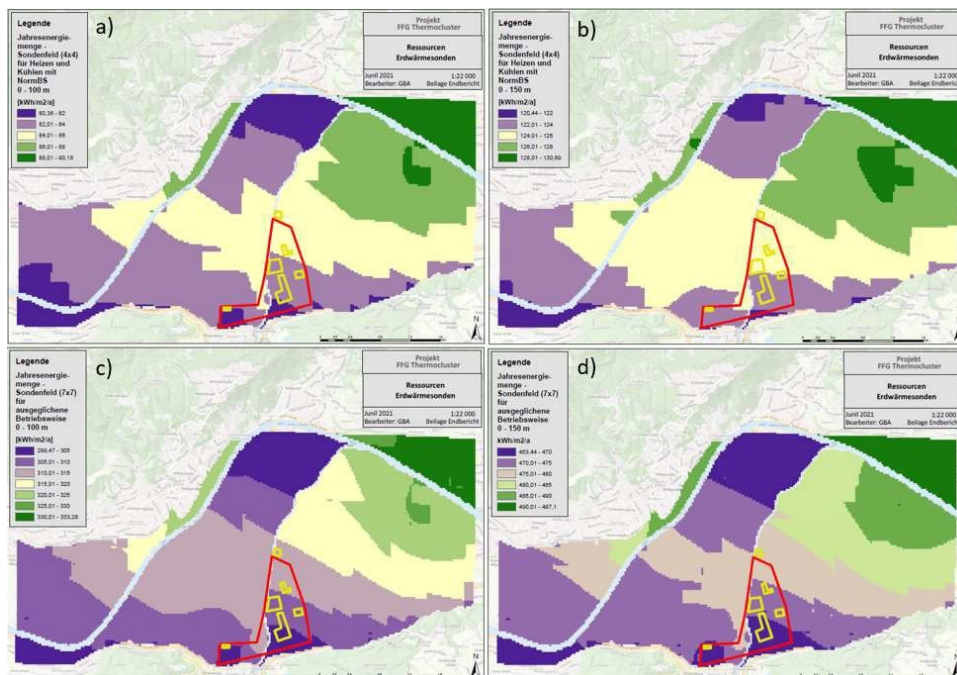


Abbildung 17: Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit Norm–Betriebsstunden für das Tiefenintervall a) 0 – 100 m, b) 0 – 150 m. Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise für das Tiefenintervall c) 0 – 100 m, d) 0 – 150 m. Rote Umrandung: Untersuchungsgebiet, gelbe Umrandung: Zielgebäude, NormBS – Norm–Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).

Thermische Grundwassernutzung

Die Nutzung der Grundwasserwärme ist in dem Untersuchungsgebiet generell möglich, da ein geeigneter oberflächennaher Grundwasserkörper am Standort anzutreffen ist. Das Gebiet zeichnet sich durch eine sehr hohe Grundwassermächtigkeit aus. Die Berechnung der Ressourcen für thermische Grundwassernutzung beschränkt die maximale Grundwassermächtigkeit mit 20 m. In dem Gebiet überschreitet die Mächtigkeit überall 20 m, daher wurde für das ganze Gebiet der Maximalwert erreicht. Somit ergab die Berechnung eine konstante Brunnenleistung von 21,67 l/s und eine Vollastleistung von 444,3 kW in dem Untersuchungsgebiet. Als Ergebnis der Berechnung lag der spezifische Energieinhalt im Untersuchungsgebiet zwischen 35 und 44,6 kWh/m²/a bei Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden und zwischen 157,3 und 181,8 kWh/m²/a bei einem Betrieb mit ausgeglichener Betriebsweise.

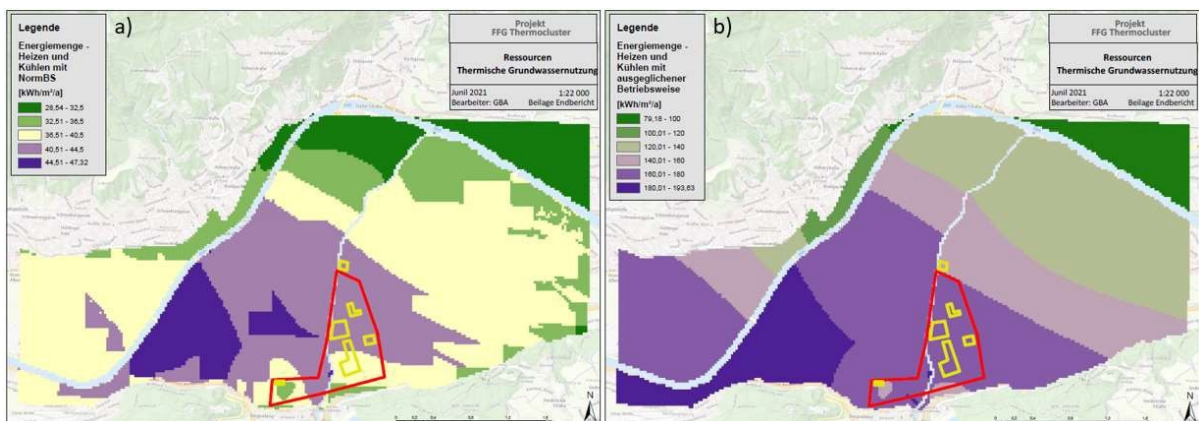


Abbildung 18: Spezifischer Energieinhalt bei Heizen und Kühlen mit a) Norm-Betriebsstunden, b) ausgeglichener Betriebsweise. Rote Umrandung: Untersuchungsgebiet, gelbe Umrandung: Zielgebäude. Norm-BS – Norm-Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).

5.1.2. Ergebnisse zu Abflussmengen und Temperaturen

Abflussraten und Temperaturen während der Bauphase

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abflussmengen am Portal Sillschlucht im Zeitraum Mai 2020 - Mai 2021 kontinuierlich von 49,1 l/s auf 40,0 l/s sinken. Im Zeitraum Mai 2020 - April 2021 zeigt einer der größten Wärmeversorgungsabschnitte, nämlich TS3, eine kontinuierliche Abnahme, bis die Abflussrate im Mai 2021 wieder ansteigt. Die theoretisch berechnete Temperatur der Abschnitte zeigt die höchsten Temperaturen im August mit 22,0 °C und die niedrigsten Temperaturen im April mit 18,7 °C. In den Wintermonaten, von Dezember bis April, liegt die Temperatur zwischen 19,7 °C und 18,7 °C. In den saisonal wärmeren Monaten schwankt die Temperatur zwischen 22 °C und 20,1 °C. Die gemessene Temperatur schwankt zwischen 20,4 °C im August und 14,7 °C im Januar. In den Wintermonaten von Dezember bis April schwankt sie zwischen 16,3 °C und 14,7 °C. Die Abweichung (Abkühlung des Tunnelwassers während des Abflusses innerhalb des Tunnels) der gemessenen Temperatur von der theoretisch berechneten Temperatur ist im Januar mit 4,4 °C am höchsten, während sie im Juni und September mit 1,2 °C am niedrigsten ist (Abbildung 19).

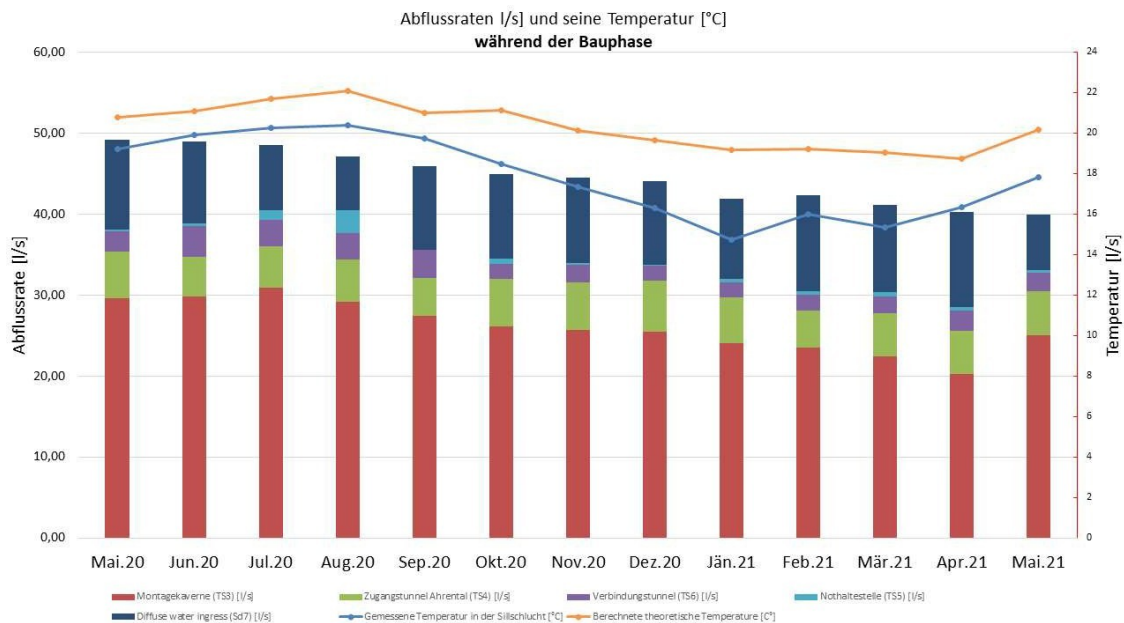


Abbildung 19: Abflussmengen und Temperaturen während des Bauzustandes aus (Geisler et al., 2022).

Prognose für Abflussrate und Temperaturen von Szenario 1

Abbildung 20 zeigt die Prognose für die Betriebsphase von Szenario 1. Demnach schwanken die Abflussmengen zwischen 96,4 l/s im September 2020 und 88,6 l/s im April 2021. Etwas höhere Abflussraten treten von September bis Dezember 2020 auf. Die theoretisch höchste Temperatur würde im Juli mit 21,6 °C herrschen, während die niedrigste im Dezember desselben Jahres mit 18,5°C auftreten würde. Die minimale Temperatur, die durch die Abkühlung in der Mittelgebirgsregion entsteht, wäre im Juli mit 20,9 °C am höchsten, während sie im Dezember mit 16,9 °C am niedrigsten wäre. Die Abweichung von der theoretischen zur minimalen Temperatur ist im September mit 0,6 °C am geringsten, während sie im Januar mit 2,1 [°C] am höchsten wäre.

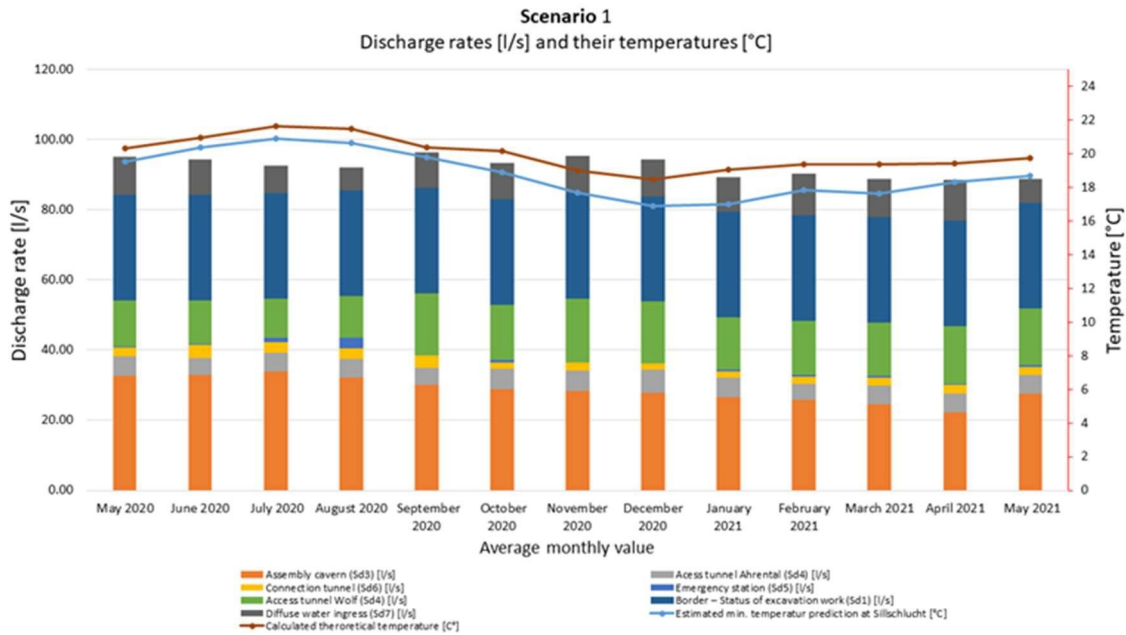


Abbildung 20: Prognose für die Betriebsphase von Szenario 1 aus (Geisler et al., 2022)

Prognose für Abflussrate und Temperaturen von Szenario 2

Abbildung 21 zeigt Szenario 2. Die Abflussrate wäre im September 2020 mit 120,9 l/s am höchsten und im April 2021 mit 111,6 l/s am niedrigsten. Auch hier würden in den Monaten September bis Dezember etwas höhere Abflussraten auftreten. Die theoretisch höchsten Temperaturen würden im Juli mit 23,2°C auftreten, während das Minimum im Dezember mit 20,6 °C zu verzeichnen wäre. Die berechnete Mindesttemperatur wäre im Dezember mit 19,4 °C am niedrigsten und im Juli mit 22,6 °C am höchsten.

Die Abweichung zwischen der theoretischen Temperatur und der durch Kühlung beeinflussten Temperatur wäre im Januar mit 1,6 °C am höchsten und im September mit 0,5 °C am niedrigsten.

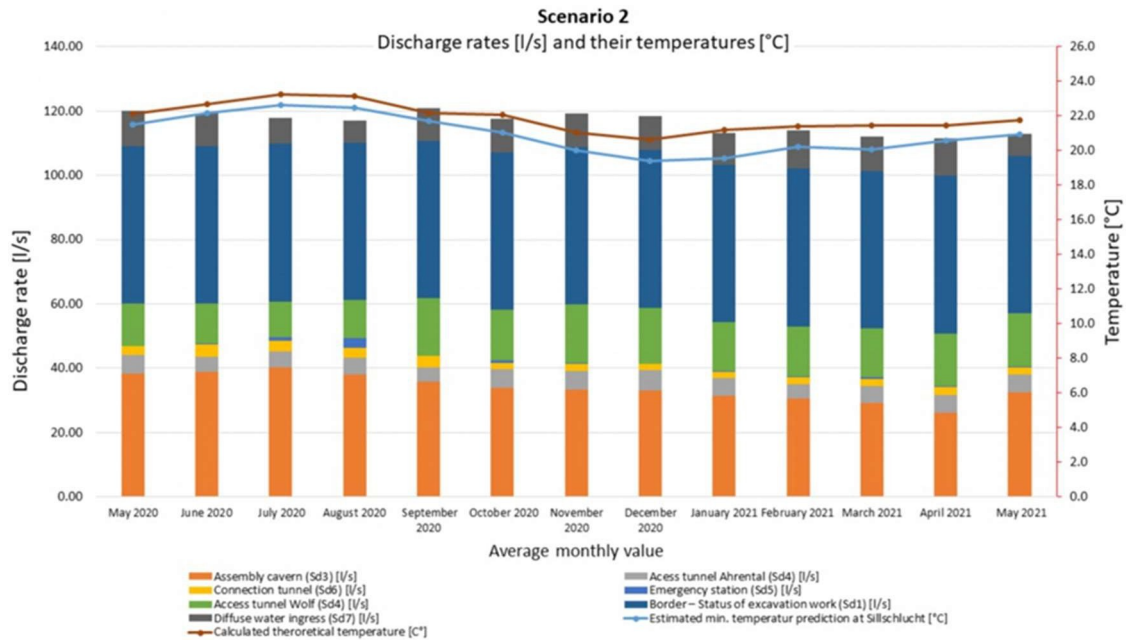


Abbildung 21: Prognose für die Betriebsphase von Szenario 2 aus (Geisler et al., 2022)

Das prognostizierte geothermische Potenzial nach Fertigstellung des BBT

Die Berechnung der geothermischen Leistung (3) für die Szenarien 1 und 2 zeigt, dass die Heizleistung bei Berücksichtigung der theoretischen Mischtemperaturen höher ist. Im Jahresdurchschnitt ist sie um 0,45 MW höher als die auf der Grundlage der Mindesttemperaturen berechnete Heizleistung. Die höchste Abweichung ist demnach im Januar mit 0,78 MW zu beobachten, während die geringste im Juni mit 0,24 MW auftritt. Für Szenario 1 (Abbildung 22) wird die höchste Leistung im Juli erwartet und liegt zwischen einem Maximalwert von 4,50 - 4,21 MW. Die niedrigste thermische Leistung wird im Dezember und Januar mit 2,61 - 3,34 MW erwartet. Szenario 2 (Abbildung 23) zeigt ebenfalls, dass die höchste Leistung im Juli zu erwarten ist und sich zwischen einem Maximalwert von 6,52 MW - 6,23 MW bewegt. Die geringste thermische Leistung wird im Dezember und Januar mit 4,54 - 5,27 MW erwartet.

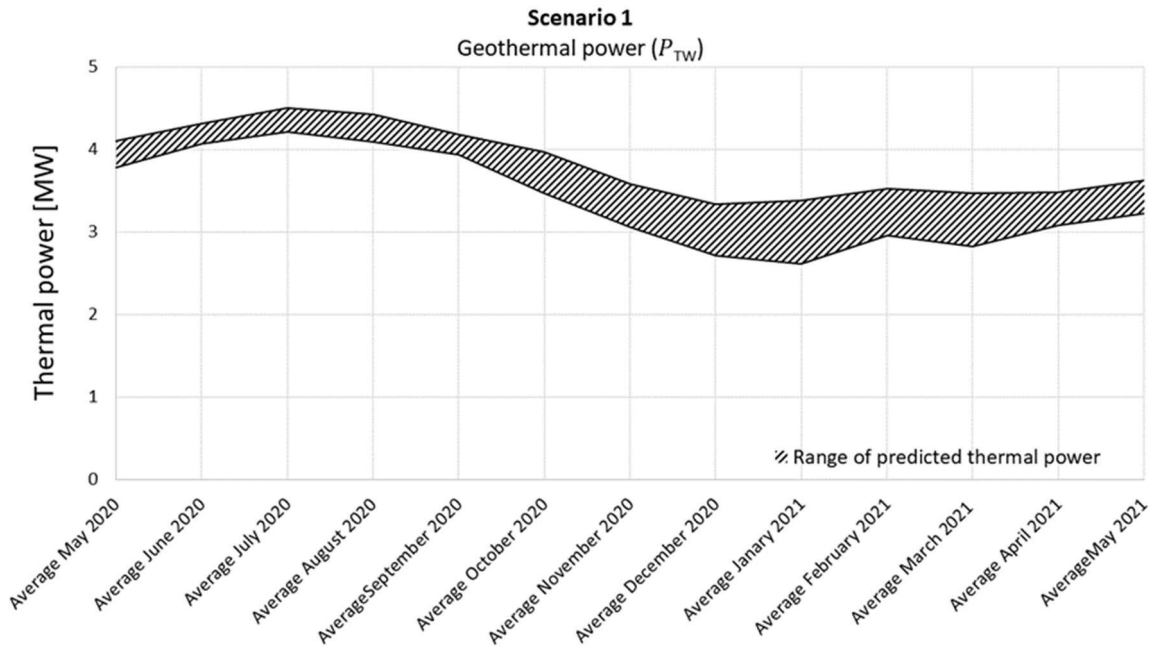


Abbildung 22: Berechnung der geothermischen Leistung für Szenario 1 aus (Geisler et al., 2022)

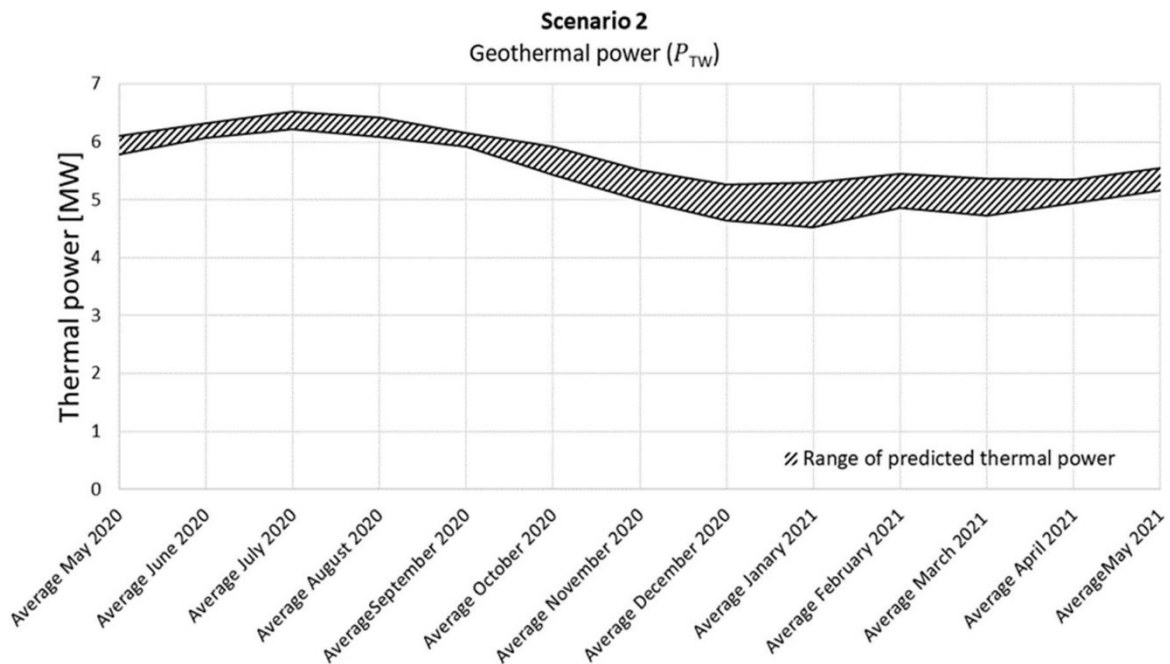


Abbildung 23: Berechnung der geothermischen Leistung für Szenario 2 aus (Geisler et al., 2022)

5.1.3. Ergebnisse zur hydrochemischen Analyse

Die Auswertung der Daten zeigt eine gemäß der vorhandenen Geologie zu erwartende Hydrochemie, die durch hohe Konzentrationen an Kalzium- und Hydrogenkarbonationen geprägt ist. Während es für den Betrieb von Wärmepumpen keine regulatorischen Vorgaben bezüglich der

Wasserchemie gibt, gibt es sehr wohl technische Vorgaben bzw. Empfehlungen, um einen langfristigen und gesicherten Betrieb aufrecht zu erhalten. Vier Einzelzutritte weisen eine stark erhöhte und möglicherweise problematische Sulfatkonzentration auf. Da die dazugehörigen Schüttungen jedoch vergleichsweise gering sind, ist die Sulfatkonzentration des Mischwassers im akzeptablen Bereich. Des Weiteren wird erwartet, dass die finale Sulfatkonzentration noch geringer sein wird als im derzeitigen Wasser am Portal Sillschlucht, da sie durch das Wasser aus der Hochstegenzone, einem Bereich reinen Kalzitmarmors mit hohen Schüttungen, weiter verdünnt wird. Die Analyse der hydrochemischen Daten der diversen Teilströme im Brennerbasistunnel hat ergeben, dass das Wasser stark übersättigt ist in Bezug auf Kalzit und (in wesentlich geringerem Maße) Dolomit. Die zu erwartenden Ausfällungen bewegen sich zur Zeit in der Größenordnung 1mm/a, wobei mit einer Erhöhung auf >2mm/a gerechnet werden muss, sobald der Tunnel die finale Ausbaustufe erreicht hat. Laut aktuellem Wissensstand ist nicht mit korrosiven Phasen zu rechnen. Kalzitausfällungen stellen ein Risiko in Bezug auf Lebensdauer und Wartungskosten des Wärmeübertragers dar und das Wissen über Art und Menge der Ausfällungen sollte bei der Wahl des Wärmetauschers (Material, Geometrie) und der Reinigungsmethode berücksichtigt werden.

5.1.4. Ergebnisse zur numerischen Modellierung

Der betrachtete Tunnelabschnitt (Erkundungsstollen, ca. TM 12+570 bis ca. TM 13+200) hat ein wasserführendes Netzwerk von Diskontinuitäten (Klüfte, Schieferungsflächen) in kalkreichen Bündnerschiefern angetroffen, rechnerisch abgebildet durch einen relativ durchlässigen Bereich um den Tunnel, einer Erstreckung von einigen 100 m ins Gebirge hinein sowie einer effektiven Gebirgsdurchlässigkeit im Bereich von $5 \cdot 10^{-8}$ bis $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dieser Aquifer ist an den schmalen, sehr steil Richtung Süden fallenden Nordschenkel einer W–E-streichenden geologischen Mulde gebunden, der am Hang zwischen Navistal im Norden und Schröflkogel im Süden an der Oberfläche hervortritt. Der zunächst angenommene Grundwasser-Anstrom aus diesem Muldenschenkel von Osten her kann höchstens über eine relativ durchlässige oberflächennahe Zone stattfinden und wird im tieferen Gebirge durch eine lineare, undurchlässige Struktur blockiert, oder kann nicht stattfinden, weil die Gebirgsdurchlässigkeit östlich dieser Struktur sehr gering ist. In besagter oberflächennaher Zone folgt der Grundwasserzug dem topografisch vorgegebenen Gradienten (zwischen Pliderlingbach- und Wipptal) gegen Westen. Unterhalb dieser Zone ist die Sickerung im Prinzip vertikal und sehr gering, die Grundwasser-Absenkung über dem Tunnel daher wahrscheinlich ebenfalls gering. Die regional wirksame Gebirgsdurchlässigkeit in dem als Aquifer definierten Teil der kalkreichen Bündnerschiefer, außerhalb des durchlässigen Bereichs um den Tunnel, beträgt ca. 10^{-9} m/s und ist damit circa zwei Zehnerpotenzen geringer als die aus Voruntersuchungen abgeleitete, messbare Durchlässigkeit (gewichtetes Mittel $2 \cdot 10^{-7}$ m/s), die nur lokale Gültigkeit besitzt. Die rechnerisch beste Modellvariante sagt eine Gleichgewichtseinstellung des Fließsystems in einer Zeit von 2 – 3 Jahrzehnten auf einem Zuflussniveau von ca. 3.0 – 7.5 l/s aus dem untersuchten Tunnelabschnitt voraus. Auf Basis der gemessenen Abfluss-Ganglinie (Messstelle "EKS Ahrental") können jedoch bisher weder der schlimmste Fall eines isolierten Aquifers (quasi-stationärer Zustand), der zu einer größeren Absenkung, noch das künftige Wirksamwerden einer nicht berücksichtigten, positiven Randbedingung (Gewässer oder anderer Aquifer, der mit einem solchen in Verbindung steht), die zu einer geringeren Absenkung führen würde, ausgeschlossen werden. Grundsätzlich gibt die Modellierung einen Einblick in ein mögliches hydrologisches Verhalten, das auf wenigen, gewählten und noch zu validierenden Randbedingungen beruht. Die

vorhergesagte Gleichgewichtssituation, die Zeit, die dafür benötigt wird, und die langfristigen stationären Abflüsse müssen zeitlich validiert und weiter untersucht werden.

5.2. Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit und Verteilung zu Konsument:innen

In einer ersten Abschätzung werden die Investitionskosten der drei Netzvarianten erhoben und gegenübergestellt. Als Referenzszenario wird die Wärmeversorgung mittels zentralen Luftwärmepumpen herangezogen. Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass eine Infrastrukturversorgung wie bei einem Fernwärmenetz vorliegt, jedoch die Netzstrecke vom Versorgungsgebiet zum Tunnel nicht errichtet werden muss. Aus diesem Grund liegen die Netzkosten für die Variante "Luftwärmepumpe" niedriger als die Variante "Hochtemperaturnetz". Die Wärme wird über mehrere, im Netz angeordnete luftbetriebene Großwärmepumpen in das Wärmenetz eingebracht.

Als Datengrundlage für die Erhebung der Investitionskosten werden die Ergebnisse von Preisabfragen und Projektauswertungen für die Leitungen, die Errichtung des Bauwerks am Tunnelportal sowie die Wärmepumpen herangezogen.

5.2.1. Kosten der Leitungsinfrastruktur

Die Kostenermittlung für das Anergienetz basiert auf bereits errichteten Projekten, geplanten Projekten, Angaben von Planungsbüros sowie neue, im Laufe des Projektes eingeholte, Herstellerangebote. Konkret werden die Kosten für das Leitungsnetz inkl. Grabung anhand des IKB-Vorhabens für eine Grundwasserversorgung in der Adamgasse in Innsbruck ermittelt (Kostenstand 2020). Weiters wird mit den vorliegenden Preisen für das Vorhaben Grundwassernutzung Anzengruberstraße sowie mit den aktuellen Preisen aus dem Katalog eines PE-Rohr-Hersteller im Q2/2021 kalkuliert. Die Aufschläge für Sonderpositionen, wie Brückenunterquerungen und Gleisunterquerungen, werden in Abstimmung mit anderen IKB-Geschäftsbereichen ermittelt (Stand Q2/2021). Zuletzt sind die Kosten der Hoch- und Niedertemperaturnetzvarianten durch ein externes Planungsbüro in Q1/2022 validiert worden. Alle erhobenen Preise werden auf Q4/2021 indexiert und somit vereinheitlicht.

5.2.2. Kosten der Wärmepumpen

Neben den Leitungskosten sind die Kosten der Wärmepumpen maßgeblich für eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung von Bedeutung. Die Kosten für die Errichtung der Wärmepumpenanlagen für alle drei Varianten (Hochtemperatur, Mitteltemperatur, Niedertemperatur) werden aus Herstelleranfragen in Q3/2021 abgeleitet. Tabelle 8 fasst die erhobenen spezifischen Investitionskosten der Wärmepumpen zusammen. Zur Ermittlung der Gesamtkosten der Wärmepumpen werden die spezifischen Kosten mit den derzeit am Standort installierten Leistungen multipliziert, da davon ausgegangen wird, dass die derzeitige thermische Leistung auch nach dem Netzanschluss zur Verfügung gestellt werden muss.

Tabelle 8: Spezifische Investitionskosten der verschiedenen Wärmepumpenlösungen
(Herstelleranfrage Q3/2021)

	Spez. Kosten Wärmepumpe* [€/kW]
Dezentrale Wärmepumpe NT 12°C / 40°C	283,3
Dezentrale Wärmepumpe HT 26°C / 65°C	457,5
Zentrale Wärmepumpe 5°C / 65°C	300,9
Luftwärmepumpe 2°C / 82°C	764,6

*inkl. Netzanschluss, Planung, etc...

In Tabelle 8 sind die Skaleneffekte bei der zentralen Wärmepumpe zu erkennen. Diese Wärmepumpe hat eine höhere thermische Leistung als die dezentralen Wärmepumpen. Die Skaleneffekte führen daher dazu, dass die spezifischen Investitionskosten deutlich niedriger sind als die Investitionskosten der kleineren Wärmepumpen.

Bei der Variante "Anergienetz" wird die Wärme auf das benötigte Temperaturniveau über 2 kaskadisch geschalteten Wärmepumpen erzeugt (siehe Abbildung 11). Basierend auf den installierten Leistungen für Niedertemperatur- und Hochtemperaturwärme werden bei der Variante "Anergienetz" die Investitionskosten der dezentralen Wärmepumpen anhand Tabelle 8 gerechnet.

Bei der Variante "Mitteltemperaturnetz" wird die Niedertemperaturraumwärme bereits durch das Netz zur Verfügung gestellt, weshalb bei dieser Variante nur die Wärme für Warmwasser mittels dezentraler Wärmepumpen, die von 26°C auf 65°C heben können, erzeugt.

Bei der Variante "Hochtemperaturnetz" fallen nur die Kosten für die zentrale Wärmepumpe am Tunnelportal an, die aus der thermischen Leistung der Tunnelabwässer und den spezifischen Investitionskosten ermittelt werden.

Beim Referenzszenario "Luftwärmepumpe" wird angenommen, dass die gleiche thermische Leistung, die auch im Szenario "Hochtemperaturnetz" angenommen wird, mittels im Netz befindlichen Luftwärmepumpen erzeugt wird.

5.2.3. Zusammenfassung der Investitionskosten

Abbildung 24 zeigt die erhobenen Investitionskosten der verschiedenen Netzvarianten sowie des Referenzszenarios "Luftwärmepumpe". Die Kosten werden gegliedert in:

- Kosten Leitungen
- Kosten Wärmepumpe dezentral
- Kosten Wärmepumpe zentral
- Kosten Luftwärmepumpe
- Kosten Wärmeentnahme Tunnelportal
- Kosten Fernwärme (FW)-Übergabestation

In orange sind die Investitionskosten für das Leitungsnetz dargestellt. Werden rein die Investitionskosten der Leitungen betrachtet, schneidet das Referenzszenario Luftwärmepumpe am günstigsten ab, da die Leitung zum Tunnelportal entfällt. Die Leitungskosten für das Anergienetz sowie für das Hochtemperaturnetz sind ähnlich hoch. Lediglich die Netzkosten für das Mitteltemperaturnetz liegen deutlich über den Kosten der anderen Varianten.

Werden die Kosten für die unterschiedlichen Wärmepumpenlösungen verglichen (dezentrale Wärmepumpen in den Objekten, zentrale Wärmepumpe am Tunnelportal, Luftwärmepumpen im Netz) sieht man, dass die Kosten der Wärmepumpen im Referenzszenario "Luftwärmepumpe" am höchsten sind. Am günstigsten sind die Kosten einer zentralen Wärmepumpe am Tunnelportal, da hier Skalierungseffekte aufgrund der Größe dieser Anlage genutzt werden können, während hingegen die kleineren dezentralen Wärmepumpen höhere spezifische Investitionskosten aufweisen (siehe Tabelle 6).

Die Kosten für die Wärmeentnahme beim Tunnelportal, in Abbildung 24 in grau dargestellt, variieren in den untersuchten Varianten. Die niedrigsten Kosten fallen bei der Variante Anergienetz an, da kein zusätzliches Bauwerk benötigt wird. Der Wärmeübertrager, der die Tunnelabwärme in das Anergienetz überträgt, kann in die bereits vorhandene Rinne im Tunnel eingebettet werden. Bei der Variante "Hochtemperaturnetz" hingegen müsste für die zentrale Wärmepumpe ein Bauwerk am Tunnelportal errichtet werden.

Im Vergleich zu den Gesamtkosten fallen die Kosten für die nötigen Übergabestationen in den Gebäuden gering aus. Die Kosten für Übergabestationen liegen bei den Varianten "Hochtemperaturnetz" und im Referenzszenario "Luftwärmepumpe" am höchsten. Beim Anergienetz hingegen fallen überhaupt keine Kosten für Übergabestationen an, da die Funktion von den dezentralen Wärmepumpen übernommen wird (direkter verdampferseitige Netzanschluss der Wärmepumpe).

In Summe zeigt sich, wie in Abbildung 24 zu erkennen, dass die Gesamtinvestitionskosten für Anergienetz- und die Hochtemperaturfernwärmenetzlösung nahezu gleich sind. Die Investitionskosten für das Mitteltemperaturnetz sowie das Referenzszenario liegen hingegen deutlich über den Kosten der beiden anderen Varianten.

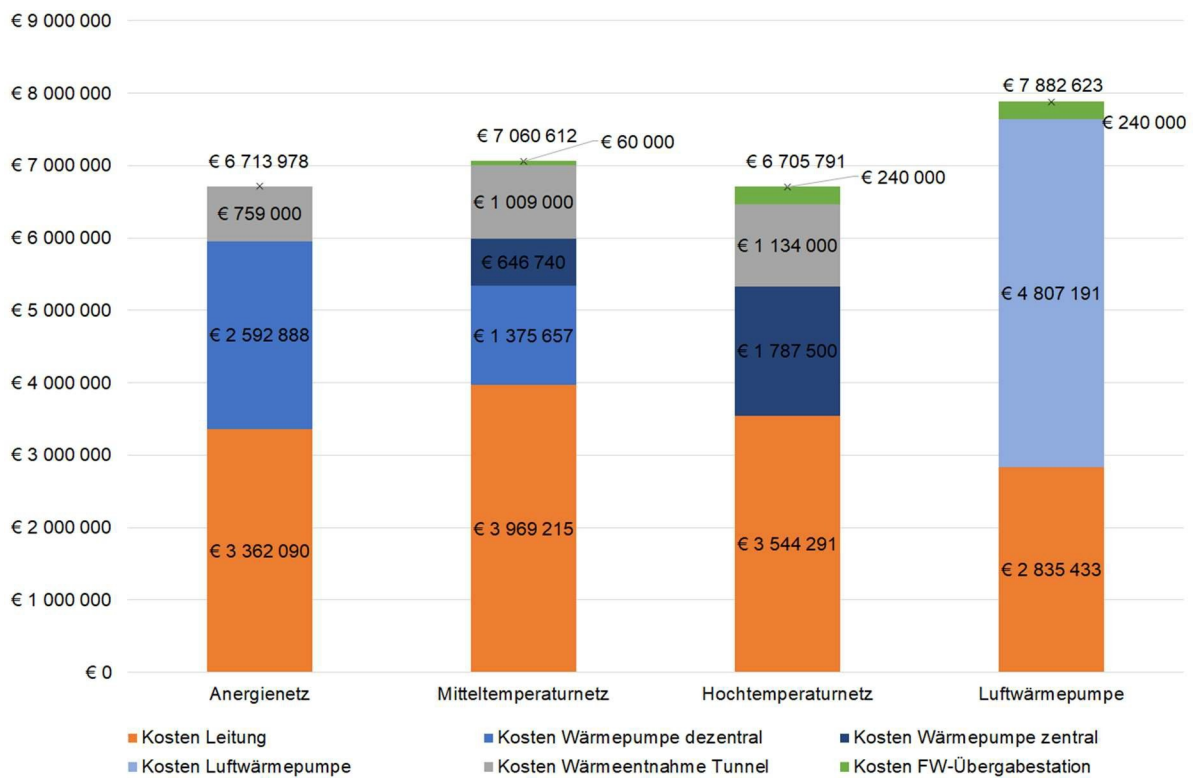


Abbildung 24: Vergleich der Investitionskosten der untersuchten Netzvarianten inkl. des Referenzszenarios "Luftwärmepumpe". Bei dieser Variante wird die Wärme durch mehrere, im Netz angeordnete Luftwärmepumpen erzeugt.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Geothermisches Potential außerhalb des Tunnels

Die Potentiale für Erdwärmesonden sind vor allem von den Systemparametern abhängig. Es ist wichtig zu betonen, dass die Systemparameter auf Annahmen basieren und die Ergebnisse daher nur für Anlagen mit der angegebenen Konfiguration gelten. Aufgrund angenommener Homogenität des Untergrunds variieren die Potentiale für Erdwärmesonden in dem Untersuchungsgebiet nicht stark. Die Ergebnisse der beiden Tiefenintervalle (0 – 100 m und 0 – 150 m) zeigen, dass die Sondenlänge keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung pro Meter Bohrlochlänge hat. Die flächenspezifische Jahresenergiemenge steigt hingegen direkt proportional zur Tiefe. Ein Vergleich der Ergebnisdatensätze für verschiedene Betriebsmodi bestätigt, dass mit einer ausgeglichenen Betriebsweise, vielfache Energiemengen erreicht werden können.

Bei der thermischen Grundwassernutzung sind die Aquifereigenschaften die sensiblen Parameter für die Bestimmung des Energieinhalts bzw. der Leistung für die thermische Grundwassernutzung. Da der Grundwasserkörper in dem Untersuchungsgebiet sehr mächtig ist und die nutzbare Mächtigkeit für die Berechnung mit 20 m gedeckelt wurde, ergibt sich einen Wert für Brunnenleistung (21,67 l/s) und Vollastleistung (444,3 kW) für das gesamte Untersuchungsgebiet. Basierend auf den ermittelten Energieressourcen können mit ausgeglichener Betriebsweise deutlich höhere Energiemengen gewonnen werden.

6.2. Geothermisches Potential der Tunnelwässer

6.2.1. Abflussmenge und Temperatur des Tunnelwassers

Mit Ausnahme von TS1 und TS3 basieren alle Teilströme, die den zukünftigen Abfluss bestimmen, auf beobachteten Werten. Während der Betriebsphase werden TS1 und TS3 wesentlich zum Gesamtabfluss des Tunnelwassers beitragen, sind aber mit Unsicherheiten behaftet. Für TS1 liegen zwar Vorhersagen für die Abflussmenge und die Temperaturen vor, aufgrund der hydrologischen Unsicherheiten in diesem Abschnitt werden die Vorhersagen jedoch in einer Bandbreite angegeben. Ein Grund für die angegebene Bandbreite ist, dass in dem Bereich, in dem TS1 entspringt, Gebirgsverbesserungsmaßnahmen zur Verringerung der hydraulischen Durchlässigkeit geplant sind und durchgeführt werden, da sie für einen sicheren Tunnelvortrieb unerlässlich sind. Die Gebirgsverbesserungsmaßnahmen in diesem Tunnelabschnitt werden hauptsächlich in Form von Injektionen durchgeführt, um den Tunnel abzudichten, den Wassereintritt auf ein Minimum zu reduzieren und die flachen ursprünglichen Wasserstände in diesem Bereich zu erhalten. Dazu wird ein Injektionsmörtel in das Gebirge injiziert, um die hydraulische Durchlässigkeit und damit die Wasserzuflüsse in den Tunnel zu reduzieren oder gar zu verhindern und die regionale Ausdehnung der Wasserspiegelabsenkung zu vermeiden. Die angegebene Bandbreite spiegelt somit die prognostizierte Wassermenge wider. Eine weitere Unsicherheit ist die durch den Ausbruch der Haupttunnel induzierte Erhöhung der Abflussmenge, die sich auf TS3 auswirkt. Beim gegenwärtigen Stand des Ausbruchs kann nicht angegeben werden, um welchen Faktor sich Sd3 erhöhen wird. TS3

ist nach TS1 der größte Wärmeenergielieferant, so dass seine Abflussmenge und Temperatur einen großen Einfluss auf die Gesamtabflussmenge am nördlichen Tunnelportal der Silsschlucht haben. Darüber hinaus wird es in der Betriebsphase zu einer Abkühlung des Tunnelwassers im Bereich der Silsschlucht (Bereich der geringen Überlagerung) kommen. Die Berechnung der maximalen Abkühlung während des Betriebes im Bereich der Silsschlucht respektive im überlagerungsarmen Bereich basiert auf der Erwartung, dass das Tunnelwasser während der Betriebsphase nicht mehr Energie abgeben kann als während der Bauphase. Unter der Annahme, dass alle Bedingungen gleich bleiben (Tunnellufttemperaturen, Fließgeschwindigkeit des Tunnelwassers usw.), wird die Differenz der theoretischen Tunnelwassertemperatur zur tatsächlichen zukünftigen Tunnelwassertemperatur jedoch aufgrund der größeren Wassermasse (ΔT) abnehmen. Während die Masse und damit das Volumen des Tunnelwassers während der Betriebsphase zunimmt, bleibt der Querschnitt der Sohlrinne gleich. Dies führt zu einer erhöhten Fließgeschwindigkeit. Folglich hat das Wasser weniger Zeit, sich an die Temperatur der Tunnelluft anzupassen. Dadurch verringert sich die Kühlwirkung, und die vorhergesagte Mindesttemperatur und die theoretische Temperatur nähern sich weiter an. Darüber hinaus wird sich die künftige Tunnellüftung auf die endgültige Abflusstemperatur auswirken, da die Temperatur im Tunnel durch die Lüftung beeinflusst wird. Das Ausmaß des Einflusses der Tunnelbelüftung kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschätzt werden.

6.2.2. Geothermische Leistung des Tunnelwassers

Zur Repräsentation von Bandbreiten, die durch Prognoseunsicherheiten von TS1 und TS3 entstehen, wurden zwei Szenarien ausgearbeitet. Grundsätzlich gilt, je höher der Wasserabfluss und die Wassertemperatur sind, desto höher ist die Wärmeleistung. Da nach Szenario 2 eine höhere Abflussrate in Kombination mit höheren Temperaturen als in Szenario 1 prognostiziert wird, stellt Szenario 1 den suboptimalen Fall und Szenario 2 den optimalen Fall dar. Ferner wird bei den Berechnungen des geothermischen Potenzials davon ausgegangen, dass das Tunnelwasser auf 10 °C abgekühlt wird. Je weiter das Wasser abgekühlt wird, desto größer wird der nutzbare Temperaturbereich. Wird das Wasser z.B. auf 5 °C abgekühlt, so stünden die zusätzlichen 5 °C für die geothermische Nutzung zur Verfügung. Dies würde die Leistung erheblich steigern und ist auch der Grund für die in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellten Bereiche. Das obere Ende der Spanne wird anhand der theoretischen Mischtemperaturen berechnet, das untere Ende anhand der Temperatur nach der Abkühlung. Die beiden Szenarien 1 und 2 zeigen, dass die geringste Wärmeleistung im Winter zur Verfügung steht. Durch die stärkere Abkühlung des Wassers im Winter nimmt die Fläche zu, bevor sie in den Sommermonaten wieder abnimmt. Die Diagramme zeigen auch, wie sich ein vermeintlich geringer Temperaturunterschied auf die thermische Leistung auswirkt. In Szenario 2 beträgt die thermische Leistung im Juli z. B. 6,37 MW bei 22,9 °C und 117,8 l/s. Im Januar beträgt die thermische Leistung 4,91 MW bei 20,4 °C und 113,12 l/s

Bei der Betrachtung der berechneten Energiemengen der Gebirgswassernutzung (bzw. der genannten Wassermengen sowie der Wassertemperaturen) zeigt sich, dass es noch einige Unsicherheiten gibt, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht näher eingegrenzt werden können. Diese Unsicherheiten werden jedoch mit dem Baufortschritt beseitigt werden. Trotz dieser Unsicherheiten zeigen die Ergebnisse ein erhebliches Potenzial des BBT-Tunnelwassers auf, das es unabdingbar macht, die Idee der geothermischen Nutzung des Tunnelwassers zu verfolgen. Sobald der Tunnel in Betrieb ist, wird die Abkühlung des Tunnelwassers im Bereich der Silsschlucht weiter

abnehmen und die Tunnelwassertemperaturen werden sich den theoretisch berechneten Temperaturen immer mehr annähern. Grund dafür ist zum einen die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit durch größere Wassermengen, wodurch sich die Zeit, die das Wasser zur Angleichung an die Tunnellufttemperatur benötigt, verringert. Zweitens wird die Wechselwirkung mit der Luft außerhalb des Tunnels verringert, was die Kühlung, insbesondere in den Wintermonaten, einschränken wird. Darüber hinaus sind die Lufttemperaturen mit Ausnahme des letzten Abschnitts mit geringer Überlagerung (Mittelgebirge) zeitweise höher als die theoretisch berechneten Temperaturen des Tunnelwassers, was in diesen Abschnitten zu einer Erwärmung des Tunnelwassers führen würde. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass bereits ein Grad Celsius Temperaturunterschied einen erheblichen Einfluss auf das geothermische Potenzial hat. Es sollte daher versucht werden, das Wasser zumindest im Bereich des geringen Deckgebirges so gut wie möglich zu isolieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Tunnelwasser gravitativ zum Tunnelportal in der Sillschlucht fließt, ohne zu pumpen und ohne zusätzliche Kosten. Die Kosten würden hauptsächlich außerhalb des Tunnels bzw. im Bereich des Tunnelportals anfallen. Hier müsste ein Wärmetauscher installiert werden, der dem Tunnelwasser die Wärme entzieht. Außerdem müsste eine Wärmeübergabestation gebaut werden, die die Wärme in das bestehende Fernwärmenetz einspeist. Es ist zu beachten, dass die aus dem Tunnel gewonnenen Temperaturen deutlich niedriger sind als die in einem herkömmlichen Fernwärmenetz herrschenden Temperaturen. Aus diesem Grund käme der Bau eines Niedertemperaturnetzes (Anergienetz) in Frage. Anergienetze haben den Vorteil, dass die Wärmeverluste aufgrund der niedrigen Netztemperaturen sehr gering sind und im Vergleich zu konventionellen Wärmenetzen geringere Kosten für den Leitungsbau anfallen (weniger teure Rohrleitungen, keine Isolierung) (Buffa et al., 2019).

Am BBT bildet die Anwendung des Systems der Teilströme und des detaillierten Monitorings die Grundlage für die Abschätzung des geothermischen Potenzials (Geisler et al., 2021), da die Vorhersage des Wasserzuflusses in einem Tunnel eine sehr komplizierte Aufgabe ist (Tentschert, 2012). Diese breite Datenbasis ermöglicht es, bereits mehrere Jahre vor Abschluss der Bauarbeiten erste Abschätzungen vorzunehmen. Die Anwendung des Systems der Teilströme ist daher auch für andere Tunnel eine Chance. Zudem ermöglichen die Daten eine frühzeitige Optimierung oder eine Anpassung der Überwachung an bestimmten Stellen. Diese Optimierungen können durch den nachträglichen Einbau von Wärmeabsorbern im Tunnel erreicht werden. Diese Absorber könnten in Bereichen mit hoher Überdeckung und damit hohen Gebirgs- und Tunnellufttemperaturen installiert werden. Ihr Einsatz könnte das Wasser zusätzlich erwärmen und die Temperatur am Tunnelportal erhöhen.

Um eine möglichst lange Lebensdauer des Wärmetauschers bei geringem Wartungsaufwand zu erreichen, werden weitere Labor- und in situ Experimente empfohlen. Wärmetauschermaterialproben bzw. ein Modell des Wärmetauschers sollte direkt in der Tunneldrainage angebracht und in regelmäßigen Abständen auf Menge und Beschaffenheit der Ausfällungen überprüft werden. In der Folge können Versuche zur Reinigbarkeit der Proben gemacht werden, um Informationen über den zu erwartenden Wartungsaufwand zu erhalten. Mit diesem Wissen kann eine fundierte Entscheidung in Bezug auf Art und Geometrie des Wärmetauschers getroffen und die Höhe der Instandhaltungskosten prognostiziert werden.

6.3. Verteilung zu Konsument:innen

6.3.1. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Erste Ergebnisse der Studie zeigen, dass mit einem thermischen Potenzial des Tunnels zwischen 2.7 MW und 4.5 MW, bei einem Temperaturniveau zwischen 18°C und 23°C, zu rechnen ist.

Niedrigenergiebauten bieten die grundlegende Voraussetzung für eine effiziente Wärmeversorgung durch Anergienetze (Wärmenetz mit Temperaturniveaus < 20°C). Die Nutzung der Tunnelwärme auf 18-23°C in einem Anergienetz ist für die Versorgung der Stadtentwicklungsgebiete „Pradl Süd“ und „Nord“ als technisch am vorteilhaftesten (höchste Jahresarbeitszahlen) und ressourcenschonend zu bewerten. Mit dem Anergienetz wird die CO₂ neutrale Bergwärme dem Stadtgebiet Sillhöfe am effizientesten und bedarfsgerecht mit minimalen Exergieverlusten zur Verfügung gestellt, und dezentral mittels Wärmepumpen auf das Nutztemperaturniveau der Niedrigenergiebauten gehoben. Eine Verteilung der Bergwärme mittels Anergienetzes über größere Distanzen - in andere Stadtteile Innsbrucks - ist aufgrund höherer Leitungsverluste demgegenüber als ineffizienter zu bewerten.

7 Ausblick und Empfehlungen

7.1. Geothermisches Potential außerhalb des Tunnels

Auf Grund der thermischen Regeneration des Grundwassers bei einem Betrieb mit ausgeglichener Betriebsweise kann in diesem Fall eine ungefähr drei- bis viermal höher Energiemenge erzielt werden als im Betrieb mit Norm-Betriebsstunden. Daher ist sowohl für Erdwärmesonden als auch für thermische Grundwassernutzung eine ausgeglichene Betriebsweise zu bevorzugen.

Die Qualität der Ergebnisse ist generell stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Mit einer höheren Datendichte, speziell genauere Informationen zum Grundwasserstauer, hydraulische Durchlässigkeit, sowie der Untergrundtemperatur könnte die Qualität der Ergebnisse weiter gesteigert werden. Mit den im Projekt zur Verfügung stehenden Daten konnten jedoch bereits aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Es sei abschließend noch darauf hingewiesen, dass alle Ergebnisse eine Erstabschätzung darstellen, die eine Detailplanung nicht ersetzen.

7.2. Geothermische Nutzung von Tunnelwässern

Um das Potenzial noch genauer zu bestimmen, muss das Monitoringkonzept weitergeführt werden. Nach Abschluss des Ausbruchs des letzten Tunnelabschnitts bis zur Landesgrenze (TS1) wird die Hauptprognoseunsicherheit beseitigt sein und die Bandbreite des Potenzials kann weiter eingegrenzt werden. Ab diesem Zeitpunkt empfiehlt es sich, mit numerischen Modellierungen zum Kühleffekt nach Abschluss der Bauarbeiten zu arbeiten. Nach Abschluss der Bauarbeiten wird das geothermische Potenzial irgendwo zwischen Szenario 1 und Szenario 2 liegen. In jedem Fall aber, zeigt diese Studie, dass der Brenner Basistunnel einen wesentlichen Beitrag zu einer klimaneutralen Zukunft leisten kann und erschlossen werden sollte.

7.3. Wärmeverteilung in Innsbruck

Grundsätzlich ist die Wärmeverteilung mittels Anergienetz in Stadtteilen mit niedrigen Temperaturanforderungen einem Fernwärmenetz vorzuziehen. Anergienetze bieten dabei folgende Vorteile:

- Das Wärmeverteilungssystem muss nicht den Temperaturbedarf des Kunden mit dem höchsten Temperaturbedarf decken.
- Es ergeben sich geringe Wärmeverluste im Leitungsnetz mit dem Erdreich.
- Alternative (Ab-)Wärmequellen können im Versorgungsgebiet eingebunden werden (z.B. Abwärme aus Kraftwerksprozessen, Kälteanlagen oder industriellen Betrieben).
- Kühlmöglichkeiten ergeben sich über eine Rücklaufnutzung.

Eine Einbindung der Niedertemperaturwärme aus dem Brenner Basistunnel direkt in ein Fernwärmenetz mit Vorlauftemperaturen über 65°C ist hingegen ineffizient und mit Exergieverlusten behaftet, weil der Höchsttemperaturbedarf im Versorgungsgebiet praktisch die

Wärmeverteilungstemperatur bestimmt.

Aus derzeitiger Sicht ist daher die Nutzung der Tunnelwärme mittels Anergienetz die technische empfohlene Variante, da die Tunnelwärme mit den vorherrschenden Temperaturniveaus passend für die Grundwärmeversorgung des Stadtentwicklungsgebiets im Nahgebiet des Tunnels ist.

Eine erste Abschätzung auf Basis der Investitionskosten zeigt ebenfalls, dass ein Anergienetz die wirtschaftlichste Variante ist, jedoch unter der Bedingung, dass die Investitionsrentabilität durch entsprechende Erlöse (aus Anschlusskostenbeiträgen, Wärmeverkauf und Grund- bzw. Leistungspreis) erzielt werden kann.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: System der Teilströme aus (Geisler et al., 2022).....	18
Abbildung 2: Prozess zur Erstellung der standortabhängigen Eingangskarten (Ergebnisdatensatz) zur Ressourcen-Berechnung für Erdwärmesonden. TRT = Thermal Response Test. LST = Oberflächentemperatur aus Satelliten-Daten. WLF = Wärmeleitfähigkeit (GeoSphere, 2023)	25
Abbildung 3: Prozesse zur Erstellung der standortabhängigen Eingangskarten (Ergebnisdatensatz) zur Ressourcen-Berechnung für die thermische Grundwassernutzung. GW – Grundwasser (GeoSphere, 2022).	26
Abbildung 4: Verortung des Versorgungsgebietes im südlichen Innsbruck, das für eine Nutzung der Tunnelabwärme in Frage kommt ("Versorgungsgebiet") (IKB, 2022)	28
Abbildung 5: Detailaufnahme des Versorgungsgebietes (IKB, 2022)	30
Abbildung 6: Im Versorgungsgebiet werden verschiedenste Objekte und Quartiere ausgewählt, die für eine Detailbetrachtung einer potenziellen Wärmeeinbindung in Frage kommen (IKB, 2022). ..	32
Abbildung 7: Übersicht des monatlichen Wärmebedarfs gegliedert in die untersuchten Gebäude (IKB, 2022).	33
Abbildung 8: Monatliche Verteilung des Wärmebedarfs im Versorgungsgebiet mit Unterscheidung in Niedertemperatur-Wärme (bis 40°C) und Hochtemperatur-Wärme (bis 70°C) (IKB, 2022).	34
Abbildung 9: Jährlicher Wärmebedarf der einzelnen Objekte im Versorgungsgebiet, gegliedert in Niedertemperatur-Wärme (bis 40°C) und Hochtemperatur-Wärme (bis 70°C) (IKB, 2022).	35
Abbildung 10: Schematische Darstellung der identifizierten Netzvarianten (SEEP, 2022).	37
Abbildung 11: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung für die Variante „Anergienetz“. Die Wärme wird mittels in Kaskade geschalteten Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau erzeugt. Die Wärmepumpe für Niedertemperatur nutzt das Anergienetz als Wärmequelle und erzeugt die Wärme für die Niedertemperaturwärmeschiene im Gebäude. Eine zweite Wärmepumpe nutzt die Niedertemperaturwärmeschiene als Wärmequelle und erzeugt Hochtemperaturwärme für Brauchwasser bzw. für sonstige Abnehmer, die Wärme auf hohem Temperaturniveau benötigen (SEEP, 2022).	38
Abbildung 12: Kühlmöglichkeiten durch das Anergienetz. Mit dem Anergienetz kann passive Kühlung mittels Vorlauf oder Rücklauf erfolgen, je nachdem wieviel Wärme und bei welchem Temperaturniveau die Wärme aus dem Objekt abgeführt werden muss. Die Abwärme wird im Anergienetz wieder als Wärmequelle für andere Objekte genutzt. Zusätzlich kann das Anergienetz als Rückkühlmöglichkeit für aktive Kühlung mittels Kältemaschinen genutzt werden (SEEP, 2022).	39
Abbildung 13: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung Variante „Mitteltemperaturnetz“. Die Wärme für die Niedertemperaturraumwärme wird direkt aus dem Mitteltemperaturnetz mittels Wärmeübertrager entnommen, während die Wärme für die Brauchwasserbereitung bzw. Hochtemperaturraumwärme wird mittels dezentraler Wärmepumpe erzeugt (SEEP, 2022).	40
Abbildung 14: Konzeptdarstellung der Wärmebereitung Variante „Hochtemperaturnetz“. Die Wärme wird direkt aus dem Hochtemperaturnetz mittels Wärmeübertrager entnommen (SEEP, 2022).	42

Abbildung 15: Derzeit geplante Trassenführung (IKB, 2022).	43
Abbildung 16: Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen nach Norm–Betriebsstunden für das Tiefenintervall a) 0 – 100 m, b) 0 – 150 m. Entzugsleistung bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise für das Tiefenintervall c) 0 – 100 m, d) 0 – 150 m. Rote Umrandung: Zielgebäude, NormBS – Norm–Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).	47
Abbildung 17: Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit Norm–Betriebsstunden für das Tiefenintervall a) 0 – 100 m, b) 0 – 150 m. Jahresenergiemenge bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise für das Tiefenintervall c) 0 – 100 m, d) 0 – 150 m. Rote Umrandung: Untersuchungsgebiet, gelbe Umrandung: Zielgebäude, NormBS – Norm–Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).	47
Abbildung 18: Spezifischer Energieinhalt bei Heizen und Kühlen mit a) Norm–Betriebsstunden, b) ausgeglichener Betriebsweise. Rote Umrandung: Untersuchungsgebiet, gelbe Umrandung: Zielgebäude. Norm–BS – Norm–Betriebsstunden (GeoSphere, 2022).	48
Abbildung 19: Abflussmengen und Temperaturen während des Bauzustandes aus (Geisler et al., 2022).	49
Abbildung 20: Prognose für die Betriebsphase von Szenario 1 aus (Geisler et al., 2022).	50
Abbildung 21: Prognose für die Betriebsphase von Szenario 2 aus (Geisler et al., 2022).	51
Abbildung 22: Berechnung der geothermischen Leistung für Szenario 1 aus (Geisler et al., 2022).	52
Abbildung 23: Berechnung der geothermischen Leistung für Szenario 2 aus (Geisler et al., 2022).	52
Abbildung 24: Vergleich der Investitionskosten der untersuchten Netzvarianten inkl. des Referenzszenarios “Luftwärmepumpe”. Bei dieser Variante wird die Wärme durch mehrere, im Netz angeordnete Luftwärmepumpen erzeugt.	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der verschiedenen zum Gesamtabfluss in der Silsschlucht beitragenden Teilströme auf der österreichischen Seite des Brenner Basistunnels.....	17
Tabelle 2: Mittlere gemessene Abflussmengen und deren Temperaturen (Geisler et al., 2022)	20
Tabelle 3: Zusammenfassung der angeschlossenen Heizleistungen der einzelnen Objekte im Versorgungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Hochtemperatur- und Niedertemperaturwärme (IKB, 2022).	36
Tabelle 4: Vor- und Nachteile Anergienetz.....	39
Tabelle 5: Vor- und Nachteile Mitteltemperaturnetz	41
Tabelle 6: Vor- und Nachteile Hochtemperaturnetz.....	42
Tabelle 7: Zusammenfassung der technischen Kriterien der betrachteten Netzvarianten.....	44
Tabelle 8: Spezifische Investitionskosten der verschiedenen Wärmepumpenlösungen (Herstellieranfrage Q3/2021)	55
Tabelle 9: Konstante Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen von Erdwärmesonden (Steiner et al., 2021).	69
Tabelle 10: Konstante Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen der thermischen Grundwassernutzung (Steiner et al., 2021).....	71
Tabelle 11: Limitierte Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen für die thermische Grundwassernutzung (Steiner et al., 2021).	71

Literaturverzeichnis

- Adam, D., & Markiewicz, R. (2010). Nutzung der Geothermie mittels Erdwärmeabsorber und Grundwasserbrunnen. *öwaw*. (5-6), 77–85, from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00506-010-0183-4.pdf>.
- Adam, D., Markiewicz, R., & Oberhauser, A. (2005). Nachhaltige Nutzung von Erdwärme mittels innovativer Systeme im Ingenieurtiefbau und Tunnelbau. *Bautechnik und Naturgefahren*, 113– 117, from https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/departement/kongress_mai07/beitraege/Nachhaltige_Nutzung_von_Erdwrme_mittels_innovativer_Systeme_im_Ingenieurtiefbau_und_Tunnelbau.pdf.
- Bergmeister, K., & Reinhold, C. (2017). Learning and optimization from the exploratory tunnel - Brenner Base Tunnel. *Geomechanik und Tunnelbau (Geomechanics and Tunnelling)*, 10(5), 467– 476, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.201700039>.
- Brandner, R., Reiter, F., & Töchterle, A. (2008). Überblick zu den Ergebnissen der geologischen Vorerkundung für den Brenner-Basistunnel. *Geo. Alp*, 5, 165–174.
- Buffa, S., Cozzini, M., D’Antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 104, 504– 522, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308608?via%3Dihub>.

- Burger, U., Geisler, T., Lehner, F., Cordes, T., & Marcher, T. (2022). Teilströme als geothermisches Potential bei tiefliegenden Tunneln. *Geomechanik und Tunnelbau (Geomechanics and Tunnelling)*, 15(1), 92–103.
- Burger, U., Millen, B., & Kirschner, H. (2003). Hydrogeologische Modellentwicklungen im Brenner-Gebiet Blatt 148 Brenner.
- European Commission (Ed.). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal*. Brüssel.
- European Parliament (1996). Decision No 1692/96/EC of the European Parliament and of the Council of 23 July 1996 on Community Guidelines for the Development of the Trans-European Transport Network. 31996D1692. 1–104.
- Geisler, T., Wolf, M., Burger, U., Voit, K., Götzl, G., Lauermann, M., et al. (2021). Geothermal Potential of infrastructure projects using the example of the Brenner base tunnel and the utilization of low- temperature heat in urban regions. *Proceedings of the 13th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection*. (1), 457–463.
- Geisler, T., Voit, K., Burger, U., Cordes, T., Lehner, F., Götzl, G., et al. (2022). Geothermal Potential of the Brenner Base Tunnel—Initial Evaluations. *Processes*, 10(5), 972.
- Gieré und Stille (2004). *Energy, Waste and the Environment: a Geochemical Perspective* (Vol. 236). London: The Geological Society.
- Kai Zeppenfeld (2010). Calcite precipitation from aqueous solutions with different calcium and hydrogen carbonate concentrations. *Journal of Water Supply Research and Technology-aqua*, 59, 482–491.
- Markiewicz, R. (2004). *Numerische und Experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von Geothermischer Energie Mittels Erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau*. Ph.D. Dissertation, Technische Universität Wien, Wien.
- Moormann, C., Buhmann, P., Friedemann, W., Homuth, S., & Pralle, N. (2016). Tunnel geothermics - International experience with renewable energy concepts in tunnelling / Tunnelgeothermie - Internationale Erfahrungen zu regenerativen Energiekonzepten im Tunnelbau. *Geomechanik und Tunnelbau (Geomechanics and Tunnelling)*, 9(5), 467–480, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.201600048>.
- Oberhauser, A., Adam, D., Hosp, M., & Kopf, F. (2006). Der Energieanker–Synergien bei der Nutzung eines statisch konstruktiven Bauteils. *Oesterreichische Ing.-Z.*, 151, 97–102.
- Pralle, N., Franzius, J. N., Acosta, F., & Gottschalk, D. (2009). Using tunnelling concrete segments as geothermal energy collectors. *Innovative Concrete Technology in Practice, 5th Central European Congress on Concrete Engineering*, 137–141.
- Pralle, N., Friedemann, W., Mayer, P.-M., Grübl, F., Ostermeier, B., & Schneider, M. (2007). Wärme lieferndes Fertigteil, Energietübbing. Retrieved March 12, 2022, from <https://patentimages.storage.googleapis.com/8d/ea/70/5f9ba66b399d73/EP1905947A1>.
- Richmann, G. W. (1750). De quantitate caloris, quae post miscelam flvidorum, certo gradv

- calidorum, oriri debet, cogitationes, avctore. *Typis Acad. Sci*, 1(152-167).
- Rybach, L. (1995a). Thermal waters in deep Alpine tunnels. *Geothermics*, 24, 631–637.
- Rybach, L. (2008). Tunnelwärmenutzung: Grundlagen und Beispiele aus der Schweiz. *Der Eisenbahningenieur*, 59(1), from https://www.researchgate.net/profile/Ladislaus-Rybach/publication/296768807_Utilising_the_heat_from_tunnels_Examples_from_Switzerland/links/579fa02d08aec29aed214655/Utilising-the-heat-from-tunnels-Examples-from-Switzerland.pdf.
- Rybach, L. (2010). Geothermal use of warm tunnel waters-Principles and examples from Switzerland. *Trans. Geotherm. Resour. Counc*, 34(871–874).
- Rybach, L. (1995b). Thermal waters in deep Alpine tunnels. *Geothermics*, 24(5-6), 631–637.
- Steiner, C., Turewicz, V., Götzl, G., Fuchsluger, M., Nyéki, E., Brüstle, A., & Hoyer, S. (2021). Endbericht des Projekts GEL-SEP Wien, „Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Wien": Im Auftrag der Stadt Wien - MA20 – Energieplanung, Für den „Wärmeatlas Wien - Geothermiefpotential“ im Rahmen des Projekts GEL-SEP „Spatial Energy Planning for Heat Transition“.
- Stemmler, R., Menberg, K., Rybach, L., & Blum, P. (2022). Tunnelgeothermie – Ein Überblick. *Geomechanik und Tunnelbau (Geomechanics and Tunnelling)*, 15, 104–111, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.202100084>.
- Tentschert, E. (2012). Water Prediction for Tunnels—A Game of Chance? *Beitr. Zu Hydrogeologie*, 52, 161–168.
- Tinti, F., Boldini, D., Ferrari, M., Lanconelli, M., Kasmaee, S., Bruno, R., et al. (2017). Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel–BBT. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 70, 182–203, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088677981630904X?via%3Dihub>.
- Voit, K., & Kuschel, E. (2020). Rock Material Recycling in Tunnel Engineering. *Appl. Sci*, 10(8), from <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2722>.
- Wolthers, M., Nehrke, G., Gustafsson, J. P., & van Cappellen, P. (2012). Calcite growth kinetics: Modeling the effect of solution stoichiometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77, 121–134.

9 Anhang

Konstante Parameter und Formel für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen.

9.1. Erdwärmesonden

Tabelle 9: Konstante Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen von Erdwärmesonden (Steiner et al., 2021).

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Minimal zulässige mittlere Sondenfluidtemperatur	- 1.5	°C	Empfehlung ÖWAV, RB 207
Maximal zulässige mittlere Sondenfluidtemperatur	+ 25	°C	maximaler Wert Freecooling
Betriebsjahre	20	Jahre	
Bohrlochradius	0.075	m	Erfahrungswert
Bohrlochwiderstand	0.071	m.K/W	Wert für ordentlich angebundene Duplexsonde mit guter Hinterfüllung
mittlere Wärmekapazität des Erdreichs	2.2	MJ/m ³ /K	Durchschnittswert, Bandbreite gering
Bohrtiefe	100 und 150	m	
Sondenabstand, nicht bilanziert	10	m	
Sondenabstand, bilanziert	5	m	

9.2. Thermische Grundwassernutzung

Formel 1: Berechnung der Brunnenleistung

$$Q_{PEAK} = \frac{\pi \cdot kf \cdot s \cdot (2 \cdot H - s)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$P_{PEAK} = Q_{PEAK} \cdot c_{vw} \cdot \Delta T$$

$$s = \frac{R}{C_{sichardt} \cdot \sqrt{kf}}$$

Q ... Grundwasserförderleistung aus einer Brunnendublette [m³/s]
s...Wasserspiegeländerung in den Brunnen [m]

Kf ...	hydraulische Durchlässigkeit [m/s]
R ...	Reichweite der Absenkung bzw. Aufspiegelung [m]
H ...	Mächtigkeit des gesättigten Grundwasserleiters [m]
r ...	Brunnenradius, Referenzradius = 1 [m]
C _{sichardt} ...	Konstante nach empirischen Versuchen nach Sichardt = 3000 [-]
C _{vw} ...	Spezifische Wärmekapazität von Wasser = 4.1 [MJ/m³/K]

Formel 2: Spezifischer Energieinhalt bei Heizen und Kühlen mit ausgeglichener Betriebsweise

$$E_{BAL} \left[\frac{kWh}{yr \cdot m^2} \right] = E_{storage} = \frac{C_{VA} \cdot H \cdot \Delta T_{BAL}}{3.6} \cdot rf$$

Formel 3: Spezifischer Energieinhalt bei Heizen

$$E_{HEAT} \left[\frac{kWh}{yr \cdot m^2} \right] = \left(\frac{E_{storage}}{LT} + E_{surface} + E_{underground} \right) \cdot \Delta T_{HEAT} \cdot rf$$

Formel 4: Spezifischer Energieinhalt bei Kühlen

$$E_{COOL} \left[\frac{kWh}{yr \cdot m^2} \right] = \left(\frac{E_{storage}}{LT} + E_{surface} + E_{underground} \right) \cdot \Delta T_{COOL} \cdot rf$$

Formel 5: Spezifischer Energieinhalt bei Heizen und Kühlen mit Norm-Betriebsstunden

$$E_{BI} = \begin{cases} E_{HEAT} + \frac{(E_{BAL} - E_{HEAT})}{HzK} & \text{wenn } HzK \geq 1 \\ E_{COOL} + (E_{BAL} - E_{COOL}) \cdot HzK & \text{wenn } HzK < 1 \end{cases}$$

Tabelle 10: Konstante Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen der thermischen Grundwassernutzung (Steiner et al., 2021).

Symbol	Wert	Einheit	Beschreibung
LT	20	Jahre	Laufzeit der Anlage
max. ΔT	5	K	maximale Temperaturdifferenz zw. Entnahme und Rückgabebrunnen
r_f	0.75	-	geometrischer Dublettenfaktor
T_{LOWBOUND}	5	°C	minimale Einleitetemperatur
$T_{\text{HIGHBOUND}}$	18	°C	maximale Einleitetemperatur
C_{vA}	2.4	MJ/m ³ /K	spezifische Wärmekapazität des Grundwasserleiters
λ_{OB}	1.2	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Zone, zur Abschätzung des Wärmenachflusses von der Oberfläche
λ_{Bott}	2	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit des Stauers, zur Abschätzung des Wärmenachflusses von unten
C_{vB}	2	MJ/m ³ /K	Wärmekapazität des Stauers, zur Abschätzung des Wärmenachflusses von unten
R	25	m	hydraulische Reichweite der Brunnen für Funktion 1 und 3, bei Funktion 2 ist dieser Abhängig von der Grundstücksgröße
r_0	1.0	m	theoretischer Brunnenradius (Parameter kann als Kalibrierfaktor zwischen 0.2 und 2 verwendet werden)
C_{Sichardt}	3000	-	Sichardtkonstante zur Abschätzung der Brunnenreichweite (Parameter kann als Kalibrierfaktor zw. 2000 und 4000 verwendet werden)

Tabelle 11: Limitierte Parameter für die Berechnung der Leistungs- und Energieressourcen für die thermische Grundwassernutzung (Steiner et al., 2021).

Beschränkter Parameter	Limit	Beschreibung
Max. Mächtigkeit	20 m	maximaler Rechenwert für die Grundwassermächtigkeit
Min. Flurabstand	3 m	minimaler Flurabstand für den Wärmenachfluss von oben
Max. Absenkung	5 m	maximal zulässige Veränderung des Grundwasserspiegels, absolut
Max. Absenkung	33 %	maximal zulässige Veränderung des Grundwasserspiegels, in Prozent

9.3. Data Management Plan (DMP)

In diesem Projekt wurde mit Daten gearbeitet, welche dem Datenschutz unterliegen und nicht zur Verfügung gestellt werden können.

