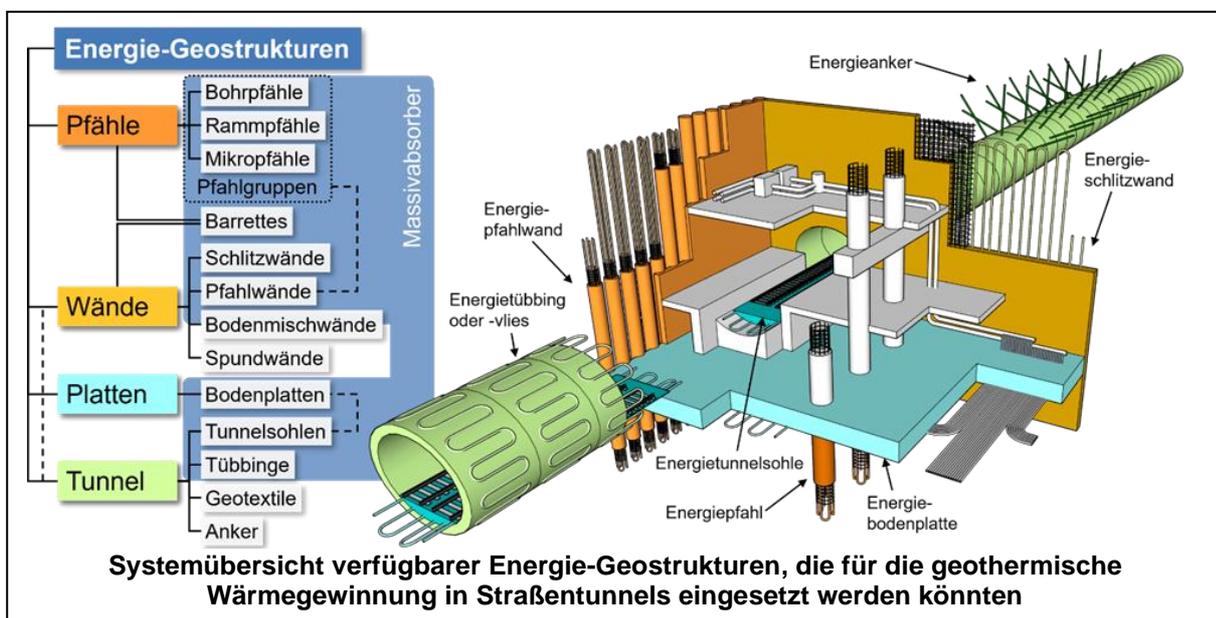


Nachhaltige Energiegewinnung in der Tunnelinfrastruktur Heat Tunnel Power

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2023

VIF 2023

Juni 2025





 Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Austro Tower
Schnirchgasse 17
1030 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4
1210 Wien



Technische Universität Wien
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und
Felsmechanik
Karlsplatz 13/220
1040 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 11090 Wien



Nachhaltige Energiegewinnung in der Tunnelinfrastruktur Heat Tunnel Power

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
VIF 2023

Autorinnen und Autoren:

DI Dr. Edith HASLINGER

DI Aleksandar KOSTADINOVIC

Dr. Christian GASSER

DI Sawsan HENEIN

Julia HEKERLE, BSc

Ahmed-Mohamed SERAGELDIN, PhD

Robin FRIEDRICH, MSc

Anna NOVONTY

Dr. Yannick WIMMER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EXECUTIVE SUMMARY	6
2.	INVENTUR UND TUNNELKATEGORISIERUNG	9
2.1	Methodik.....	9
2.2	Ergebnisse	10
2.2.1	Tunnel St. Andrä.....	10
2.2.2	Tunnel Mötz-Kirchenriese	11
2.2.3	Tunnel Mils	12
2.2.4	Tunnel Kaisermühlen (A22)	13
2.2.5	Tunnel Hirschstetten (A23 Südosttangente).....	14
2.2.6	Tunnel Stadlau und Stadlau Rampe 54	15
2.2.7	Tunnel Flachau.....	16
2.2.8	Tunnel Freinberg und AST Donau Nord; A26 Linzer Autobahn.....	17
2.2.9	Tunnel Bindermichl (A7 Mühlkreis Autobahn)	18
2.2.10	Tunnel Plabutsch.....	19
2.2.11	Tunnel Arlberg.....	20
2.2.12	Tunnel Wöll, Rothenthurm, St. Peter; S 36 Murtal Schnellstrasse.....	21
2.2.13	Semmeringtunnel.....	22
2.2.14	Tunnel Königsdorf (S7 Fürstenfelder Schnellstrasse)	23
2.2.15	Tunnel Rudersdorf.....	24
2.3	Wichtigste Erkenntnisse	25
3.	GEOTHERMISCHE TECHNOLOGIEN	26
3.1	Methodik.....	27
3.2	Ergebnisse	34
3.3	Wichtigste Erkenntnisse	37
4.	WÄRMEBEDARFSANALYSE	40
4.1	Methodik.....	40
4.2	Ergebnisse	42
4.2.1	Kaisermühlentunnel.....	45
4.2.2	Plabutschunnel.....	45
4.2.3	Tunnel Feinberg	47
4.3	Errechnete Wärmeprofile.....	47
4.4	Wichtigste Erkenntnisse	48

5.	ELEKTRIZITÄTS- UND FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL.....	50
5.1	Methodik.....	50
5.1.1	Bestimmung der nächstgelegenen Mittelspannungs-Umspannwerke	50
5.1.2	Abschätzung des Potenzials zur Installation von Wärmepumpen	52
5.2	Ergebnisse	52
5.2.1	Einsatz von PV und Speicherbatterie jenseits von Wärmeanwendungen.....	52
5.2.2	Elektrische Analyse der Wärmeanwendung.....	57
5.2.3	Wärmepumpe als Flexibilität am Strommarkt.....	60
5.3	Wichtigste Erkenntnisse	61
6.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	63
7.	TABELLENVERZEICHNIS	65
8.	LITERATUR	65
9.	ANHÄNGE	68

1. EXECUTIVE SUMMARY

Die Wärmegewinnung aus Bestands-Straßentunneln stellt weltweit ein Novum dar. Trotz der technischen Herausforderungen, die die Umrüstung von Bestandstunneln für die geothermische Energiegewinnung darstellt, gibt es für jede Tunnelbauweise die richtigen Technologien bzw. die richtige Kombination an Technologien für die Wärmegewinnung.

Auch wenn derzeit nur wenige Tunnelneubauten geplant sind und umfassende Sanierungen bestehender Tunnel ca. alle 10 bis 20 Jahre anstehen, gibt es in Österreich einige Projekte, bei denen entweder ein Neubau oder eine Sanierung bereits vorgesehen oder bereits in Umsetzung ist. Gerade solche Tunnel – ebenso wie künftige Neubau- oder Sanierungsvorhaben – eignen sich in besonderer Weise für die Integration einer Tunnelthermie-Anlage. Bei allen Technologien ist auf die einzuhaltenden Mindest-Tunnelquerschnitte zu achten und die jeweils passende geothermische Gewinnungstechnologie zu wählen. Am vielversprechendsten für die Wärmegewinnung sind in jedem Fall die Nutzung von Infrastruktur abseits der Haupttunnelröhren wie Querschläge, Fluchttunnel oder Ähnliches sowie bestehenden wasserführenden Leitungen wie Drainage- und Löschwasserleitungen. Wenn neue Querschläge oder Fluchttunnel bei bestehenden Tunneln errichtet werden, sollte jedenfalls gleich eine geothermische Wärmegewinnungsmethode oder eine Kombination aus mehreren Technologien bei der Planung in Betracht gezogen werden.

Das Projekt *HeatTunnelPower* hat gezeigt, dass Tunnelthermie ein realistischer, nachhaltiger und skalierbarer Ansatz zur Nutzung bestehender Infrastrukturen für die Energiewende ist. Die entwickelten Bewertungswerkzeuge und Methodiken bieten eine fundierte Grundlage für die Integration in zukünftige Infrastrukturprojekte. Mit Hilfe der im Projekt erarbeiteten Bewertungsmatrix können für potenzielle Umsetzungsprojekte die Straßentunnel anhand der wichtigsten Kategorien die jeweilige Eignung und die geeigneten Technologien erhoben werden und mit einem Schulnotensystem bewertet werden. Zur Unterstützung dient ein Flussdiagramm, in dem die wichtigsten zu erhebenden Daten zusammengefasst sind.

1.1. Inhalt

Im Projekt Heat Tunnel Power wurde untersucht, inwiefern Tunnelbauwerke der ASFINAG im österreichischen Straßennetz geothermisch genutzt werden können, um einen Beitrag zur nachhaltigen Wärmeversorgung zu leisten. Ziel war die Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsansatzes zur thermischen Nutzung von Tunneln in Kombination mit der Analyse des lokalen Wärmebedarfs sowie der elektrischen Infrastruktur und deren Flexibilisierungspotenzialen. Im Folgenden sind die methodischen Ansätze und zentralen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst:

1.2. Inventur und Tunnelkategorisierung

Methodik:

Systematische Inventur von 178 ASFINAG-Tunneln. Auswahl geeigneter Tunnel anhand folgender Kriterien:

- Nähe zu Wärmeabnehmern
- Tunnelbauweise (offen/geschlossen)
- Neubauten oder anstehende Sanierungen

Ergebnisse:

15 Tunnel wurden für vertiefte Analysen identifiziert. Besonders relevant sind Standorte, bei denen eine thermische Nutzung bereits in der Planungs- oder Sanierungsphase mitgedacht werden kann, um eine effiziente und kostengünstige Umsetzung zu ermöglichen.

1.3. Geothermische Technologien

Methodik:

Entwicklung einer vereinfachten Berechnungsmethodik zur Abschätzung der entziehbaren Wärmeleistung auf Basis von:

- Tunnelgeometrie und -bauweise
- Geologischen und hydrogeologischen Parametern (Wärmeleitfähigkeit, Bodentemperatur, Grundwasserverhältnisse)
- Auswahl geeigneter Energie-Geostrukturen (z. B. Energiepfähle, Geotextilien, Energiesohlen)

Ergebnisse:

Ein übertragbares und anwenderfreundliches Abschätzungsmodell wurde erstellt. Es ermöglicht eine grobe Bewertung des thermischen Potenzials einzelner Tunnel und dient als technische Entscheidungsgrundlage für weiterführende Planungen.

1.4. Wärmebedarfsanalyse

Methodik:

Analyse des Wärmebedarfs im Umfeld von 17 ausgewählten Tunnelstandorten mittels City Energy Analyst (CEA). Bewertung von:

- Raumwärme- und Strombedarf
- Anzahl und Typologie der Gebäude im Umkreis von ca. 1 km

Ergebnisse:

Die Analyse zeigt ein hohes Potenzial zur Wärmenutzung in vielen Tunnelnähen. Der Plabutschunnel etwa könnte rechnerisch über 5.000 Haushalte mit Raumwärme versorgen. Die Daten bestätigen, dass Tunnelthermie in mehreren Fällen einen substantziellen Beitrag zur dezentralen Wärmeversorgung leisten kann.

1.5. Elektrizitäts- und Flexibilitätspotential

Methodik:

Simulation mit dem TESCA-Framework zur Bestimmung:

- des Strombedarfs für Wärmepumpen
- der Anschlussmöglichkeiten an Mittelspannungsnetze
- des Potenzials für Photovoltaik (PV) an Tunnelportalen
- von Batteriespeichern (BESS) zur Lastverschiebung
- der Flexibilitätspotenziale für die Teilnahme am Strommarkt

Ergebnisse:

Der Strombedarf der Wärmepumpen übersteigt in allen Fällen deutlich den typischen Tunnel-Stromverbrauch. PV-Anlagen können zur Eigenbedarfsdeckung beitragen, sind jedoch flächenlimitiert. Batterien sind in ausgewählten Fällen technisch sinnvoll. Die Wärmepumpen bieten signifikantes Flexibilisierungspotenzial, sofern ein Nahwärmenetz Lastschwankungen puffern kann.

2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden jene 15 Tunnel vorgestellt, für die in den nachstehenden Abschnitten eine detaillierte Analyse hinsichtlich einer potenziellen Tunnelthermie-Installation durchgeführt wurde. Zu jedem Tunnel wird eine Karte bereitgestellt, die sowohl den Verlauf des Tunnels als auch die Bebauung im näheren Umfeld zeigt. Dadurch entsteht ein schneller und übersichtlicher Eindruck möglicher Wärmenutzer in der Umgebung.

Zusätzlich erfolgt eine textliche Beschreibung potenzieller Abnehmer innerhalb eines Umkreises von etwa 300 Metern um den jeweiligen Tunnel. Bei längeren Tunnelanlagen wurde der Betrachtungsradius auf rund 1000 Meter erweitert, um ein vollständigeres Bild des möglichen Nutzungspotenzials zu erhalten.

2.2.1 Tunnel St. Andrä

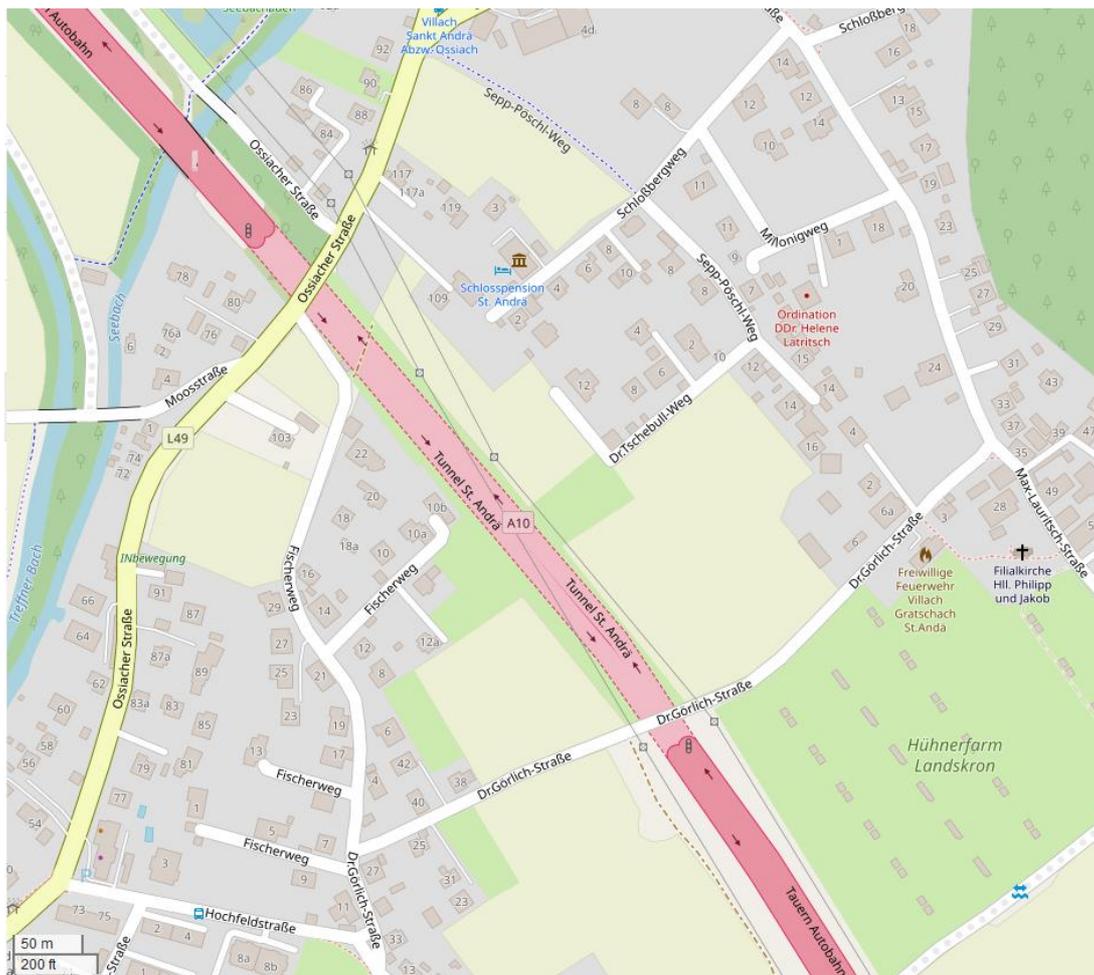


Abbildung 2: Tunnel St. Andrä

Bundesland: Kärnten

Länge: 470 m

Tunnel in Deckelbauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

einige Einfamilienhäuser, Feuerwehr, Kirche

2.2.2 Tunnel Mötz-Kirchenriese



Abbildung 3: Tunnel Mötz-Kirchenriese

Bundesland: Tirol

Länge: 174 m

Tunnel in offener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Einige Wohnhäuser, sowie ein Sportgeschäft, Gasthäuser

2.2.3 Tunnel Mils

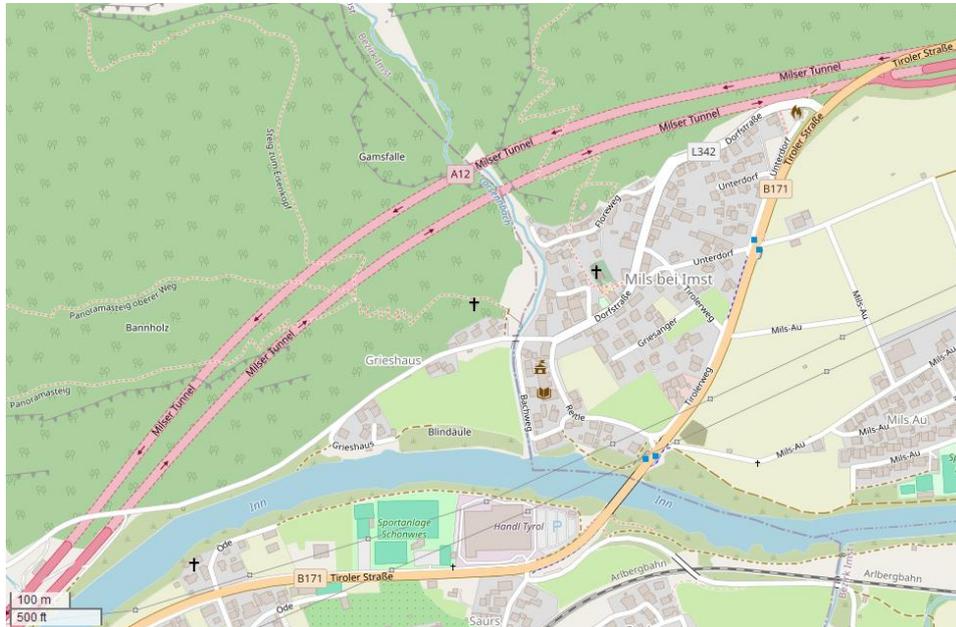


Abbildung 4: Tunnel Mils

Bundesland: Tirol

Länge: 1590 bzw. 1785 m

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

einige Wohnhäuser, Recyclinghof, Feuerwehr, Kirche

2.2.4 Tunnel Kaisermühlen (A22)

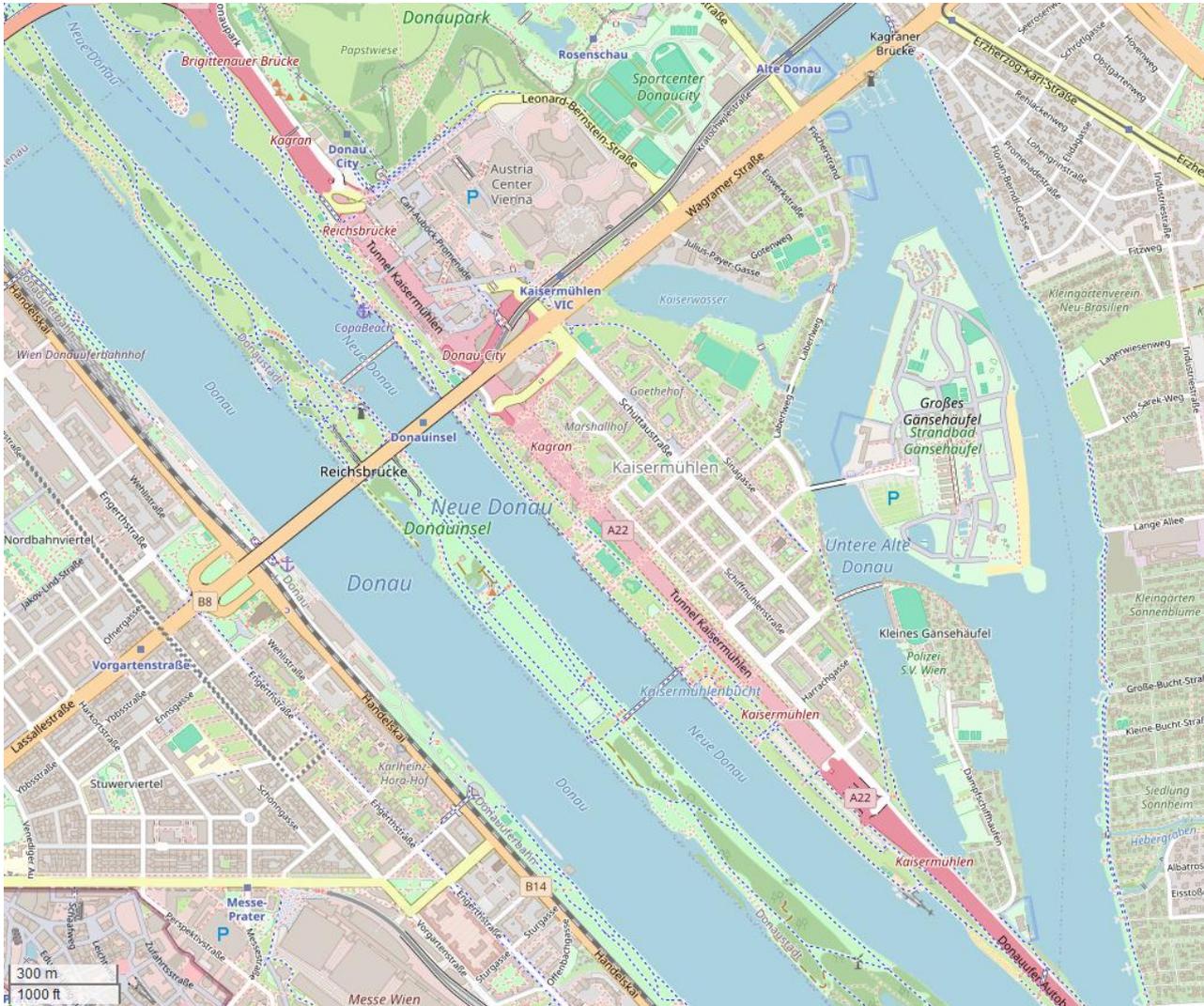


Abbildung 5: Tunnel Kaisermühlen

Bundesland: Wien

Länge: 2124 bzw. 2117 m

Tunnel in Deckelbauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Viele Wohnhäuser (auch Hochhäuser) sowie Volksschule, Supermärkte, Hotels, u.a.: sehr hohe Siedlungs- und Bebauungsdichte

2.2.5 Tunnel Hirschstetten (A23 Südosttangente)

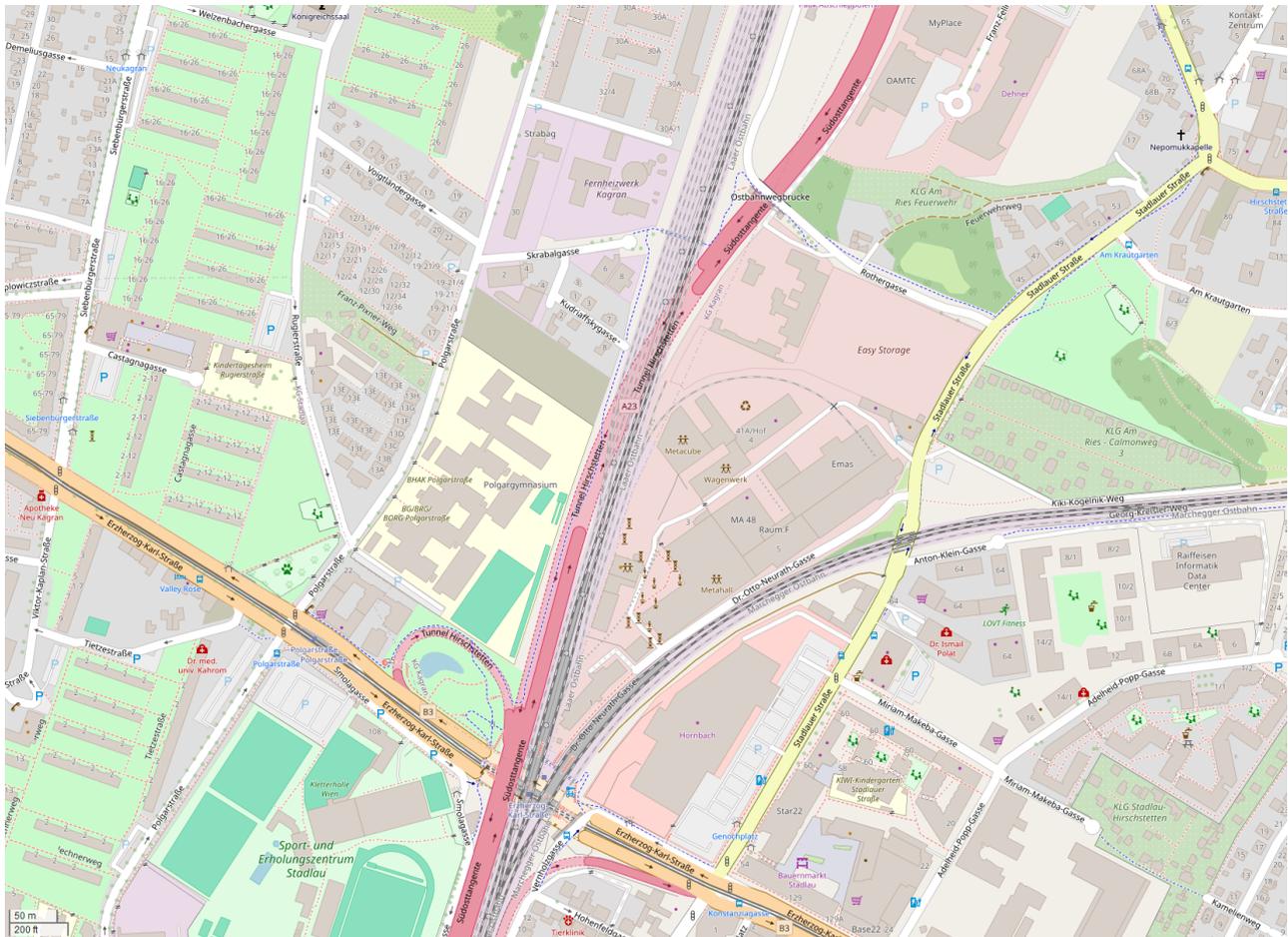


Abbildung 6: Tunnel Hirschstetten

Bundesland: Wien

Länge: 490 bzw. 280 m

Tunnel in Deckelbauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Wohngebäude, Sport und Erholungszentrum Stadlau, Wirtschaftshof Stadlau (Metastadt), Baumarkt, BG/BRG/BORG/BHAK Polgarstraße, Kleingartenanlagen

2.2.6 Tunnel Stadlau und Stadlau Rampe 54

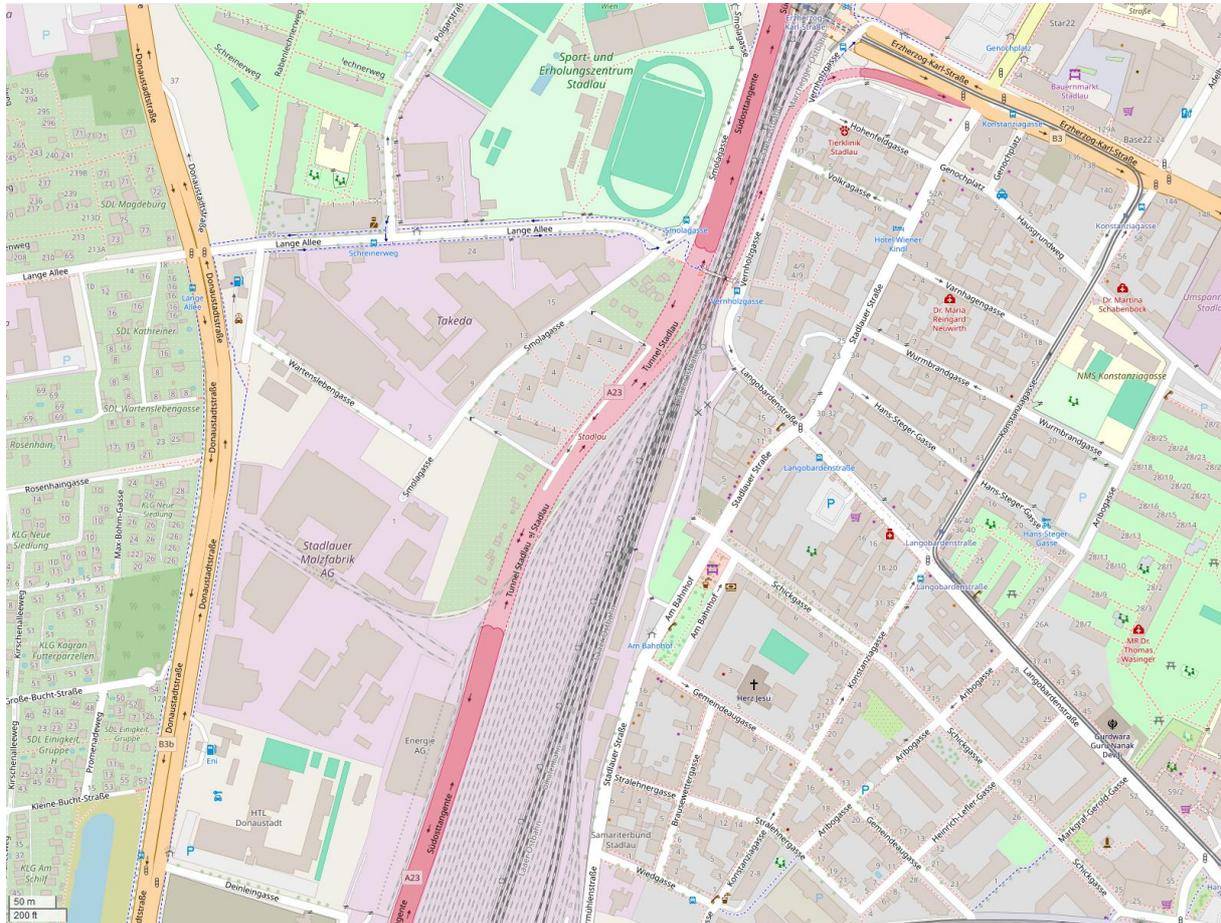


Abbildung 7: Tunnel Stadlau und Stadlau Rampe 54

Bundesland: Wien

Länge: 465 bzw. 723 m

Tunnel in Deckelbauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Betriebsgelände Fa. Takeda, Stadlauer Malzfabrik, viele Wohnhäuser, Kleingärten, Sport und Erholungszentrum Stadlau, Kirche, Supermarkt, Tierklinik Stadlau

2.2.7 Tunnel Flachau

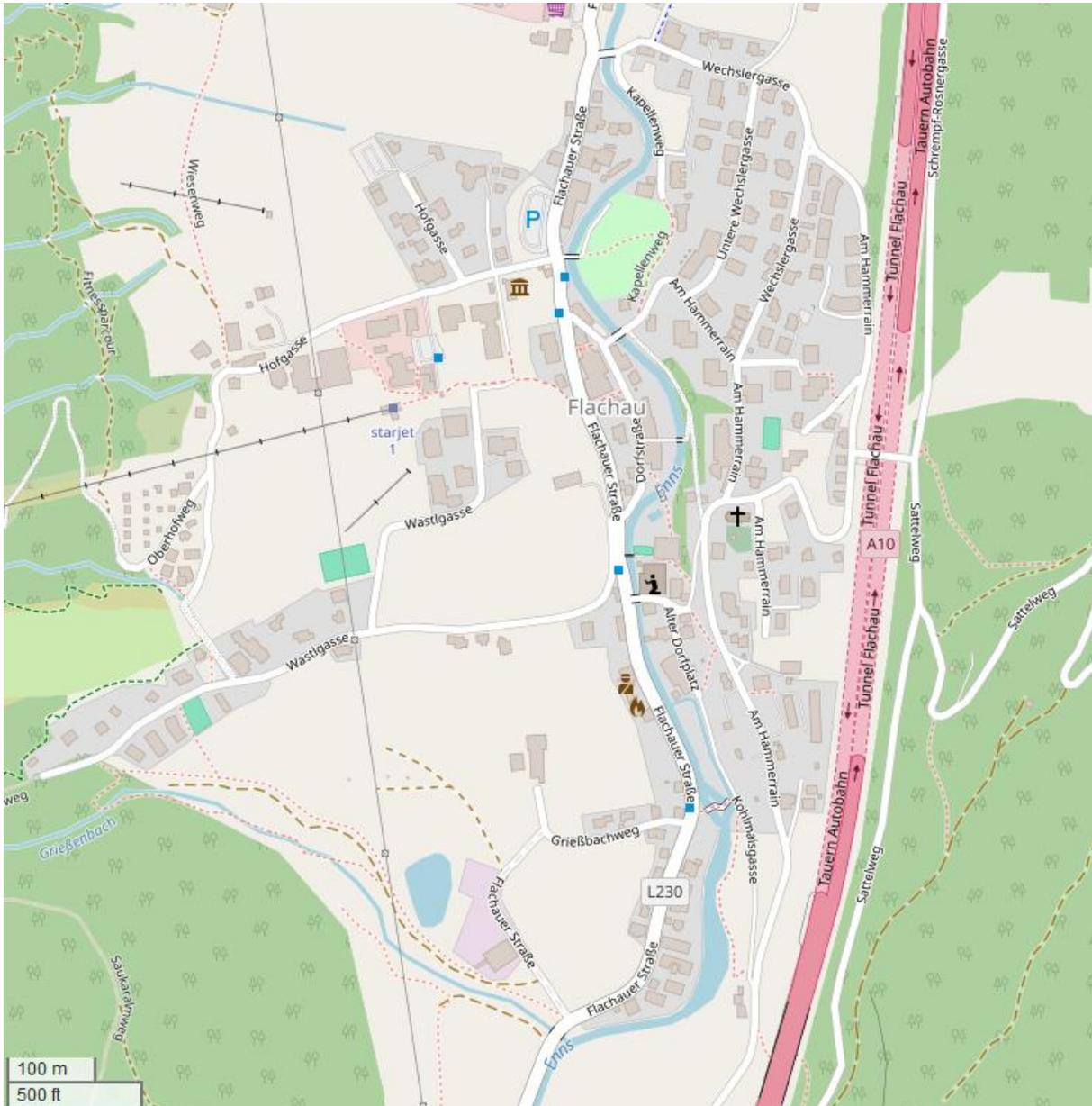


Abbildung 8: Tunnel Flachau

Bundesland: Salzburg

Länge: 492 m

Tunnel in offener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Ein Teil der Siedlung mit Wohnhäusern, Kirche

2.2.8 Tunnel Freinberg und AST Donau Nord; A26 Linzer Autobahn

(Tunnel in Bau)



Abbildung 9: Tunnel Freinberg und AST Donau Nord

Bundesland: Oberösterreich

Länge: 3200 m

Tunnel in geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Sehr viele potentielle Abnehmer unterschiedlichster Art; Tunnel führt durch die Stadt Linz

2.2.9 Tunnel Bindermichl (A7 Mühlkreis Autobahn)

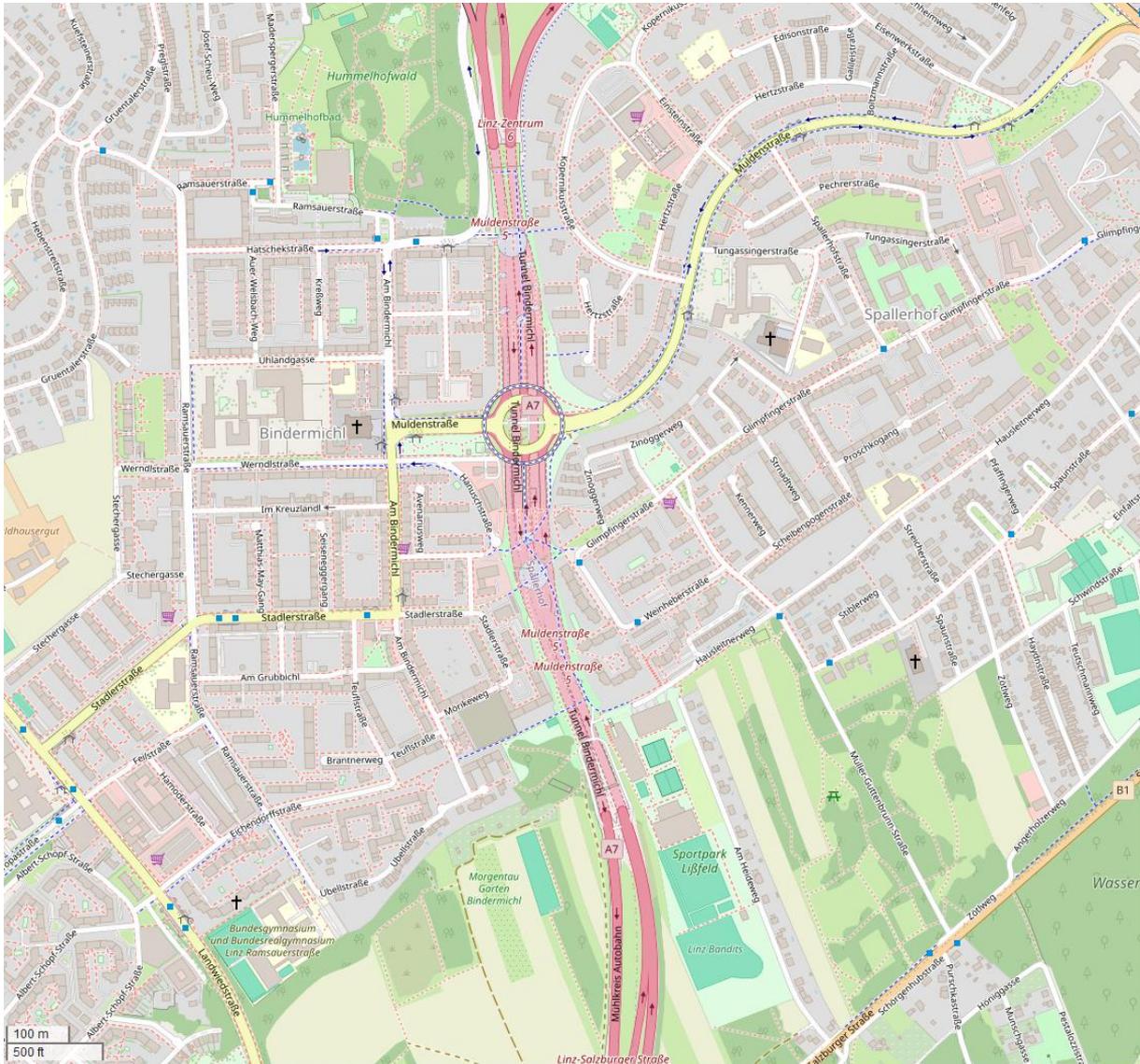


Abbildung 10: Tunnel Bindermichl

Bundesland: Oberösterreich

Länge: 1061 bzw. 1068 m

Tunnel in offener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Viele Wohnhäuser sowie Kindergarten, Jugendzentrum, Sportpark Lißfeld, Einkaufszentrum, Kirche

2.2.10 Tunnel Plabutsch

(Tunnel soll in nächster Zeit saniert werden)

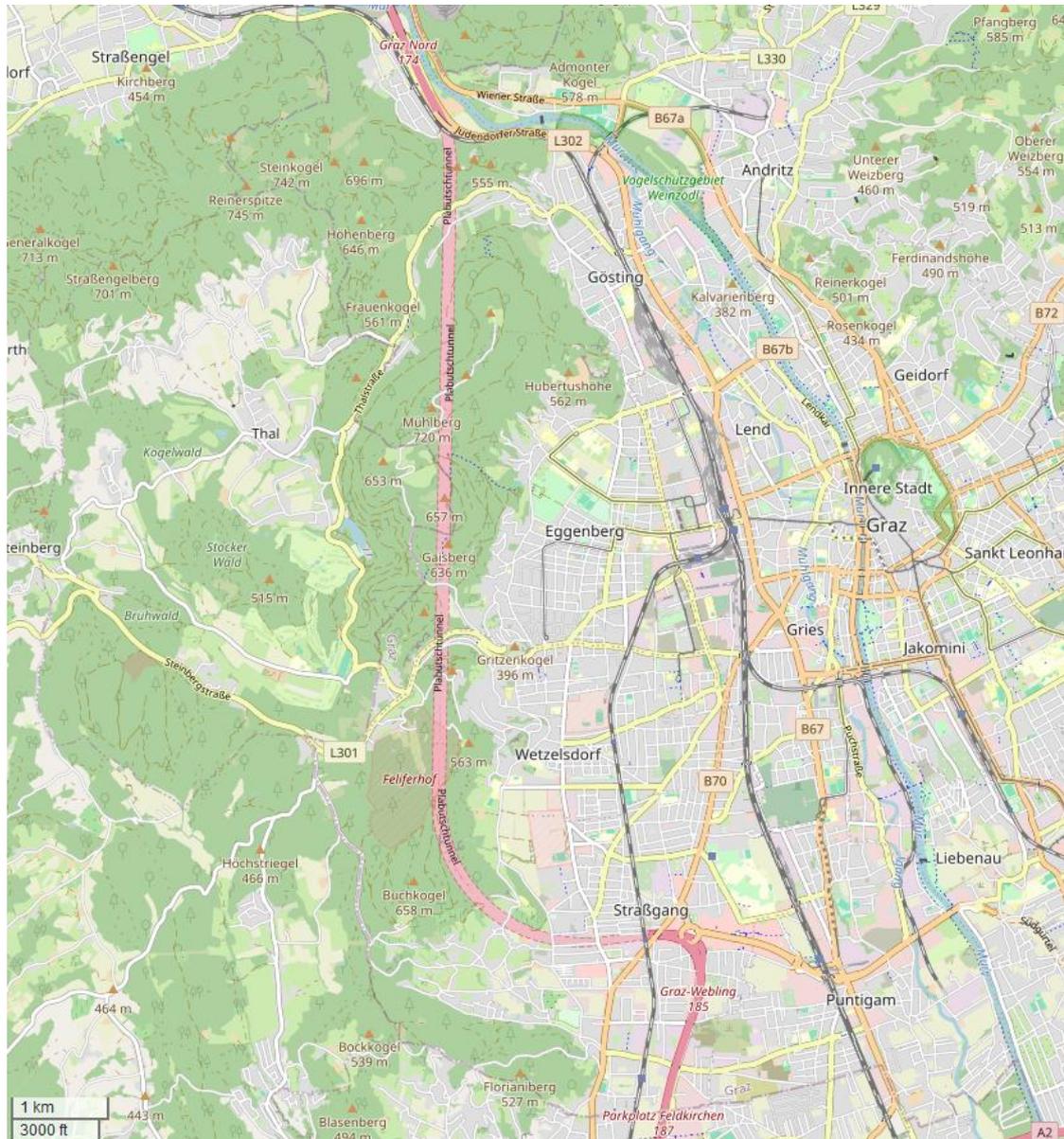


Abbildung 11: Tunnel Plabutsch

Bundesland: Steiermark

Länge: 9919 bzw. 10085 m

Tunnel in geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Im Norden: Ein paar Einfamilienhäuser

Im Süden: viele Wohnhäuser, einige Betriebe, Supermärkte

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 1000 m:

Ein Umkreis von 1000 m reicht in den westlichen Teil der Stadt Graz hinein. Dort liegen viele Hunderte an Wohnhäusern und Gaststätten, zudem mehrere Geschäfte, Schulen Kirchen, ein öffentliches Krankenhaus, ein Kindergarten ein Seniorenheim, die Gablenzkaserne und andere öffentliche Gebäude.

Die Wohnsiedlung „Greencity“ liegt in ca. 500 m Entfernung zum Plabutschtunnel.

2.2.11 Tunnel Arlberg

(Tunnel soll in nächster Zeit saniert werden)

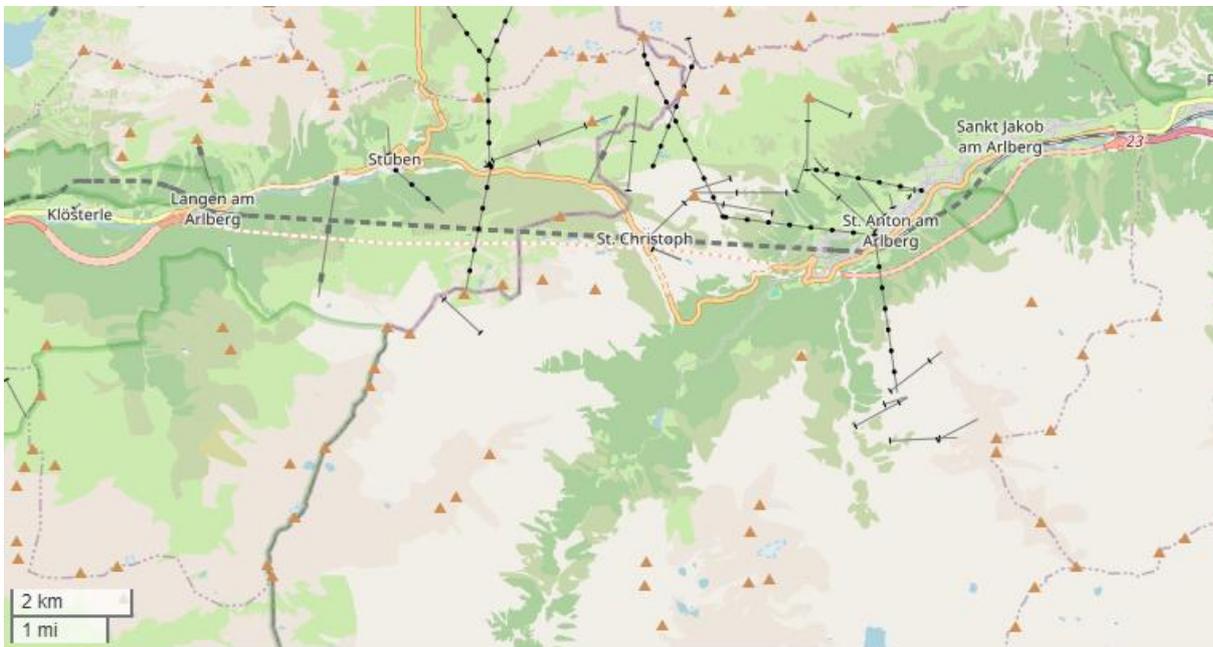


Abbildung 12: Tunnel Arlberg

Bundesland: Tirol/ Vorarlberg

Länge: 14125 m

Sehr tief liegender Tunnel

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Westseite: Ein Teil von St. Anton mit Wohnhäusern sowie Gasthäusern

Ostseite (Längen am Arlberg): ein paar Wohnhäuser

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 1000 m:

Der Bahnhof von St. Anton befindet sich ca. 500 m vom Tunnel entfernt. Fast die gesamte Ortschaft von St. Anton (2366 Einwohner) befindet sich in einem Umkreis von 1000 m. Dazu zählen sehr viele Wohnhäuser, Hotels, Geschäfte und andere Gewerbebetriebe sowie öffentliche Gebäude.

2.2.12 Tunnel Wöll, Rothenthurm, St. Peter; S 36 Murtal Schnellstrasse

(Tunnel in Planung)

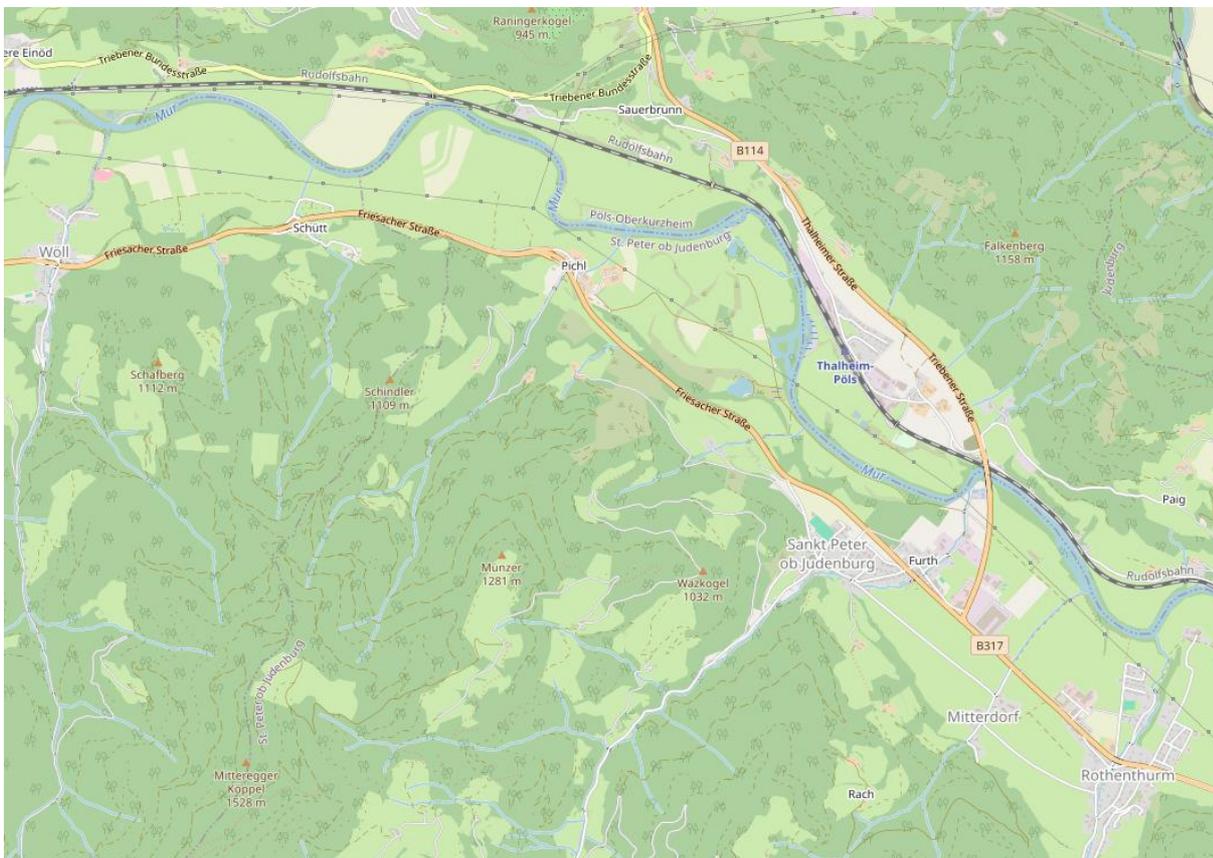


Abbildung 13: Tunnel Wöll, Rothenthurm, St. Peter

Bundesland: Steiermark

Länge: k.A.

Tunnel in geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Viele Wohnhäuser entlang der langen Strecke der geplanten drei Tunnel

2.2.13 Semmeringtunnel

(Tunnel soll in nächster Zeit saniert werden)

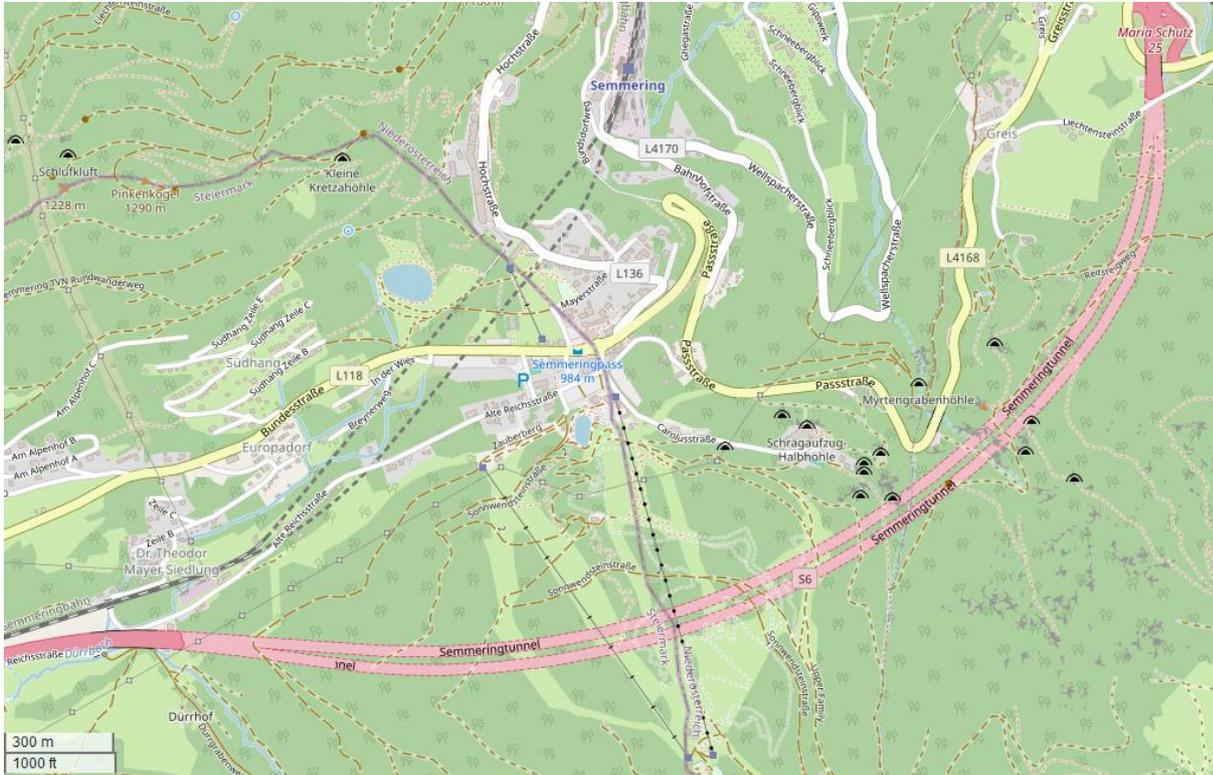


Abbildung 14: Semmeringtunnel

Bundesland: Niederösterreich/Steiermark

Länge: 3414 bzw. 3489 m

Tunnel in geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Einzelne Häuser am Nordportal und Südportal

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 1000 m:

Im Umkreis von 1000 m befindet sich die gesamte Ortschaft am Semmering Pass mit vielen Beherbergungsbetrieben und Wohnhäusern

2.2.14 Tunnel Königsdorf (S7 Fürstenfelder Schnellstrasse)

(Tunnel im Bau)

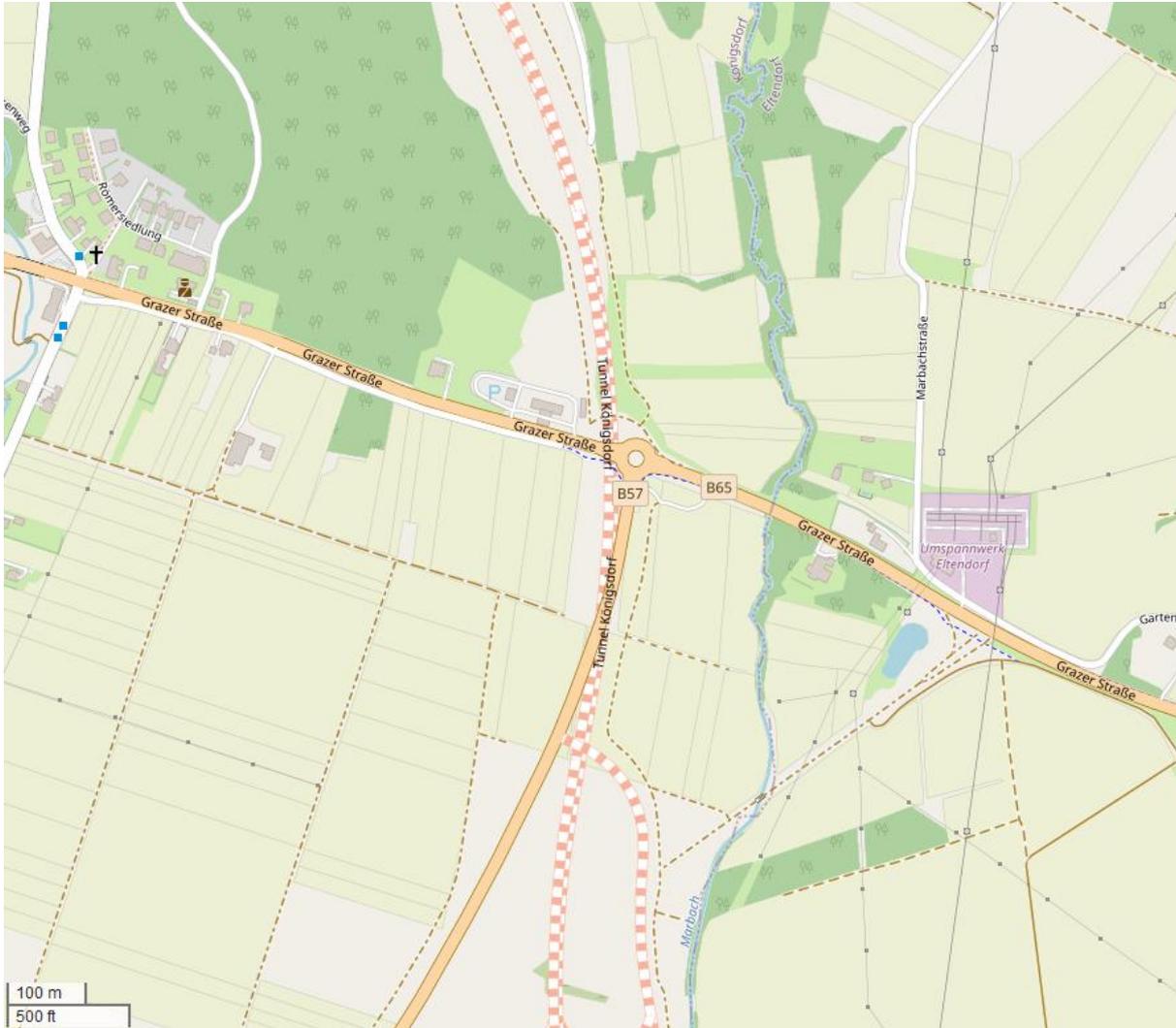


Abbildung 15: Tunnel Königsdorf

Bundesland: Burgenland

Länge: ca. 630 m

Tunnel geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

ARBÖ Prüfzentrum, Tankstelle, wenige Einfamilienhäuser

2.2.15 Tunnel Rudersdorf

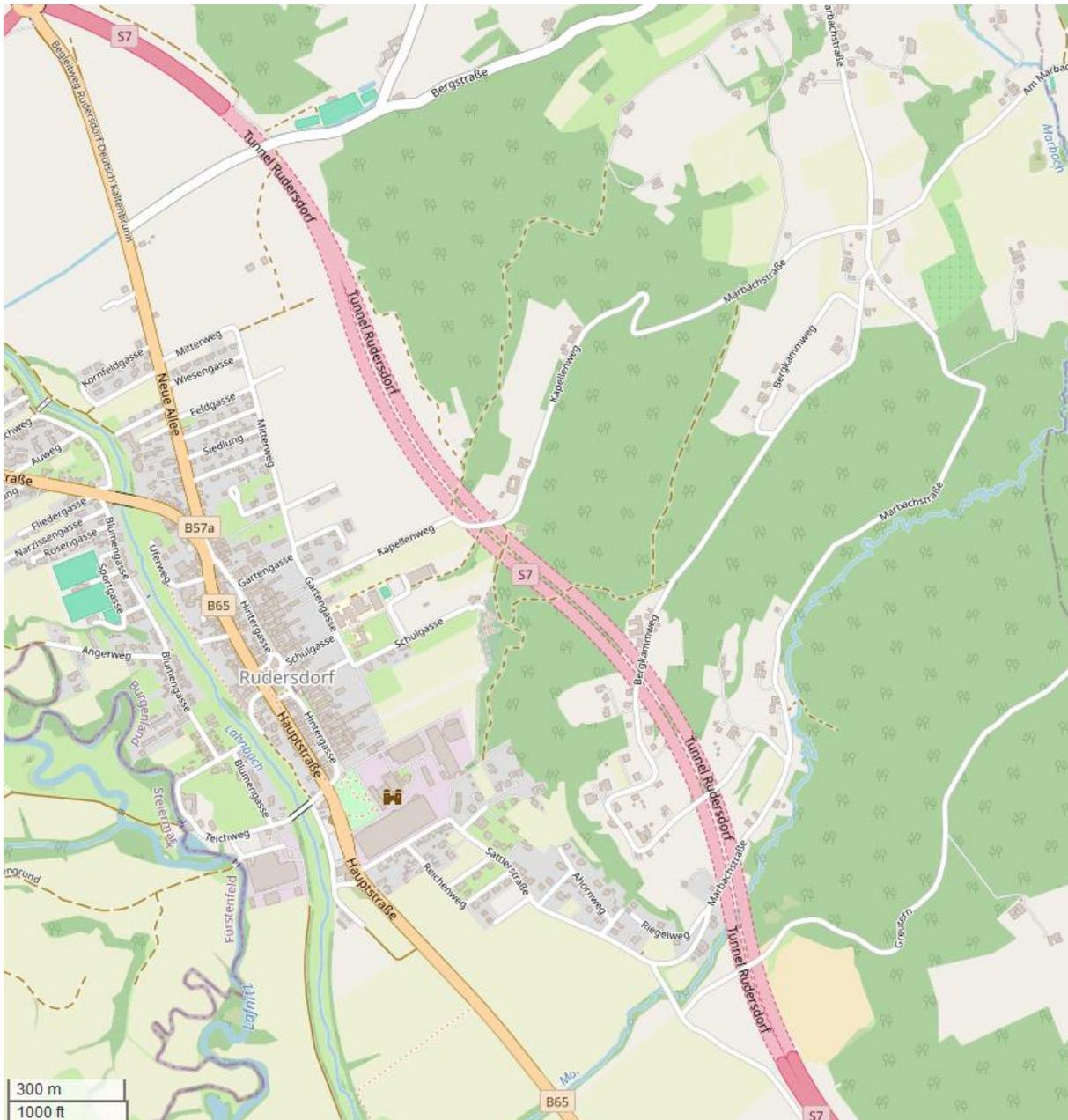


Abbildung 16: Tunnel Rudersdorf

Bundesland: Burgenland

Länge: 2890 bzw. 2890 m

Tunnel in geschlossener Bauweise

Potenzielle Abnehmer im Umkreis von ca. 300 m:

Mehrere Wohnhäuser

2.3 Wichtigste Erkenntnisse

Die analysierte Tunnelauswahl zeigt deutlich, dass sich in Österreich mehrere Tunnel befinden, in deren Umkreis von etwa 300 Metern zahlreiche potenzielle Wärmeabnehmer liegen. In dieser Entfernung lässt sich ein Wärmeverteilsystem in der Regel technisch einfach und wirtschaftlich sinnvoll umsetzen. Zwar stellt dieser 300-Meter-Radius einen praxisnahen Orientierungswert dar, doch ist er keinesfalls als feste Obergrenze zu verstehen. Im konkreten Fall können – insbesondere bei größeren Tunnelanlagen – auch weitere Entfernungen in die Betrachtung einbezogen werden. Bei der im Kapitel 4 erläuterten Wärmebedarfsanalyse wurde aus diesem Grund auch ein Betrachtungsradius von 1000 Metern gewählt.

Bei der Analyse potenzieller Abnehmer sind neben der reinen Entfernung auch rechtliche und praktische Aspekte zu berücksichtigen. Erfahrungsgemäß ist der Anschluss öffentlicher Gebäude an ein Tunnelthermiesystem rechtlich wie organisatorisch einfacher zu realisieren. Ähnlich verhält es sich bei großen gewerblichen Liegenschaften, bei denen nur ein einzelner Vertragspartner für die Wärmeabnahme erforderlich ist. Deutlich komplexer gestaltet sich die Umsetzung hingegen bei vielen kleinteiligen Einzelabnehmern, da hier zahlreiche individuelle Abstimmungen und Verträge notwendig wären.

3. GEOTHERMISCHE TECHNOLOGIEN

In diesem Abschnitt wird eine Herangehensweise zur Grobabschätzung der entziehbaren Wärmeenergie von Tunnelthermie-Anlagen vorgestellt. Die vorgeschlagene Methodik soll insbesondere fachkundigen Anwendern eine Prognose der aus Tunnelthermie entziehbaren Wärmeenergie innerhalb einer gewissen Bandbreite ermöglichen, um überprüfen zu können, ob der Einsatz von Tunnelthermie für ein betrachtetes Tunnelbauwerk von Interesse ist. Die Herangehensweise ist sowohl auf Neubautunnel als auch auf Bestands- und sanierungsbedürftige Tunnel anwendbar.

Die entziehbare Wärmeleistung wird dabei in Abhängigkeit von den Tunneleigenschaften (Bauweise, Querschnitt, Länge, Tunnellufttemperatur), den Untergrundeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität des Bodens, Grundwasserverhältnisse, Bodentemperatur) sowie den ausgewählten Energie-Geostrukturen (Absorbertechnologien) anhand von Erfahrungswerten und Ergebnissen numerischer Parameterstudien aus der Literatur abgeschätzt.

Für den Einsatz geothermischer Systeme im Tunnelbau stehen verschiedene Energie-Geostrukturen zur Verfügung, die sich zum Teil bereits im Hochbau bewährt haben. Diese Systeme basieren grundsätzlich auf dem Prinzip der Massivabsorbertechnologie, wie sie von thermisch aktivierten Fundamenten bekannt ist. Dabei werden sogenannte Absorberrohre in das Betontragwerk des Tunnels eingelegt, durch die ein Wärmeträgerfluid zirkuliert und dem umgebenden Boden dabei Wärme entzogen wird. Dieses im Beton eingebettete, geschlossene Rohrleitungssystem wird auch als Primärkreislauf bezeichnet. Die über das Fluid aufgenommene Wärme wird über den Primärkreislauf zur Wärmepumpe geleitet, die sie durch Zuführung externer Energie auf ein nutzbares Temperaturniveau anhebt und anschließend über einen Wärmetauscher auf den Sekundärkreislauf überträgt. Im Sekundärkreislauf wird die von der Wärmepumpe angehobene Temperatur an das Heizungssystem abgegeben und im Bauwerk verteilt.

Für Tunnel in offener Bauweise können bewährte Energie-Geostrukturen wie thermisch aktivierte Schlitzwände, Energiepfahlwände oder Energiebodenplatten eingesetzt werden. Diese Elemente sind technologisch ausgereift und lassen sich bei Neubautunneln vergleichsweise einfach in den Bauablauf integrieren. Für Tunnel in geschlossener Bauweise kommen thermisch aktivierte Tübbinge, Energiesohlen, Geotextilien mit integrierten Absorberleitungen sowie Energieanker zum Einsatz. Auch diese Systeme beruhen auf der Massivabsorbertechnologie aus dem Hochbau,

wurden jedoch für die besonderen Anforderungen maschinell oder bergmännisch vorgetriebener Tunnel weiterentwickelt.

Die thermische Leistungsfähigkeit von Massivabsorbern wird wesentlich durch die standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie durch technische und betriebliche Rahmenbedingungen beeinflusst, welche im Folgenden näher erläutert werden (Abbildung 17).

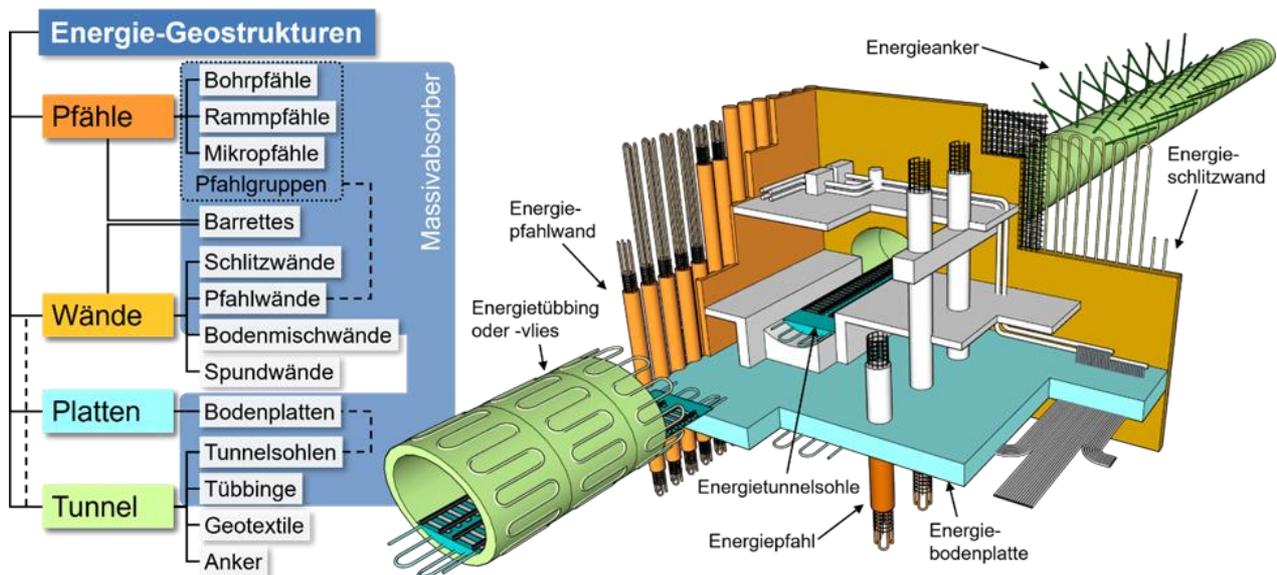


Abbildung 17: Systemübersicht verfügbarer Energie-Geostrukturen anhand des Beispiels einer fiktiven U-Bahn-Station. Quelle: Adrian Brunner [9]

3.1 Methodik

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, eine Methodik zur vereinfachten Abschätzung der thermischen Entzugsleistung von Tunnelthermie-Anlagen zu entwickeln. Diese Entzugsleistung soll anschließend in Relation zum lokalen Heizenergiebedarf aus der Wärmeabnehmeranalyse gesetzt und in eine Bewertungsmatrix integriert werden, die als Entscheidungshilfe zur Auswahl geeigneter Tunnelstandorte für eine geothermische Nutzung dient. In die Bewertungsmatrix fließen folgende zentrale Kriterien ein:

- **Geologische Rahmenbedingungen**

Die thermische Eignung eines Standortes wird wesentlich durch die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds sowie den vorliegenden Grundwasserverhältnissen beeinflusst. Diese Parameter

bestimmen maßgeblich, wie effizient thermische Wärmeenergie über Energie-Geostrukturen aufgenommen oder abgegeben werden kann.

- **Energie-Geostrukturen**

Die eingesetzte Absorbertechnologie zur Wärmegewinnung (z. B. Energiepfähle, Geotextilien, etc.) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer thermischen Leistungsfähigkeit, baulichen Komplexität sowie ihres Erprobungsgrades. Ihre Auswahl erfolgt projektspezifisch.

- **Baukategorie und Bauweise des Tunnels**

Es wird zwischen Neubau, Bestandsbau und Sanierung unterschieden. Auch die Bauweise – offen oder geschlossen – hat Einfluss auf die Umsetzbarkeit und Wahl geeigneter Energie-Geostrukturen.

- **Thermische Randbedingungen**

Hierzu zählen insbesondere die Temperatur der Tunnelluft und des umliegenden Bodens. Diese Parameter entscheiden darüber, ob ein Tunnel als Energiequelle (Entzugsbetrieb zu Heizung) oder als Energiesenke (Injektionsbetrieb zur Kühlung) eingesetzt werden kann.

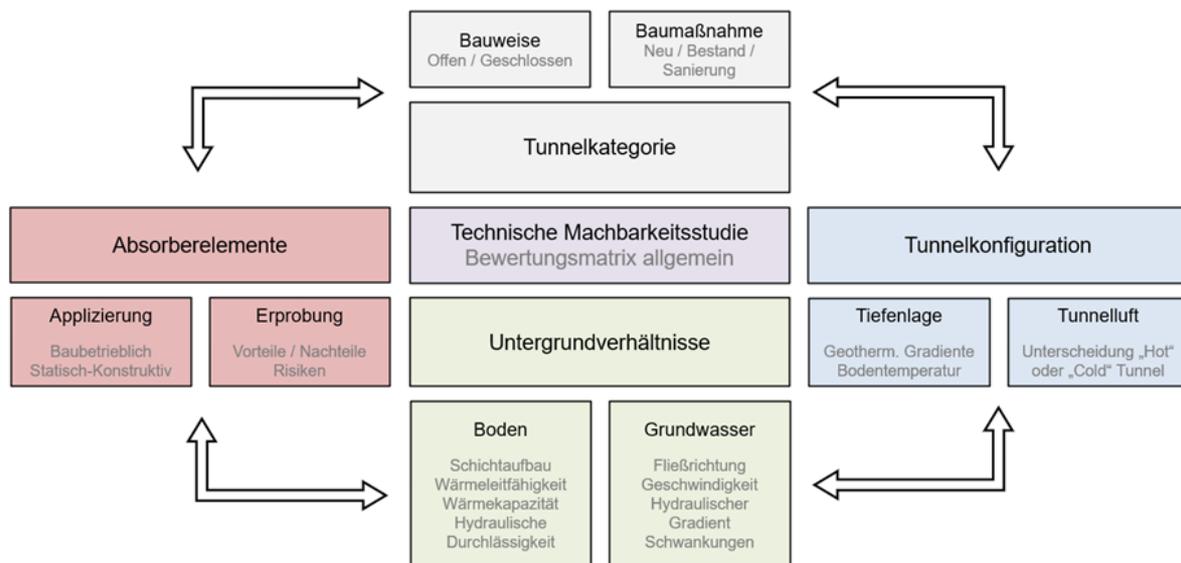


Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Energiegewinnung bei Energietunneln

Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds ist eine zentrale Einflussgröße für die thermische Entzugs- bzw. Injektionsleistungsfähigkeit eines geothermischen Systems und hängt maßgeblich von der Mineralzusammensetzung, der Trockendichte, dem Wassergehalt sowie dem Porenanteil des

Bodens ab (Abbildung 18). Für die Abschätzung können sogenannte empirische Berechnungsmodelle oder Erfahrungswerte aus Tabellenwerken verwendet werden. Auf Basis der Untersuchungen von [24] können dabei folgende drei Berechnungsmodelle empfohlen werden:

- Modell von Côté & Konrad [14]
- Johansen-Modell [23]
- Campbell-Modell [12] auf Basis de Vries [18]

Diese empirischen Modelle liefern gute Näherungen und sind für das erforderliche Planungsstadium ausreichend genau. Aufgrund der Einfachheit wird die Anwendung des Modells von Côté & Konrad [14] empfohlen. Alternativ können folgende Tabellenwerke zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit von Böden und Gesteinen aus technischen Regelwerken herangezogen werden:

VDI 4640 (Deutschland) [36]

ÖWAV-Regelblatt (Österreich) [33]

SIA 384/6 (Schweiz) [35]

Die Energie-Geostrukturen dienen der Wärmeübertragung zwischen Boden und Wärmeträgerfluid. Ihre Auswahl hängt sowohl von den baulichen Gegebenheiten als auch vom Erprobungsgrad der jeweiligen Systeme ab.

- **Erprobte Systeme:**

Energiepfähle, Energieschlitzwände, Energiebodenplatten, Erdwärmesonden, Energiegeotextilbahnen (= Energiegeotextilien), Nutzung des Drainagewassers, Energiekanäle

- **Teilweise erprobte Systeme:**

Energietübbinge, Energiefertigteile, Energieanker, Absorbersystem im Fahrbahnaufbau (zur Eisfreihaltung), Energiebrunnen

- **Noch nicht erprobte Systeme:**

Absorbermatten, Energiepaneele, Radialsonden

Für Bestandsbauwerke oder Sanierungsfälle bieten sich auch modulare Lösungen an. Hierzu zählen vorgefertigte Absorbermatten, die entweder in die Innenschale einbetoniert oder durch Schienensysteme auf die Innenschalenoberfläche befestigt werden können. Eine weitere Option stellt die radiale Anordnung von Erdwärmesonden entlang der Tunnelwand dar.

In der Abbildung 19 wird außerdem ein Organigramm zur Tunnelkategorisierung dargestellt.

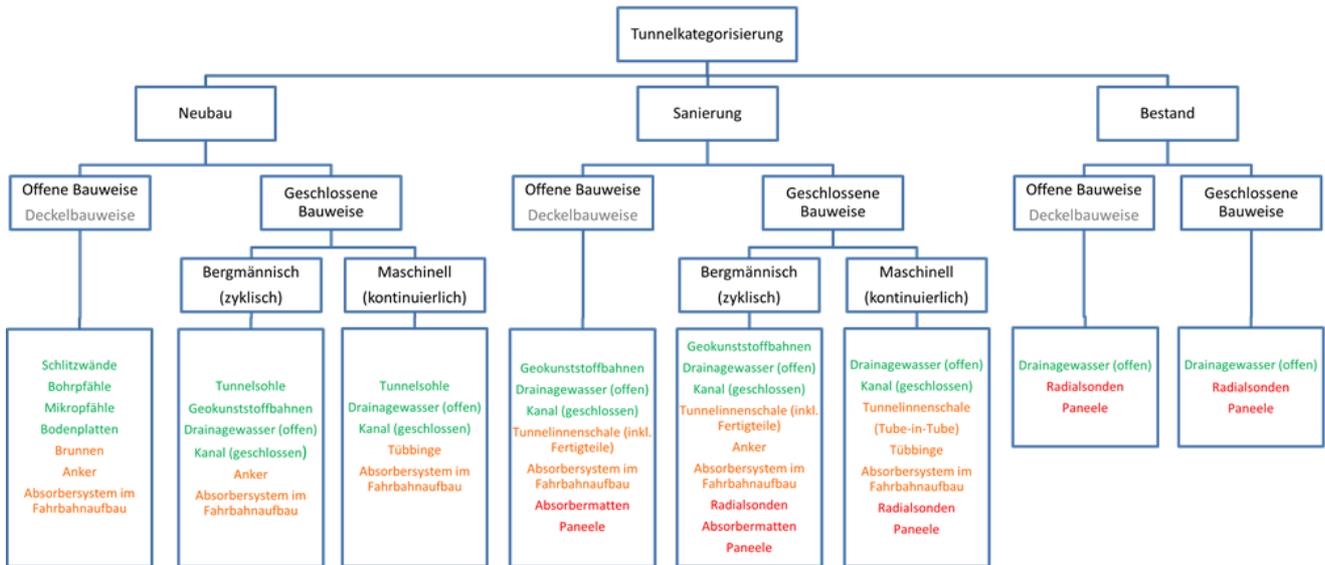


Abbildung 19: Organigramm zur Tunnelkategorisierung und Zuordnung möglicher Energie-Geostrukturen in Abhängigkeit von der Tunnelbauweise.

Nur auf Basis verlässlicher geotechnischer Daten lassen sich realitätsnahe Aussagen über das thermische Potenzial eines Standorts treffen. Aufbauend auf diesen Parametern erfolgt für

ausgewählte Energie-Geostrukturen im nächsten Abschnitt die überschlägige Abschätzung der thermischen Entzugsleistung.

Zur operativen Anwendung dieses Bewertungsschemas wurde ein Flussdiagramm entwickelt, das den Planungsprozess in vier aufeinander abgestimmte Pfade gliedert (siehe Abbildung 20).

Ein wesentlicher Eingangsparameter ist die Bodentemperatur T_B . Diese wird aus dem Jahresmittel der Außenlufttemperatur $T_{0,H}$ in Abhängigkeit der Geländehöhe H in Metern über Adria gemäß Gleichung 1 abgeschätzt [32].

$$T_{0,H} = 12,52 - 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot H \quad (1)$$

Als Referenzwert dient der höchste Geländepunkt über dem Tunnel, da mit zunehmender Geländehöhe die mittlere Jahresaußentemperatur abnimmt. Zusätzlich wird der geothermische Gradient berücksichtigt: Die Bodentemperatur steigt mit zunehmender Tunnelüberdeckung \ddot{U} [m] um 2,5 K je 100 Meter Überdeckung. Daraus ergibt sich die Bodentemperatur T_B als Summe aus der mittleren Jahresaußentemperatur am höchsten Geländepunkt $T_{0,K}$ und dem tiefenabhängigen Temperaturzuwachs T_{grad} gemäß Gleichung 2.

$$T_B = T_{0,H} + T_{\text{grad}} = [12,52 - 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot H] + [2,5 \cdot 0,01 \cdot \ddot{U}] \quad (2)$$

Für die Abschätzung des Wärmeentzugs wird nur der Einfluss der Außenluft an den Tunnelportalen berücksichtigt. Die ersten 300 Meter am Tunnelanfang sowie am Tunnelende werden nicht berücksichtigt, um Effekte durch schwankende Außentemperaturen auszuschließen.

Weitere wichtige Parameter sind die geometrischen Eigenschaften des Tunnels:

- Effektive Tunnellänge (abzüglich der beiden 300-Meter-Abschnitte an den Portalen)
- Erdberührte Energie-Geostrukturfläche pro Tunnelmeter (z. B. Wand- und Sohlenflächen)

Bei Tunneln in geschlossener Bauweise entspricht die nutzbare Fläche der abgewickelten First- und Ulmenfläche. Bei Tunneln in offener Bauweise sind es die senkrechten Seitenwände und der Deckel. Die Sohlänge bzw. Fläche des Tunnels wird gesondert betrachtet. Oft werden Tunnel zweiröhrig ausgeführt - das heißt, dass zwischen den Einzelröhren ein Abstand vorhanden ist. Das muss bei der Entzugsabschätzung ebenfalls berücksichtigt werden, da in diesen Überschneidungsbereichen dem Boden mehr Wärme entzogen wird. In der hier vorgestellten Methode wird deshalb die Abschätzung für jeweils eine einzelne Tunnelröhre durchgeführt, und zur Berücksichtigung einer Doppelröhre wird die abgeschätzte Leistung mit einem Faktor beaufschlagt, der die entziehbare Wärmeleistung zwischen 0,50 (bei sehr geringem Röhrenabstand) und 0,75 (bei sehr großem Röhrenabstand) verringert.

Für die Entzugsabschätzung wird von einer durchgehenden Nutzung über einer siebenmonatigen Heizperiode (Oktober bis April) ausgegangen. Die Wärmepumpen laufen durchgehend, außerhalb der Heizperiode erfolgt keine Wärmeentnahme, sodass sich der Boden regenerieren kann. Die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodens wird aus Geotechnischen Gutachten oder aus Geomechanischen Untersuchungsberichten entnommen. Aus den Berichten geht dabei häufig eine Zuordnung der Gesteins- bzw. Bodenarten entlang der Tunnellänge hervor. Über ein gewichtetes Mittel je Tunnelabschnitt kann dann eine mittlere Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Die Abschätzung der Wärmeentzugsleistung erfolgt anschließend in Abhängigkeit von:

- Bodentemperatur
- Wärmeleitfähigkeit des Bodens
- Grundwasserverhältnissen bzw. Grundwasserströmungsgeschwindigkeit

Die Entzugsleistungen werden entweder aus numerisch ermittelten Bemessungsdiagrammen oder als Erfahrungswerte aus einschlägiger Fachliteratur entnommen (siehe Anhang). Die ermittelte

spezifische Leistung (in W/m Tunnellänge) wird mit der effektiven Tunnellänge multipliziert. Daraus ergibt sich die entziehbare Gesamtleistung. Diese wird mit der Anzahl der Betriebsstunden (7 Monate x 30 Tage x 24 Stunden = 5.040 Stunden) multipliziert, um die generierbare Wärmeenergie je Heizperiode zu berechnen. Die berechnete Energie entspricht der Primärenergie, also jener, die der Wärmepumpe zur Verfügung steht. Beim Endverbraucher steht unter Berücksichtigung des COP-Wertes der Wärmepumpe eine entsprechend größere Wärmemenge zur Verfügung. Diese Methode liefert eine grobe Abschätzung der potenziellen Wärmeentnahme. Sie dient zur ersten technischen und wirtschaftlichen Bewertung von Tunnelthermie-Projekten, ersetzt jedoch keinesfalls eine detaillierte thermo-hydraulische Bemessung.

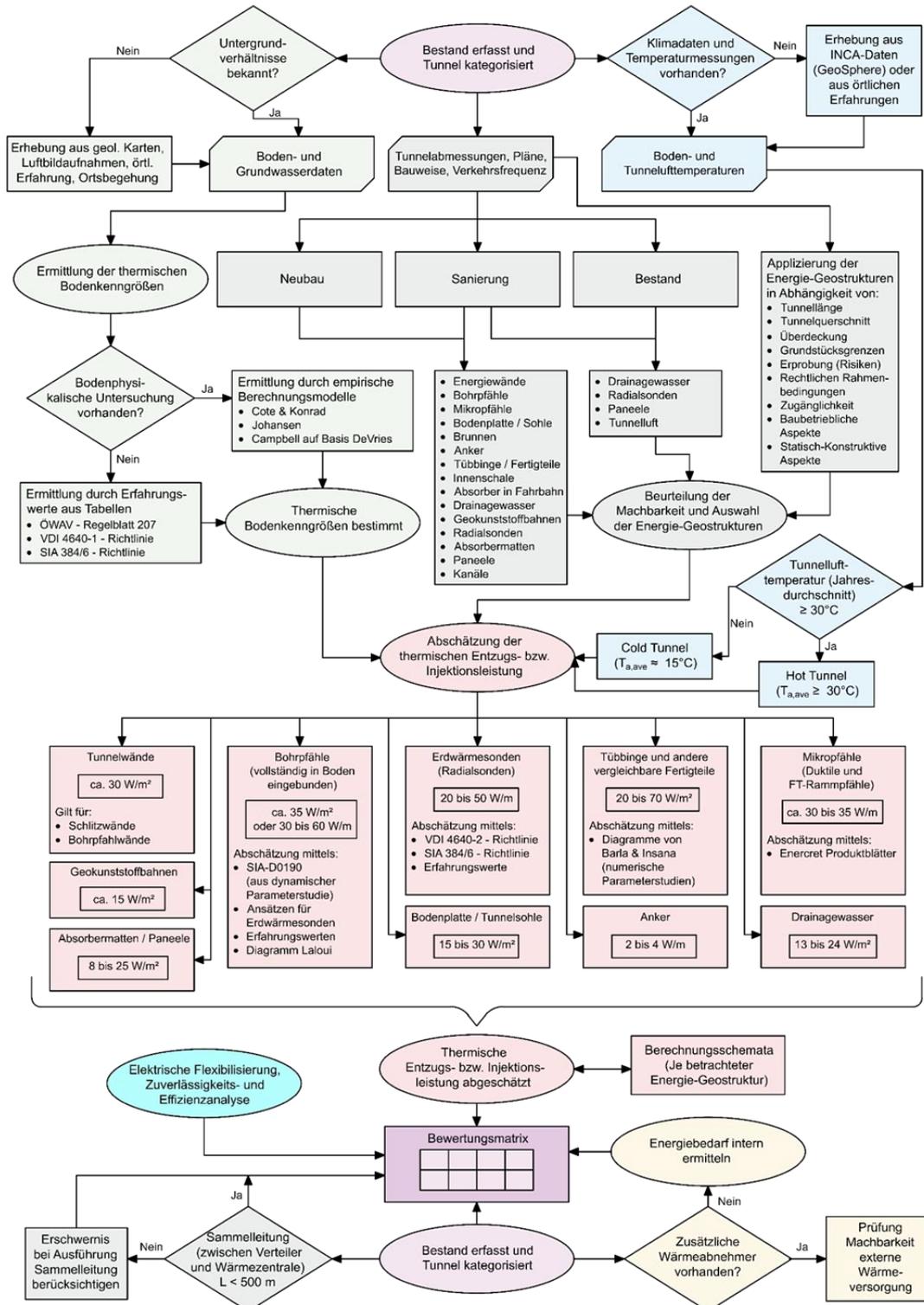


Abbildung 20: Flussdiagramm zur Abschätzung der Wärmeentzugsleistung bei Tunnelthermieanlagen.

3.2 Ergebnisse

Die in diesem Leitfaden beschriebene Methodik zur Abschätzung der entziehbaren Wärmeenergie aus Tunnelbauwerken wurde exemplarisch an folgenden acht österreichischen Bestandstunneln angewendet:

- Tunnel Semmering
- Tunnel Plabutsch
- Tunnel Arlberg
- Tunnel Bindermichl
- Tunnel Mils
- Tunnel Kaisermühlen
- Tunnel Freinberg
- Tunnel Rudersdorf

Bei den untersuchten Tunneln handelt es sich um Bestandstunnel, von denen einige – wie etwa der Tunnel Plabutsch – in absehbarer Zeit saniert werden. Für einen repräsentativen Vergleich wurden folgende Energie-Geostrukturen für die Abschätzung herangezogen:

- Energie-Fertigteile
- Energiematten (bzw. Absorbermatten)
- Energie-Geotextilien
- Energie-Paneele
- Energie-Sohlen
- Radialerdwärmesonden

Die Auswertung erfolgte differenziert nach der jeweils betrachteten Energie-Geostruktur. Zunächst wird die ermittelte Wärmeentzugsleistung relativ angegeben – bezogen auf einen laufenden Meter Tunnel (Abbildung 21). Anschließend erfolgt eine Skalierung auf den gesamten Tunnelabschnitt, um die absolute Entzugsleistung je Tunnel darzustellen (Abbildung 22). Darauf aufbauend zeigt ein weiteres Diagramm die jährliche Wärmeentzugsarbeit, berechnet über die angenommene Heizperiode von 5040 Stunden (Abbildung 23).

In Abbildung 24 wurde bei der Gegenüberstellung mit dem jährlichen Heizenergiebedarf eines 4-Personen-Wohnungshaushalts ein COP-Wert von 4 berücksichtigt, sodass die dargestellten Heizenergiemenge nach Wärmepumpe, also unter Einbeziehung der zusätzlich benötigten elektrischen Energie, ermittelt und verglichen wurde. Die in den Abbildung 24 dargestellten Ergebnisse basieren auf dem durchschnittlich erforderlichen, jährlichen Heizenergiebedarf eines typischen 4-Personen-Wohnungshaushalts in Österreich [39]. Dabei wurde von einer gleichmäßig

über das Jahr verteilten Dauerlast ausgegangen, die als konstante stündliche Heizleistung in die Berechnung eingegangen ist. Spitzenlasten wurden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. In der Praxis kann die tatsächliche Heizleistung jedoch je nach Nutzerverhalten zeitweise um das 2,5-Fache oder mehr über der durchschnittlichen Dauerlast liegen. Das spezifische Verbrauchsprofil sowie Möglichkeiten zur elektrischen Flexibilisierung (z. B. durch Peak-Shaving) werden im Rahmen der Wärmeabnehmeranalyse bzw. der Flexibilitätspotenzialanalyse detailliert untersucht.

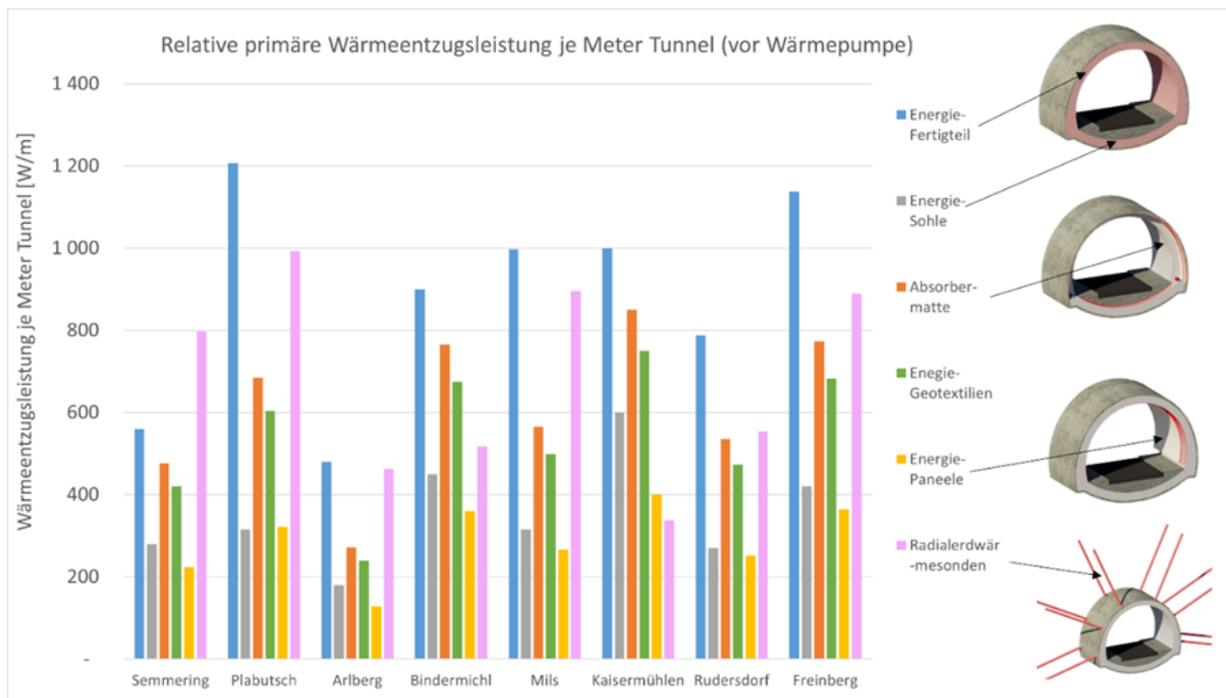


Abbildung 21: Abgeschätzte relative Wärmeentzugsleistung je Meter Tunnel für die untersuchten Tunnelobjekte, aufgeschlüsselt nach jeweils betrachteter Energie-Geostruktur. Die gezeigten Werte beziehen sich auf die thermisch nutzbare Primärenergie, d. h. die dem Untergrund direkt entziehbare Wärme vor ihrer Aufbereitung durch eine Wärmepumpe.

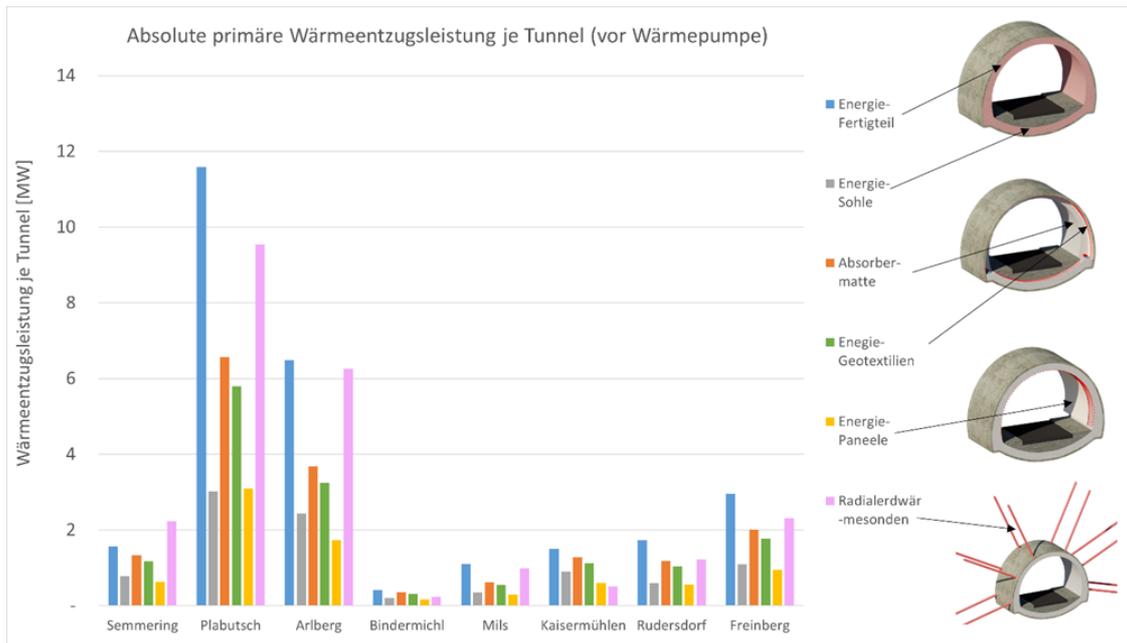


Abbildung 22: Abgeschätzte absolute Wärmeentzugsleistung für die untersuchten Tunnelobjekte, aufgeschlüsselt nach jeweils betrachteter Energie-Geostruktur. Die gezeigten Werte beziehen sich auf die thermisch nutzbare Primärenergie, d. h. die dem Untergrund direkt entziehbare Wärme vor ihrer Aufbereitung durch eine Wärmepumpe.

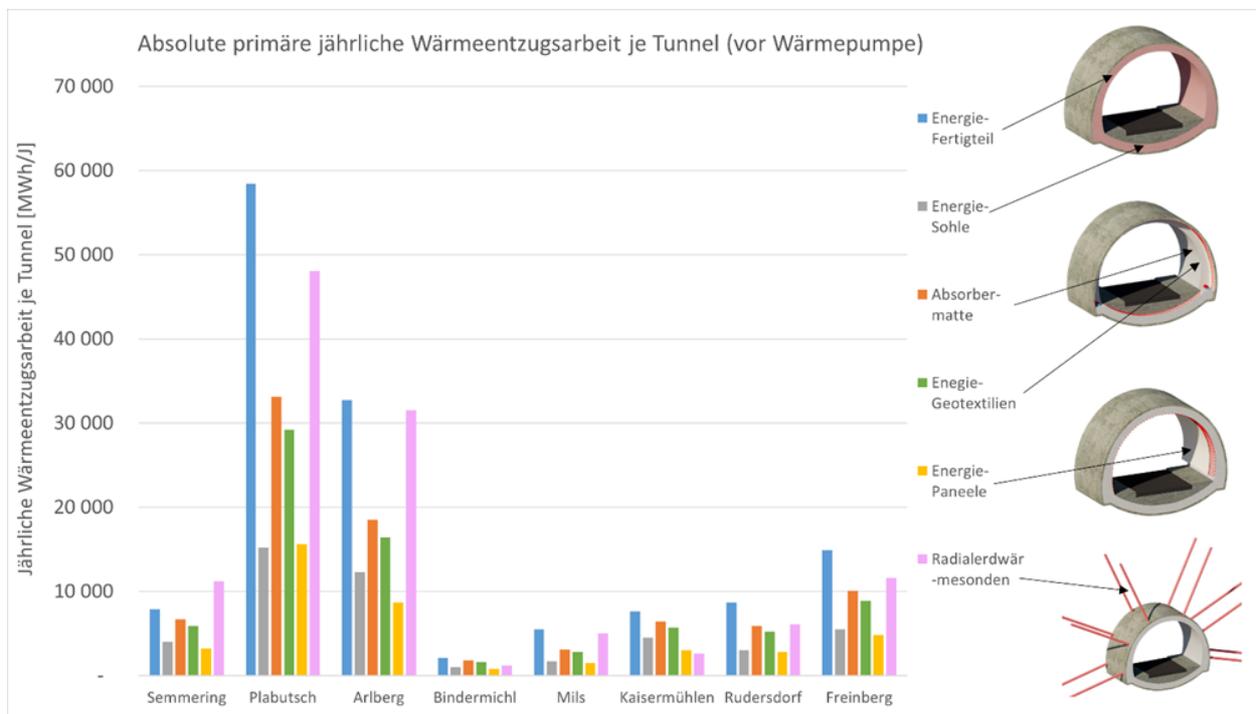


Abbildung 23: Abgeschätzte jährliche Wärmeentzugsarbeit für die untersuchten Tunnelobjekte, aufgeschlüsselt nach jeweils betrachteter Energie-Geostruktur. Die gezeigten Werte beziehen sich auf die thermisch nutzbare Primärenergie, d. h. die dem Untergrund direkt entziehbare Wärme vor ihrer Aufbereitung durch eine Wärmepumpe.

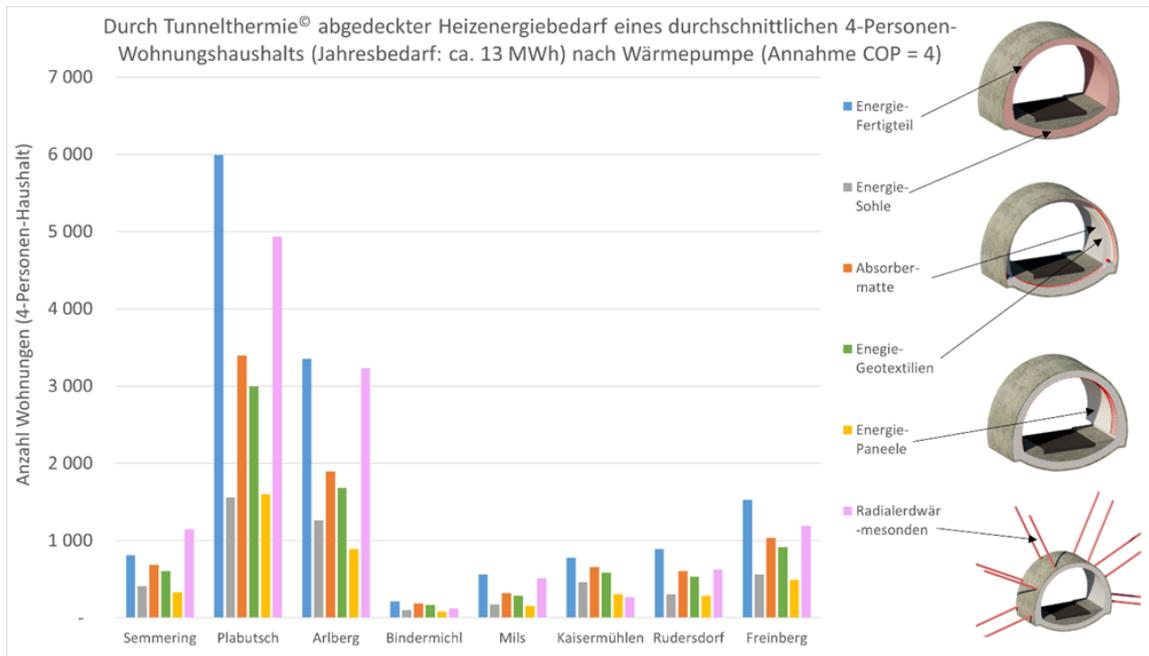


Abbildung 24: Vergleich der berechneten absoluten jährlichen Wärmeentzugsarbeit der untersuchten Tunnel (unterteilt nach Energie-Geostruktur) mit dem durchschnittlichen Heizenergiebedarf einer 4-Personen-Wohnung (ca. 13 MWh/Jahr). Die dargestellten Werte entsprechen der Sekundärenergie nach Wärmepumpe unter Berücksichtigung eines COP-Werts von 4 und basieren auf einer gleichmäßig verteilten Heizdauer von 5040 Stunden pro Jahr (keine Abdeckung etwaiger Energiespitzen berücksichtigt).

3.3 Wichtigste Erkenntnisse

Für die Anwendung der entwickelten Methode sind folgende Parameter erforderlich:

- Tunnellänge [m]
- Tunnelquerschnitt (für Flächenbezug)
- Mittlere Tunnelüberdeckung [m]
- Höchster Geländepunkt über Tunnel in Meter über Adria [m ü. A.]
- Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodens/Gebirges [W/mK]
(abzuschätzen aus geotechnischen Gutachten und Literaturwerten)

Einflussgrößen auf die entziehbare Wärmeleistung

- **Tunnellänge** als zentraler Faktor:
 - Tunnel mit weniger als 600 m Länge sind für eine geothermische Nutzung in der Regel ungeeignet, da die Einflüsse der Tunnelluft in den Portalbereichen bis ca. 300 m ins Innere reichen und den Wärmeentzug dort signifikant mindern.

- **Überdeckungstiefe** als wichtiger Faktor:
 - Je größer die Überdeckung, desto höher die Bodentemperatur und damit die wirksame Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgerfluid und Erdreich.
 - Zusätzlich spielt der höchste Geländepunkt über dem Tunnel eine Rolle – geringere Seehöhen bedeuten höhere Bodentemperaturen.
- **Wärmeleitfähigkeit** des Bodens:
 - Beeinflusst den Wärmeentzug, ist jedoch weniger entscheidend als Länge und Tunnelüberdeckung.
 - Gesättigte, wasserdurchströmte Böden oder wasserführendes Gebirge sind vorteilhaft.

Bedeutung des Wärmetausch-Kontakts zur Umgebung

- Je besser und flächiger der Kontakt zwischen Energie-Geostruktur und umgebendem Erdreich, desto höher die Wärmeentzugsleistung.
- Gut geeignet:
 - Energie-Tübbinge bzw. Energie-Fertigteile, Absorbermatten innerhalb Innenschalen, Energiewände, Energiebodenplatten, Energie-Geotextilien
- Kritisch zu bewerten:
 - Energiepaneele, die auf die Tunnelinnenschale montiert werden – stark abhängig von Tunnellufttemperatur, daher hohe Schwankung der Entzugsleistung

Bewertung der untersuchten Tunnelobjekte

- Sehr gut geeignet:
Tunnel Plabutsch und Arlberg – aufgrund der Länge besonders interessant.
- Potenzial vorhanden:
Tunnel Freinberg, Semmering, Rudersdorf, Kaisermühlen.
- Weniger geeignet:
Tunnel Mils und Bindermichl – wegen zu kurzer Tunnellänge kaum relevant.

Zusätzliche Potenziale und Sondernutzungen zur geothermischen Energiegewinnung

Vorerkundungstunnel, die häufig als Fluchttunnel genutzt werden, Querschläge und Pannenbuchten bieten sich besonders für geothermische Nachrüstungen an:

Verkehrsneutraler Einbau mit wenigen Beeinträchtigungen des regulären Tunnelbetriebs

Geringere logistische Einschränkungen während Einbau und Betrieb

Möglichkeit zur Installation unterschiedlicher Energie-Geostrukturen (z. B. Vergleich von Absorbermatten, Energiepaneelen, Tübbing, Energie-Geotextilien) für vergleichende Leistungsanalysen unter realen Bedingungen

Zerstörungsfreie Wärmenutzung ohne Eingriff in die Tunnelschale

Drainagewasser:

- Thermische Nutzung Drainagewassers über offene oder geschlossene Systeme
- kontinuierlich verfügbar, technisch ohne Eingriffe ins Tragwerk integrierbar

Energiepaneele zur Wandmontage:

- Nachrüstbar auf bestehende Tunnelschalen,
- Reduktion des Lichtraumprofils (~5 cm Aufbauhöhe), die bei Planung zu berücksichtigen ist

Absorberleitungen in der Fahrbahn:

- Einbau direkt in Fahrbahnkonstruktionen
- Keine Verringerung des Lichtraumprofils
- Kann im Zuge von Fahrbahnerneuerungen und Sanierungen appliziert werden

Löschwasserleitungen:

- Nutzung des zirkulierenden Löschwassers für Wärmeentzug möglich, da es ganzjährig im Tunnelsystem vorhanden ist – ohne Eingriff in die Tunnelschale
- Permanente Betriebsbereitschaft für den Brandfall bleibt erhalten

Einschränkungen und Anwendung der Methode

- Die durchgeführte Abschätzung basiert auf vereinfachten Annahmen und stellt keinen Ersatz für detaillierte thermisch-hydraulische Simulationen dar.
- Sie dient als Entscheidungsgrundlage in frühen Projektphasen, insbesondere im Rahmen einer Machbarkeitsstudie.
- Für eine konkrete Planung sind standortbezogene Simulationen und Bemessungen unter Berücksichtigung von realem Nutzerverhalten, Lastprofilen und Anlagenkonzepten unerlässlich.

4. WÄRMEBEDARFSANALYSE

4.1 Methodik

Um zu untersuchen, ob die energetische Versorgung der Gebäude nahe einem Tunnel machbar ist, wurde eine Analyse der bestehenden Gebäude und deren Energiebedarfe durchgeführt. Dafür wurde das Tool City Energy Analyst (CEA) verwendet.

Da die energetische Simulation auf Basis des City Energy Analyst mit einem hohen Zeit- und Rechenaufwand verbunden ist, wurde zunächst eine gezielte Auswahl an Tunnelstandorten getroffen. Die Auswahlkriterien umfassten dabei:

- i. die geografische Verteilung – mit dem Ziel, eine möglichst breite regionale Abdeckung innerhalb Österreichs zu erreichen
- ii. die Beschaffenheit der umliegenden Bebauung – hierbei wurde geprüft, ob im Umfeld der Tunnel Gebäude vorhanden sind, ob diese in zusammenhängenden Strukturen - wie Siedlungen - auftreten und in welcher Entfernung diese sich zum Tunnel befinden
- iii. die Besonderheit einzelner Tunnelstandorte – so wurden beispielsweise besonders lange Tunnel oder solche mit spezieller infrastruktureller Bedeutung bevorzugt.

Modell

UBEM (Urban Building Energy Modeling) ist ein Rechentool, das quantitative Analysen für Stadtplanung, -betrieb, -optimierung und Energiepolitik bereitstellt. Dieses Tool simuliert die Leistung eines abgegrenzten Stadtgebiets, das aus verschiedenen Gebäudetypen besteht (Wohn- und Geschäftsgebäude, Rechenzentren, Büros, Krankenhäuser, etc.) und berücksichtigt dabei seine Dynamik und Energieeffizienz. Weiters werden die Auswirkungen zwischen Gebäuden (Beschattung, langwelliger Strahlungswärmeaustausch, Sonnenreflexion) und die städtischen Mikroklimabedingungen (an die Umgebungsluft abgegebene Wärme, städtische Wärmeinseln) miteinbezogen.

Der City Energy Analyst ist eine Open-Source-UBEM-Plattform, die für die Gestaltung kohlenstoffarmer und hocheffizienter Städte entwickelt wurde. Die Software verwendet sieben Datenbanken als Standard- oder Eingabedaten und sechs Berechnungsmodul für die dynamische Simulation. UBEM basiert auf einem physikalischen Ansatz zur Bestimmung des stündlichen Leistungs- und Temperaturbedarfs für Warmwasser, Raumheizung, Strom und Wasser im Gebäude. Es verwendet die Integration dynamischer Methoden des ECN (Europäisches Komitee für Normung,

einschließlich der Norm ISO 13790), SIA (Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein) und anderer. [40]

City Energy Analyst verwendet folgende Datenbanken:

- **Zonengeometrie:** Enthält Daten zur Geometrie und zum Layout der Zonen im Gebäude, wie z. B. Grundfläche, Position der Strukturen, Form und Volumen
- **Zonalalter:** Diese Datenbank enthält Informationen zum Bau- und Sanierungsjahr jedes Gebäudeteils, die zur Schätzung der Auswirkungen von Grauenergie und Emissionen verwendet werden
- **Zonenbelegung:** Diese Datenbank enthält Informationen zu den Belegungs- und Aktivitätsmustern jeder Wohnung im Gebäude, die interne Wärmegewinne und Belüftungsanforderungen erzeugen
- **Zonenversorgung:** Diese Datenbank enthält Informationen zu den Heiz-, Kühl- und Belüftungssystemen, die jede Wohnung im Gebäude versorgen, wie z. B. Gerätetyp, Kapazität und Effizienz
- **Zonenwetter:** Diese Datenbank enthält stündliche Wetterdaten rund um das Gebäude
- **Bezirksgeometrie:** Diese Datenbank enthält Informationen zum Layout und zur Geometrie des umgebenden Stadtbezirks, die die Energieeffizienz des Gebäudes durch Faktoren wie Beschattung und Strahlung beeinflussen können
- **Bezirksgelände:** Diese Datenbank enthält Informationen zum Gelände und zur Topografie des umliegenden Gebiets, die zur Berechnung der von den Gebäuden reflektierten Sonnenstrahlung verwendet werden

In Abbildung 25 sind einige Screenshots des Modells im City Energy Analyst (CEA) dargestellt.

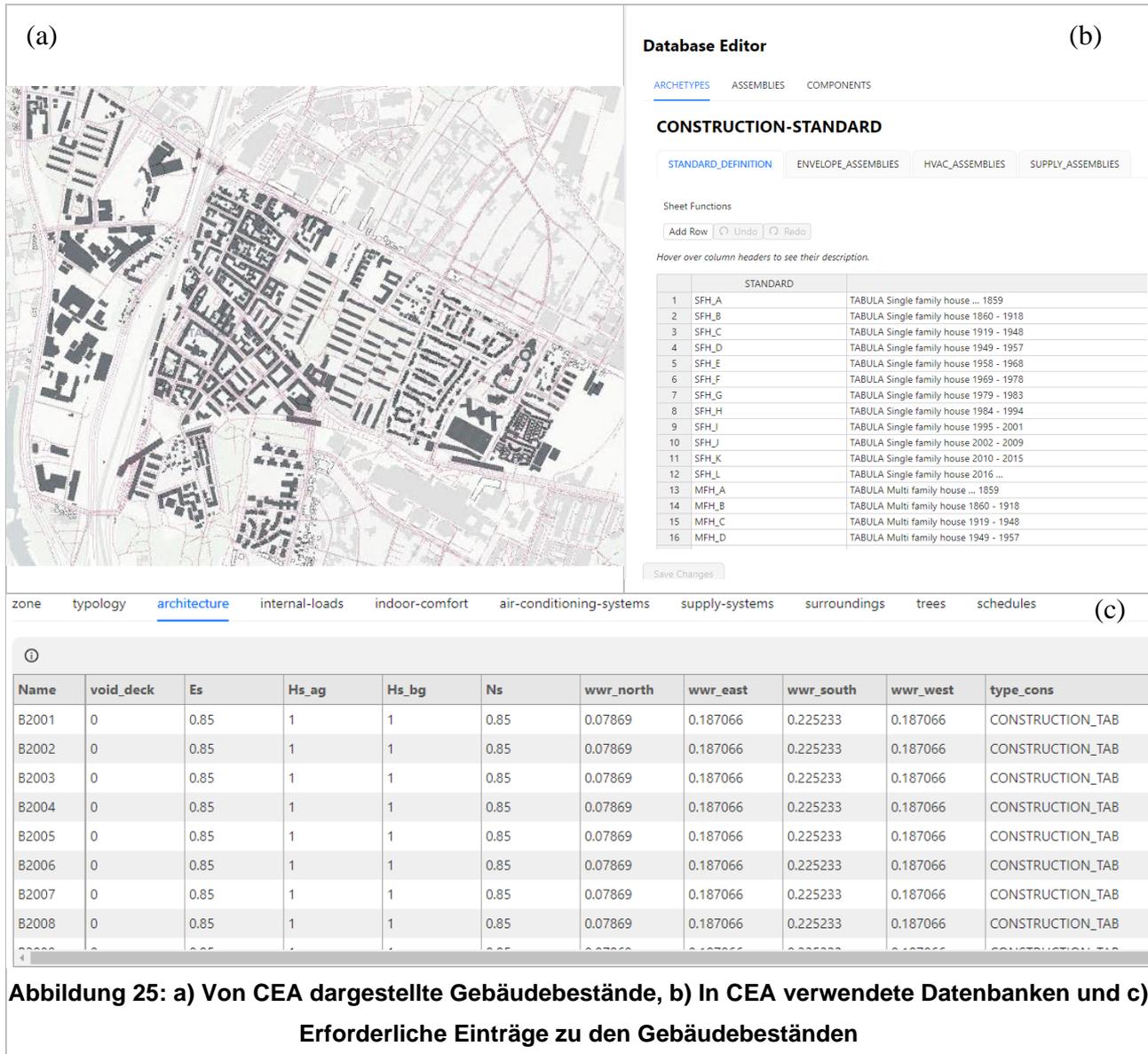


Abbildung 25: a) Von CEA dargestellte Gebäudebestände, b) In CEA verwendete Datenbanken und c) Erforderliche Einträge zu den Gebäudebeständen

4.2 Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung wurden insgesamt 17 Tunnelstandorte in Österreich hinsichtlich ihres energetischen Bedarfs analysiert. Bei der Definition des Untersuchungsgebietes eines jeden Tunnels wurde darauf geachtet, dass ein Umkreis von einem Kilometer rund um den Tunnel eingehalten wird, jedoch wurden Siedlungsstrukturen berücksichtigt, daher kann zu Abweichungen kommen, siehe als Beispiel Abbildung 26.

Die Analyse umfasste die Bewertung von Tunnellänge, Gebäudeanzahl, Raumwärmebedarf (GWh/Jahr), Heizintensität (kWh/m²/Jahr) sowie Strombedarf (GWh/Jahr).



Abbildung 26: Auswahl des Untersuchungsgebietes am Beispiel des Kaiserstuhls Tunnels

In

Tabelle 1: Ergebnisse der Wärmebedarfsanalyse der Untersuchungsgebiete rund um die Tunnel
sind die Ergebnisse ersichtlich.

Tabelle 1: Ergebnisse der Wärmebedarfsanalyse der Untersuchungsgebiete rund um die Tunnel

Tunnel	Standort	Länge [m]	Gebäudeanzahl	Raumwärmebedarf (GWh/Jahr)	Wärmebedarfsintensität (kWh/m²/Jahr)	Elektrizitätsbedarf (GWh/Jahr)
Arlberg	Tirol/Vorarlberg	14125	2444	40,22	49,10	36,25
Flachau	Salzburg	492	380	27,62	135,56	9,68
Mötz-Kirchenriese	Tirol	174	1086	10,28	29,10	15,96
Plabutsch	Steiermark	10085	13877	80,75	18,78	269,65
Semmering	Niederösterreich	3489	530	15,53	128,37	6,30
Rudersdorf	Burgenland	2890	903	25,74	37,70	45,21
Stadlau Rampe 54	Wien	723	2819	32,27	30,56	69,83
Bindermichl	Oberösterreich	1068	4633	51,69	23,50	84,80
Milser	Tirol	1785	826	5,36	34,29	8,97
Hirschstetten Rampe 55	Wien	184	15265	79,07	21,60	360,49
Kaisermühlen	Wien	2124	882	20,49	20,34	114,32
St. Andrä	Kärnten	470	1283	10,81	35,06	15,04
Königsdorf	Burgenland	630	1024	28,76	37,50	49,64
Freinberg (im Bau)	Oberösterreich	3200	8151	89,85	25,60	166,00
Donau Nord (im Bau)	Oberösterreich	565	3251	79,31	69,60	57,99

4.2.1 Kaisermühlentunnel

Abbildung 27 zeigt den Heizenergiebedarf der Gebäude die in der näheren Umgebung (~ 1 km) vom Tunnel Kaisermühlen liegen. Wichtig ist es hier zu beachten, dass einzelne der dunkelroten Gebäude auch einen höheren Heizenergiebedarf haben können als 500 MWh/Jahr, diese wurden mit einer Roten Umrandung markiert. Gebäude in der Umgebung mit besonders hohem Heizenergiebedarf sind etwa der DC-Tower mit ca. 2000 MWh/Jahr (in Abbildung 27 links unten).

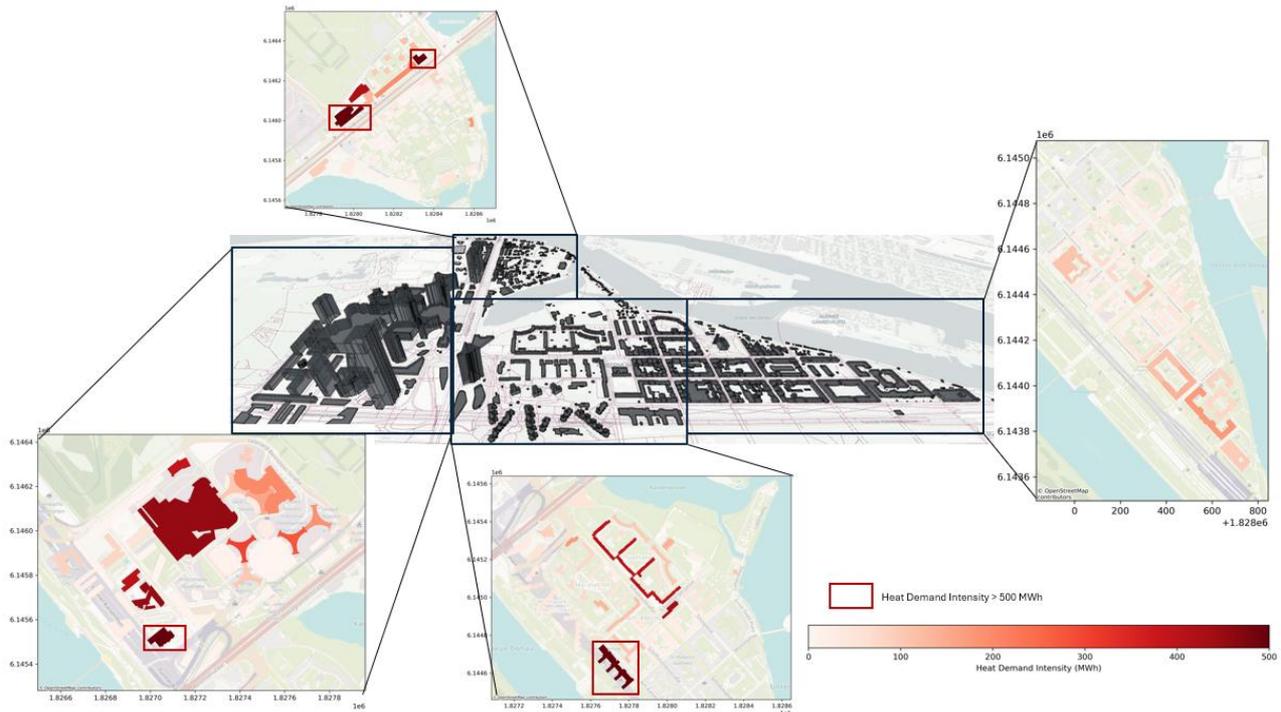


Abbildung 27: Heizenergiebedarf der vom Kaisermühlentunnel umliegenden Gebäude

4.2.2 Plabutschtunnel

Im Umfeld des Plabutschunnels wurden im Umkreis von einem Kilometer rund 1.400 Gebäude identifiziert, deren Heizenergiebedarf analysiert wurde. Dieser beträgt je nach Gebäude zwischen 2 und 500 MWh/Jahr. Abbildung 28 zeigt den Energiebedarf in MWh/Jahr. Angemerkt wird, dass einzelne Gebäude, die als dunkelrot aufscheinen, einen Heizenergiebedarf haben, der höher als 200 MWh ist. Bei einem Großteil dieser Gebäude handelt es sich um Einfamilienhäuser, mit einem Heizenergiebedarf von unter 25 MWh. Die berechneten Werte zeigen, dass damit rechnerisch mehr als 5.000 Vier-Personen-Haushalte mit Raumwärme versorgt werden könnten. Dies unterstreicht die Bedeutung des Tunnels als wichtiger Standort für nachhaltige Wärmeversorgung.

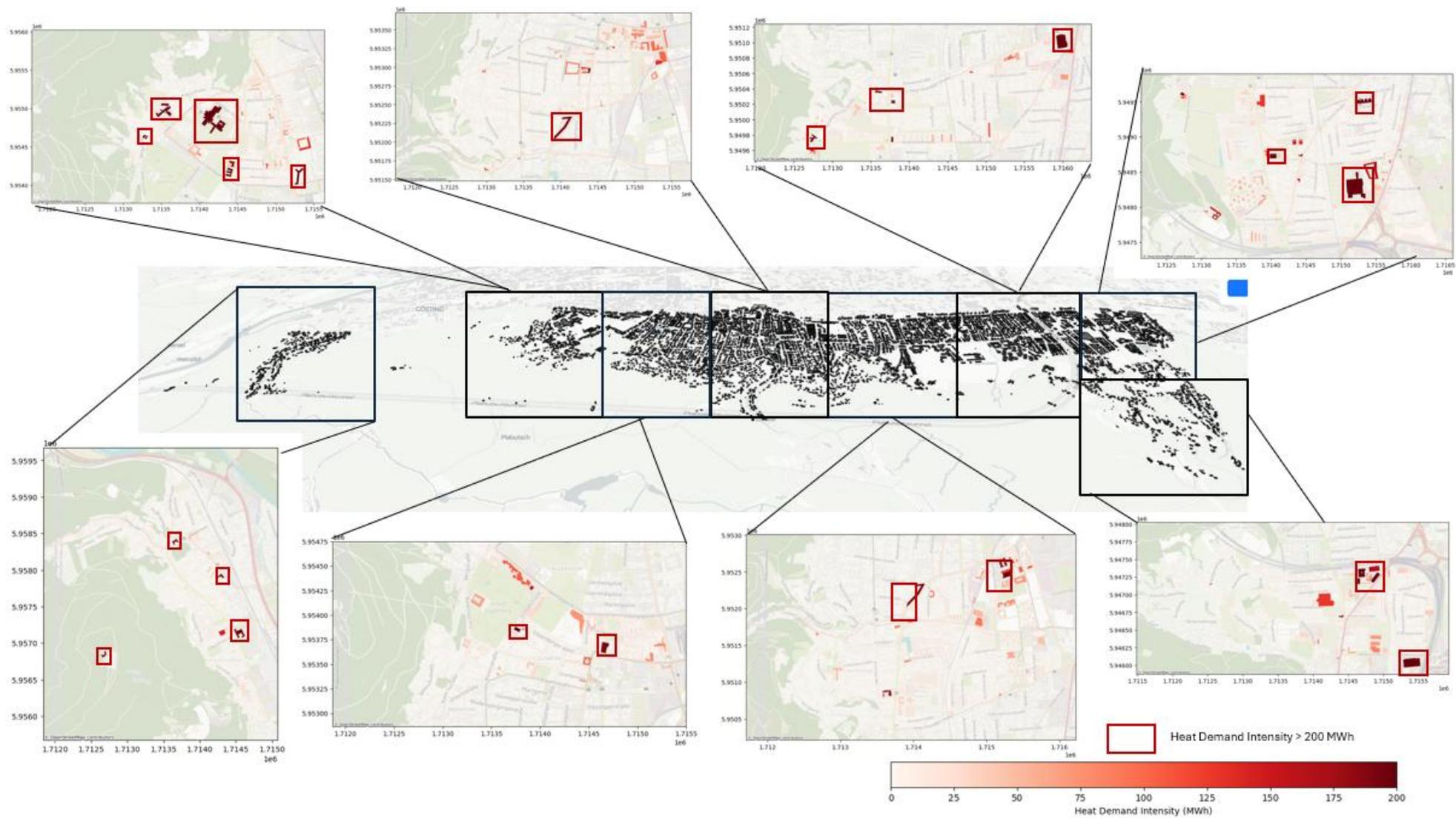


Abbildung 28: Heizenergiebedarf der vom Plabutschtunnel umliegenden Gebäude

4.2.3 Tunnel Freinberg

Der Tunnel Freinberg gehört zur A26 Linzer Autobahn in Oberösterreich, die derzeit im Bau ist. Der Tunnel soll etwa 3,2 Kilometer lang werden und hat eine Gebäudeanzahl von 8000 in einer Umgebung von ca. 1 km. Abbildung 29 zeigt den Heizenergiebedarf in MWh/Jahr, angemerkt wird, dass einzelne Gebäude, die als dunkelrot aufscheinen einen Energiebedarf haben, der höher als 300 MWh ist, wie zum Beispiel die Raiffeisen-Arena.

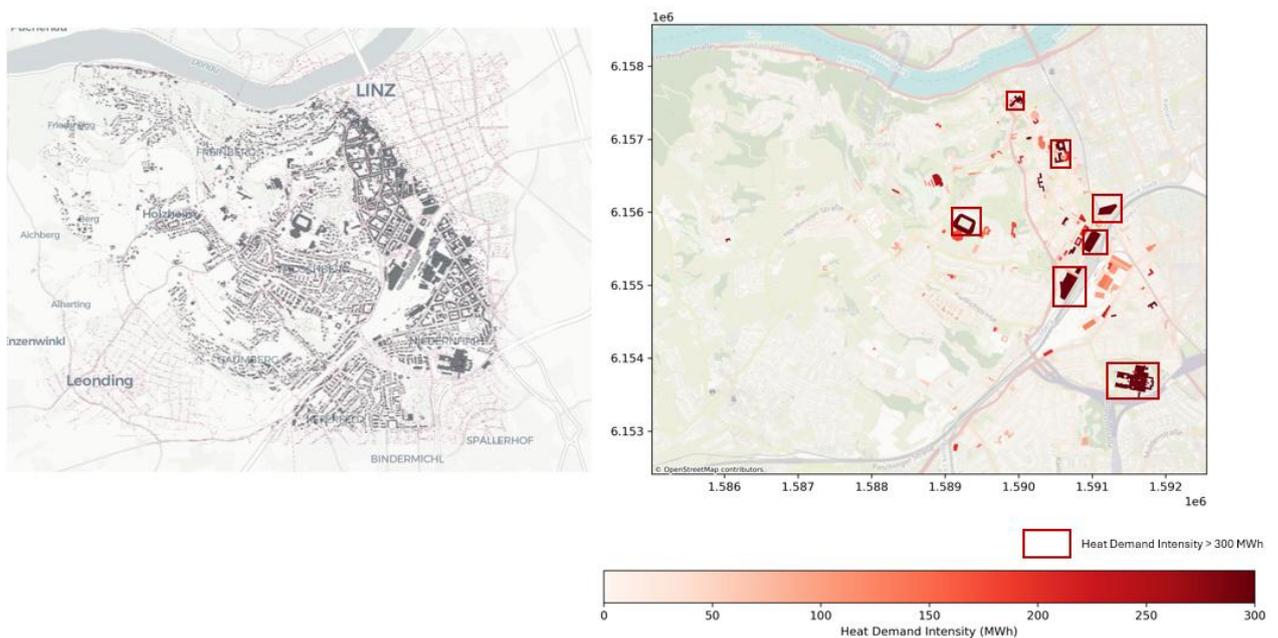


Abbildung 29: Heizenergiebedarf der vom Tunnel Freinberg umliegenden Gebäude (links: in die Berechnung einbezogene Gebäude, rechts: Heizenergiebedarf der Gebäude)

4.3 Errechnete Wärmeprofile

Bei maximaler Auslegung der Wärmeentzugsmöglichkeiten ist es möglich signifikante Teile des Wärmebedarfs der näheren Umgebung abzudecken. Die Profile zeigen aber alle einen klaren Unterschied zwischen den Winter- und Sommermonaten (siehe Abbildung 30). Durch den Einsatz z.B. von Erdsondenfeldern in Niedertemperatur-Wärmenetzen als saisonale Speicher bzw. durch den Einsatz von dezentralen Wärmepumpen, könnten auch Szenarien betrachtet werden, in denen Peaks des Wärmebedarfs durch Pufferung abgefangen werden können. Es ist aber für keinen der betrachteten Fälle mit solchen Maßnahmen sinnvoll möglich, den gesamten Bedarf der umliegenden Siedlungsgebiete mittels Tunnel zu decken.

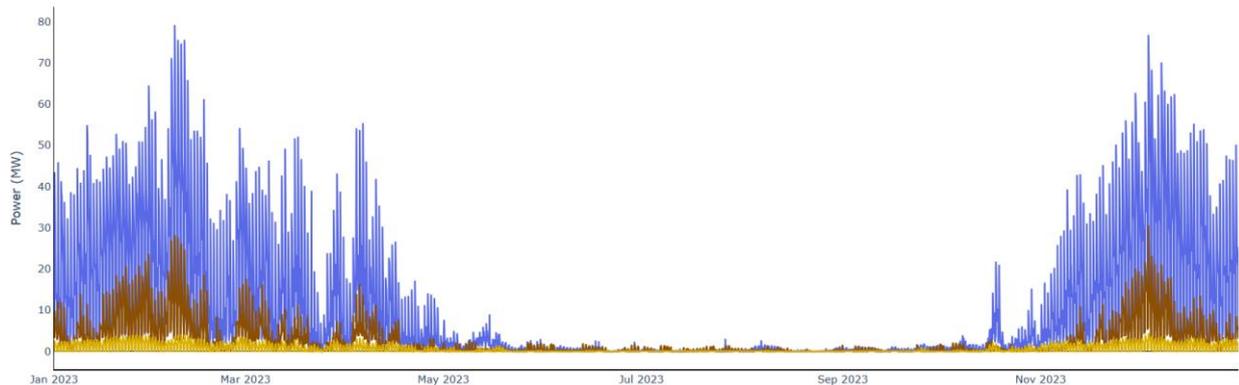


Abbildung 30: Errechnetes Jahreswärmelastprofil für die Siedlungsgebiete im Einzugsbereich des Tunnels Plabutsch (blau), Kaisermühlen (dunkelbraun) und Mils (hellbraun).

In dicht bebauten Gebieten - wie zum Beispiel beim Tunnel Bindermichl – reichen die maximalen Entzugsleistungen im Winter meist nicht aus, um die die Lastminima zu decken. Dies führt allerdings auch zu hohen Volllaststunden der verbauten Wärmepumpen, weil die so gewonnene Wärme sehr häufig direkte Abnehmer finden würde. Es gilt jedoch zu bedenken, dass die betreffenden Tunnel typischerweise vergleichsweise kurz sind und sich aufgrund der Erkenntnisse ohnehin als eher ungeeignet erwiesen haben.

In manchen Anwendungsfällen könnte potenziell eine kleinere Auslegung als die Maximalauslegung gewählt werden, um eine höhere Anzahl an Volllaststunden zu erreichen. Bei den hier untersuchten Tunneln ist dies allerdings nur bei den Tunneln Arlberg und Semmering eine relevante Überlegung. Alle anderen Tunnel haben ausreichend hohe Bedarfsprofile aus ihrer Umgebung, dass auch bei einer Maximalauslegung eine gute Auslastung erreicht wird.

4.4 Wichtigste Erkenntnisse

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass im Umfeld der betrachteten Tunnel ein ausreichend hoher Wärmebedarf vorhanden ist, um die im Tunnel gewinnbare Energie effizient zu nutzen. Insbesondere der Plabutschtunnel bietet in dieser Hinsicht ein großes Potenzial: Durch die Nutzung der dort gewonnenen Energie könnten rechnerisch über 5.000 Vier-Personen-Haushalte mit Raumwärme versorgt werden. Dies verdeutlicht das erhebliche energetische und ökologische Potenzial solcher Infrastrukturen. Die Analyse bekräftigt zudem, dass eine Nutzung auf Niedertemperaturniveau (NT) technisch sinnvoll realisierbar ist, insbesondere in Kombination mit bestehenden oder neu zu entwickelnden Nahwärmenetzen.

Mit wenigen Ausnahmen (z.B. Plabutsch) korrelieren lange Tunnel (d.h. mit hohem Geothermiepotenzial) geographisch nicht mit dicht besiedelten Gebieten (mit hohem Wärmebedarf). Dort wo diese Umstände zusammenfallen, ist eine Umsetzung aber besonders sinnvoll.

Tunnelgebäude können in der Region potenziell zum wesentlichen Player bei der Wärmeversorgung werden, eine mögliche Umsetzung kann daher nur in enger Abstimmung mit dem Wärmenetzbetreiber bzw. lokalem Energieversorger erfolgen.

5. ELEKTRIZITÄTS- UND FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL

5.1 Methodik

Im Folgenden soll der elektrische Teil der Wärmeengewinnung aus den untersuchten Tunnels betrachtet werden. Hierfür wurden die Wärmebedarfsprofile der umliegenden Siedlungsgebiete, welche in Kapitel 4.3. näher beschrieben werden, als Basis verwendet. Die Analyse umfasst weiters eine generelle Betrachtung zum Einsatz von Photovoltaik (PV), gegebenenfalls in Kombination mit Batteriespeichersystemen (BEES), auch unabhängig vom Einsatz von Wärmepumpen. Zusätzlich zum Energiebedarf der Tunnel wird der Strombedarf der installierbaren Wärmepumpen sowie des Flexibilitätspotenzials zur Vermeidung von Netzgrenzwertüberschreitungen und zur Spitzenlastverschiebung untersucht. Um diese Analysen durchzuführen, wurde eine Gesamtsimulation mithilfe des am AIT entwickelten TESCA Frameworks [42] aufgesetzt.

TESCA ist ein Framework für techno-ökonomische Analysen, welches auf physikalischen Modellen der einzelnen involvierten Komponenten basiert und diese in einer Simulation zusammenführt. Die Simulationen sind dabei Profil-basiert, das heißt, dass das Zusammenspiel der Erzeugungs- und Bedarfsprofile in Kombination mit möglichen Energieumwandlungen und Speicherkomponenten in jedem Zeitschritt detailliert erfasst wird. Dies ermöglicht eine viel detaillierte Auflösung der benötigten Komponenten und Speichergößen, da detailliert auf Gleichzeitigkeit in den Profilen und auf weitere physikalische Rahmenbedingungen eingegangen wird.

In der Simulation wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Analysen (Wärmebedarfsprofile, Tunneltemperaturen, maximale Entzugsleistungen, PV-Profile etc.) zu einer Gesamtsimulation zusammengeführt, um das Systemverhalten abzubilden. Um die freien Kapazitäten der umliegenden Anschlusspunkte bestimmen zu können, mussten zuerst auch die nächstgelegenen Umspannwerke identifiziert werden.

5.1.1 Bestimmung der nächstgelegenen Mittelspannungs-Umspannwerke

Die Koordinaten relevanter Tunnel dienen der Erhebung der nächstgelegenen Mittelspannungs-Umspannwerke sowie deren verfügbare/freie Kapazitäten (siehe Tabelle 2 und am Beispiel Arlbergtunnel in Tabelle 3). Diese freien Kapazitäten wurden durch die Verwendung der verfügbaren Daten zu Netzanschlusskapazitäten über die Plattform ebUtilities [41] bestimmt.

Tabelle 2: Umspannwerke in der Nähe der betrachteten Tunnel

Tunnel	Umspannwerk 1	Umspannwerk 2	Umspannwerk 3	Umspannwerk 4
Arlberg	UW St.Jakob a.A.	UW Rauz	UW Tobadill	UW Landeck
Flachau	UW Reitdorf	UW Flachauwinkl	UW ARTHURWERK	UW Pongau
Mätz-Kirchenriese	UW Ötztal	UW Habichen	UW Imst	UW Biberwier
Plabutsch	UW West	UW Nord	UW Graz Nord	UW Keplerbrücke
Semmering	UW Hart	UW Mürzzuschlag	UW Schoeller	UW Ternitz
Rudersdorf	UW Hart	UW Mürzzuschlag	UW Schoeller	UW Ternitz
Stadlau Rampe 54	UW Fürstenfeld	UW Eltendorf	UW Jennersdorf	UW Stegersbach
BinderMichl	UW Gaumberg	UW Wienerstrasse	UW Zentrum	UW Linz City
Mils	UW Imst	UW Landeck	UW Prutz	UW Ötztal
Hirschstetten Rampe 55	UW KAGRAN	UW STADLAU 10KV	UW STADLAU 20KV	UW HANDELSKAI
Kaisermühlen	UW MESSE	UW LEOPOLDSTADT	UW HANDELSKAI	UW KAGRAN
Freinberg	UW Linz Nordwest	UW Zentrum	UW Linz City	UW Gaumberg

Tabelle 3: Umspannwerke nahe des Arlbergtunnels und ihre Kapazitäten

Tunnel	Umspannwerk	Netzbetreiber	Gebuchte Kapazität in MVA	Verfügbare Kapazität in MVA	Koordinaten	Verfügbare Kapazität in %
Arlberg	UW St.Jakob a.A.	TINETZ - Tiroler Netze GmbH	0	16	(10.312476873 47.144872947)	100
	UW Rauz	Vorarlberger Energienetze GmbH	1.02	21.73	(10.17921888 47.13797506)	95.52
	UW Tobadill	TINETZ - Tiroler Netze GmbH	8	17	(10.498657863 47.118885877)	68

	UW Landeck	TINETZ - Tiroler Netze GmbH	2	6	(10.564081534 47.142856682)	75
--	------------	-----------------------------	---	---	--------------------------------	----

5.1.2 Abschätzung des Potenzials zur Installation von Wärmepumpen

Das maximale stromseitige Potenzial für die Installation von Wärmepumpen konnte über die freien Kapazitäten jedes Umspannwerks abgeschätzt werden. Für verschiedene Wirkleistungsfaktoren (WLF) der Wärmepumpen gibt Tabelle 4 diese an.

Tabelle 4: Freie elektrische Kapazität für Wärmepumpen (links: Tunnel Kaisermühlen, rechts: Tunnel Semmering) in den vier Umspannwerken

Kaisermühlen			Semmering		
Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (1,0) in MW	Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (0,95) in MW	Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (0,9) in MW	Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (1,0) in MW	Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (0,95) in MW	Freie Kapazität für Wärmepumpen WLF (0,9) in MW
36,2	34,4	32,6	36,2	34,4	32,6
78,0	74,1	70,2	78,0	74,1	70,2
78,4	74,5	70,6	78,4	74,5	70,6
18,6	17,7	16,7	18,6	17,7	16,7

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Einsatz von PV und Speicherbatterie jenseits von Wärmeanwendungen

Für die folgenden Analysen wurde für jeden der Tunnel angenommen, dass sich eine mögliche PV-Anlage jeweils zur Hälfte im Bereich der beiden Portale befindet und dort für den Jahresertrag optimiert wurde. Die jeweiligen Profile wurden mit PV-GIS [43] erstellt. Um ein Beispiel zu nennen: Eine hypothetische 400 kWp PV-Anlage für den Tunnel Plabutsch würde aus 200 kWp am Nordportal und 200 kWp am Südportal bestehen.

Die Analyse zeigt, dass der Einsatz von PV durchaus geeignet ist eine gewisse Eigenbedarfsdeckung des Tunnels zu erzielen. Gerade für den Anwendungsfall Tunnel ist aber die maximale Größe der PV-Anlage relativ begrenzt, da sich diese sinnvollerweise auf den Bereich der beiden Portale begrenzen müsste, um eine komplizierte Leitungsherstellung und lange Leitungen zu vermeiden. Gerade für Tunnel mit hohem Verbrauch kann die PV-Anlage tendenziell nur unterdimensioniert werden. Als grober Richtwert kann angenommen

werden, dass für eine 1000 kWp = 1 MWp Anlage ca. 1 Hektar Fläche zur Verfügung stehen müsste. In der vorliegenden Studie wurden daher PV-Größen von 0, 200, 400, 600, 800 und 1000 kWp betrachtet. Einspeisung von möglichen PV-Überproduktionen ins Netz waren nicht erlaubt.

Zusätzliche Batteriespeicher sind technisch dann sinnvoll, wenn die PV-Anlage im Vergleich zum Verbrauch überdimensioniert ist, und somit eine Überproduktion für einen späteren Zeitpunkt mit unzureichender PV-Produktion eingespeichert werden kann. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung hängt dabei im Wesentlichen vom jeweiligen Stromtarif ab und müsste im Bedarfsfall in einer gesonderten Analyse betrachtet werden. Generell gilt: je günstiger der Stromtarif, desto länger die Amortisationszeiten eines solchen Speichers. Betrachtet wurden Batteriegrößen von 250 kWh (AC/DC Converter 250 kW), 500 kWh (AC/DC Converter 500 kW), 750 kWh (AC/DC Converter 750 kW) und 1 MWh (AC/DC Converter 1 MW), also eine typische Batterie zu Converter Verhältnis, sogenannte „1 h Speicher“.

Für die nachfolgenden Analysen wurde das AIT-interne TESCA-Framework eingesetzt, welches sich auf physikalisch modellierte Komponentenmodelle (für z.B. Batterie, Konverter, Wärmepumpe, etc.) stützt und die Energieflüsse in jeden Zeitschritt der Simulation (15 min Abstand) berechnet.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen am Beispiel des Tunnels Arlberg den typischen Unterschied zwischen Sommer und Winter. Die PV-Anlage ist in diesem Beispiel mit 600 kWp angenommen, kein Batteriespeicher (BEES) vorhanden. Netto-Zuflüsse ins System (PV bzw. Netz) sind negativ aufgetragen, Verbrauch positiv. Die PV-Anlage dürfte für den hier gezeigten Use Case durchaus deutlich größer dimensioniert sein, da die PV-Anlage es in Abbildung 31 unten an drei Tagen gerade schafft kurzzeitig den Netzbezug auf null zu senken. Dies ist im Wesentlichen aber einem an diesen Zeitpunkten eher niedrigen Verbrauchsprofil geschuldet. Mangels Überschusses ist der Einsatz eines Batteriespeichers für einen solchen Anwendungsfall zwecklos.

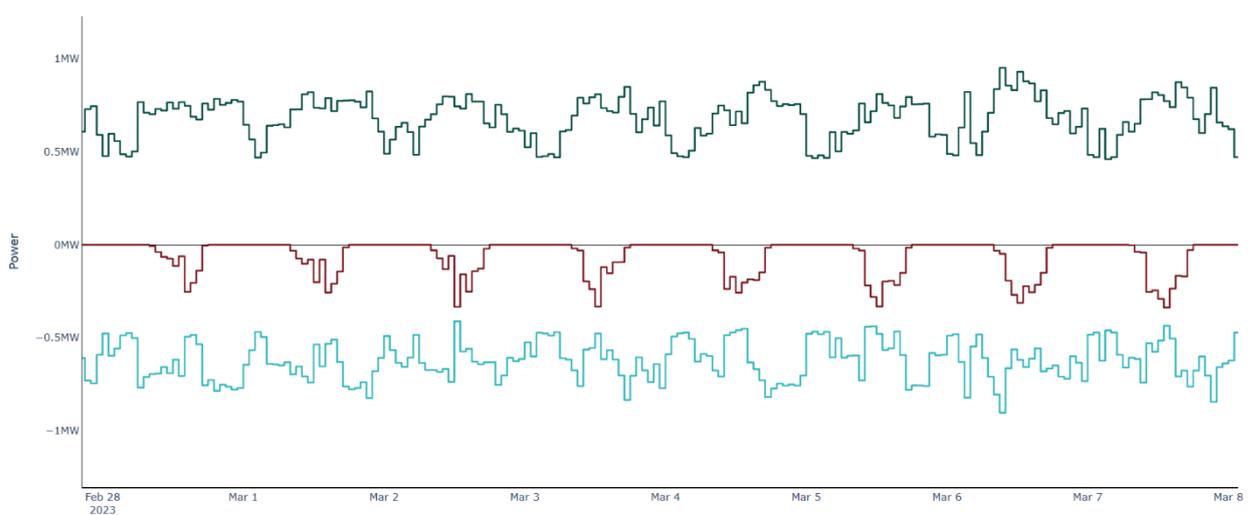


Abbildung 31: Tunnel Arlberg Winter (1. Märzwoche): Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis). PV-Anlage 600 kWp ohne Batteriespeicher

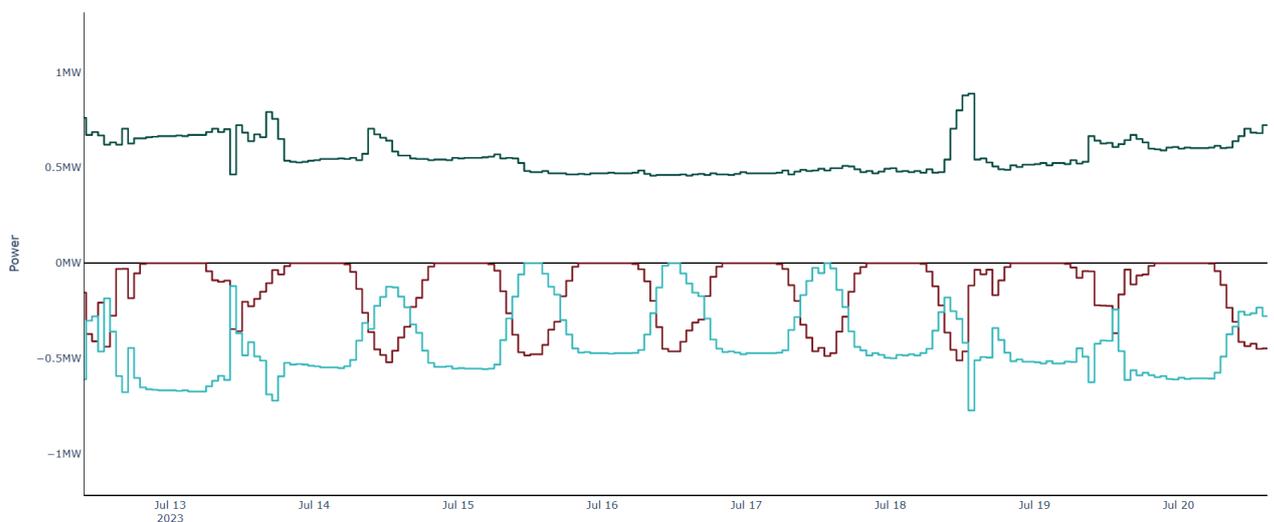


Abbildung 32: Tunnel Arlberg Sommer (Mitte Juli). Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis). PV-Anlage 600 kWp ohne Batteriespeicher

Einen vergleichsweise geringen Verbrauch hat z.B. der Tunnel Bindermichl (da dieser auch deutlich kürzer ist). Abbildung 32 ist ersichtlich, dass eine mögliche 800 kWp-Anlage deutlich höhere Produktionsspitzen aufweist als der typische Tunnelverbrauch, was zu einem regelmäßigen Einsatz einer (in diesem Beispiel 750 kWh) Batterie auf viele Einsatzzyklen kommt. Auch klar zu sehen ist die Alterung der Batterie (welche im Framework mitberechnet wird), da die maximal mögliche Einspeicherung konstant abnimmt. Ein solches Setup schafft es sehr oft den Netzbezug auf null zu senken, wie in Abbildung 33 zu sehen.

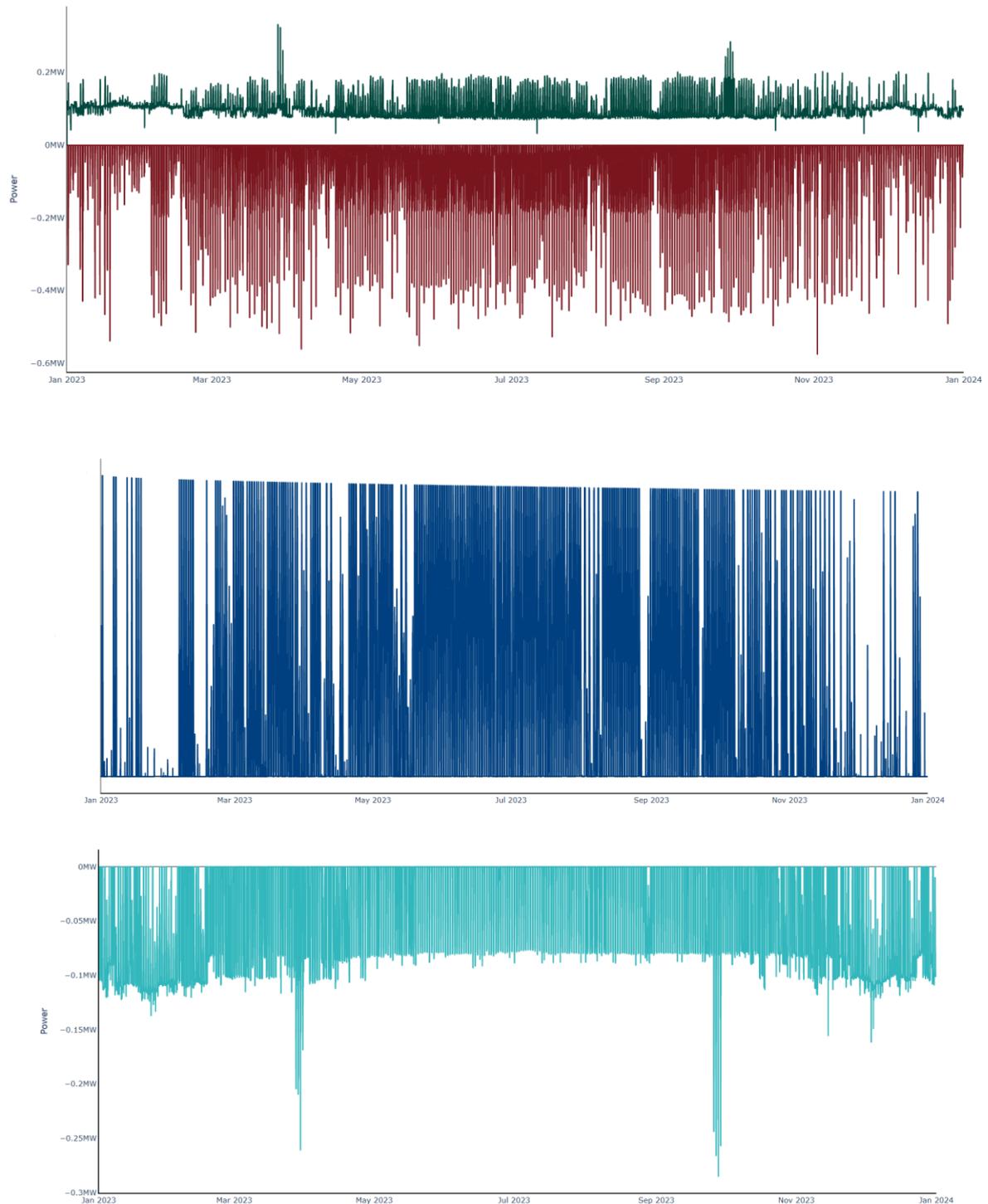


Abbildung 33: Ganzjahresprofil des Tunnels BinderMichl bei Einsatz einer 800 kWp PV-Anlage und einer 750 kWh Batterie. Tunnelverbrauch. Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis). Ebenfalls in der Mitte (blau) ist der aktuelle Ladungszustand der Batterie aufgetragen, es ist klar ersichtlich, dass die Batterie in diesem Fall gut genutzt wird

Die Darstellung in Abbildung 34 zeigt, dass je nach Einsatz unterschiedlicher Kombinationen von PV und BESS für den Anwendungsfall Tunnel Bindermichl der Gesamtnetzbezug auf ein Drittel gesenkt werden könnte. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung bedarf aber wie bereits oben erwähnt einer gesonderten Betrachtung.



Abbildung 34: Jährlicher Netzbezug (MWh) für verschiedene Größenkombinationen von PV und BESS für den Tunnel Bindermichl. Theoretisch kann der Netzbezug von ca. 900 MWh (dunkelgrün) durch Einsatz einer 1 MWp PV und 1 MWh BESS auf rund 300 MWh (hellgrün, oben rechts) gesenkt werden.

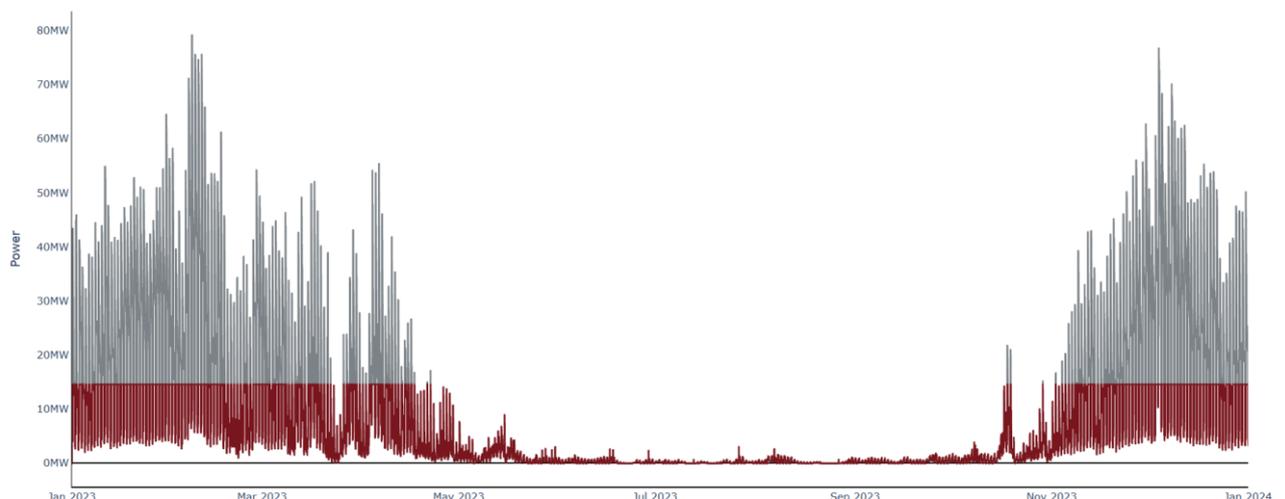
Zusammenfassend zeigt sich, dass der Einsatz einer PV-Anlage, wenn möglich, durchgehend für alle Tunnel sinnvoll erscheint, da das Verbrauchsprofil relativ konstant ist und somit sehr viel des erzeugten Stroms tatsächlich direkt im Tunnel verbraucht werden kann. Für die Tunnel Arlberg, Freinberg, Kaisermühlen, Plabutsch, Rudersdorf und St. Andrä zeigte sich nur äußerst schwaches bis kein Einsatzpotential für zusätzlichen BESS. Für die anderen Tunnel ist das Einsatzpotenzial theoretisch vorhanden, die jeweiligen Fälle müssten aber einer gesonderten Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen werden.

5.2.2 Elektrische Analyse der Wärmeanwendung

Die Wärmebedarfsprofile und die durchschnittliche zu erwartende Erdreich-/Gesteinstemperatur im Tunnel wurden Kapitel 4 ermittelt. In den folgenden Simulationen wurden nun potenzielle Wärmepumpen so ausgelegt, dass die Temperatur von dem Tunnelniveau auf eine Vorlauftemperatur von maximal 55 °C gehoben wird. In modernen Gebäuden mit Flächen-Wärmeabgabesystemen (z.B. Fußbodenheizung), aber auch in Bestandgebäuden mit Radiatoren hat sich in zahlreichen Studien und Projekten gezeigt, dass eine Vorlauftemperatur von maximal 55 °C (bei Flächensystemen 35 °C) vollkommen für die Raumwärme ausreicht.

Daraus lässt sich der jeweilige Wirkungsgrad der Wärmepumpe bestimmen und somit der elektrische Verbrauch bei gegebenem thermischem Bedarf. Es zeigt sich unmittelbar, dass bei einer Auslegung, die darauf abzielt, die vollen Wärmepotenziale der Tunnel zu nutzen, die benötigten Wärmepumpenleistungen um ein Vielfaches höher sind als die elektrischen Verbrauchsprofile der Tunnel. Dies hat zur Folge, dass untersucht werden muss, ob die Anschlussleistungen im Netz für diese Anwendungen garantiert werden können. Eine mögliche PV-Anlage wäre jedenfalls immer deutlich unterdimensioniert, um den Use Case wesentlich zu beeinflussen (siehe Abbildung 35). Die Aussagen zur grundsätzlichen Sinnhaftigkeit des Einsatzes von PV (siehe oben) bleiben davon aber unberührt, da natürlich trotzdem positive Effekte damit erzielt werden.

Dies ist in Abbildung 35 (oben) am Beispiel des Tunnels Plabutsch zu sehen. Bis zur maximalen Entzugsleistung von knapp 40 MW kann das Wärmebedarfsprofil (grau) durch die Wärmepumpen (rot) gedeckt werden. Abbildung 35 (unten) zeigt die Stromseite: Die blaue Kurve repräsentiert die Wärmepumpenleistung, dazu im Kontrast ist die gelbe Kurve, der Grundverbrauch des Tunnels. Es ist klar ersichtlich, dass der elektrische Bedarf der Wärmepumpe(n) signifikant höher liegt. Die violette Kurve zeigt der Einsatz einer 800 kWp PV-Anlage, die in derselben Größenordnung wie der Tunnelgrundbedarf (gelb) liegt. Der Gesamtnetzbezug (grün) wird somit nur unwesentlich von der PV-Anlage beeinflusst.



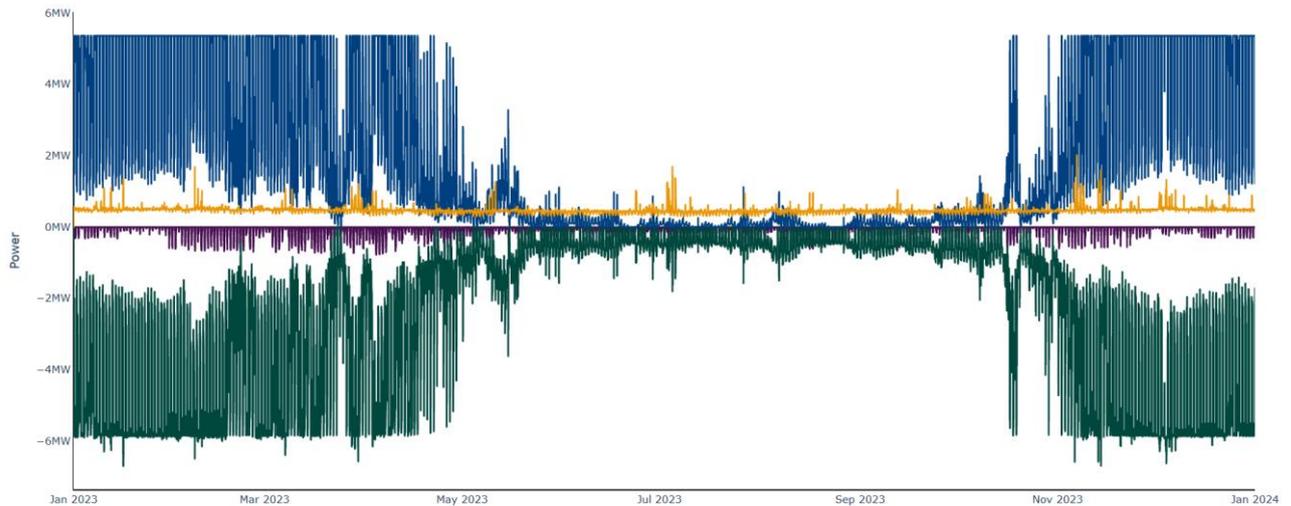


Abbildung 35: Gesamtjahresbetrachtung des Tunnels Plabutsch. Wärmebedarfsprofil (grau) und Wärmepumpenprofil (rot). Stromseitig abgebildet sind der elektrische Bedarf der Wärmepumpen (blau), Tunnel Grundbedarf (gelb), PV-Ertrag einer 800 kWp-Anlage (violett) und Netzbezug (grün). Trotz der eigentlich relativ groß dimensionierten PV-Anlage ist der Einfluss einer solchen auf das Gesamtszenario sehr gering, da der Bedarf der Wärmepumpen um ein Vielfaches höher liegt.

Aufgrund des hohen Verbrauchs der Wärmepumpen, stellt sich die Frage, ob die umliegenden Umspannwerke freie Kapazitäten haben, um solche Systeme versorgen zu können. Eine diesbezügliche Analyse zeigt, dass dies aber für fast alle Tunnel möglich ist. Einzige klare Ausnahme ist der Tunnel Flachau, für den keine freien Kapazitäten vorhanden wären. Es wurden die freien Kapazitäten von vier benachbarten Umspannwerken pro Tunnel für drei Wirkleistungsgrade untersucht. Die entscheidenden beiden Parameter sind dabei jenes Umspannwerk mit der maximalen Kapazität bei Wirkleistungsfaktor 1,0 (max_freie Kapazität) und jenes Umspannwerk mit der kleinsten freien Kapazität bei Wirkleistungsfaktor 0,9 (min_freie Kapazität). Die Ergebnisse sind Abbildung 36 dargestellt.

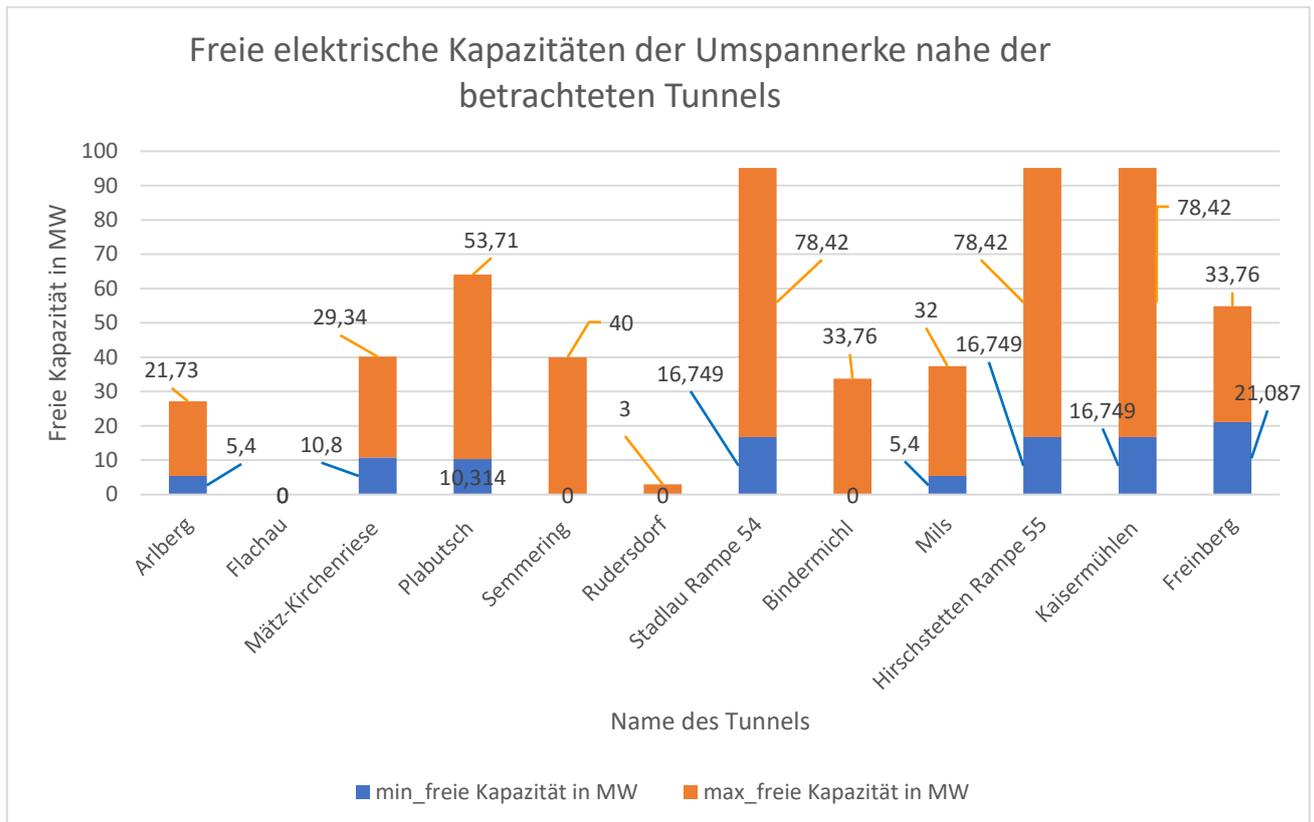


Abbildung 36: Minimale und maximale freie Netzkapazitäten von benachbarten Umspannwerken jeder Tunnel

5.2.3 Wärmepumpe als Flexibilität am Strommarkt

Wie bereits in Kapitel 4.3 diskutiert, sind manche Tunnel bei Maximalauslegung potenziell ein wichtiger Player bei der Wärmeversorgung der Umgebung. Für eine Flexibilitätsbetrachtung kann dies nicht außer Acht gelassen werden. Mögliche Flexibilitätsmargen müssen also dabei immer mitbedenken, was ein potenzielles Nahwärmenetz noch im Stande ist, abzapfern.

Aus dieser Studie lässt sich aber ein sehr realistisches Einsatzszenario für Flexibilisierung ableiten, bedenkt man, dass der Tunnel nicht notwendigerweise konstant auf maximaler Entzugsleistung gefahren werden muss. Betreibt man das System konstant etwas unter der maximalen Entzugsleistung, so kann die Differenz zur maximalen Leistung jederzeit als Flexibilität angeboten werden, ebenso in die Gegenrichtung durch Reduktion der Wärmepumpenleistung. Dies setzt voraus, dass ein Nahwärmenetz die dadurch entstehenden Schwankungen abpuffern kann, was auch individuell die Grenzen dieser Vorgehensweise für jeden Fall individuell anders setzen würde.

Dieses Konzept lässt sich aber für alle Teilausbaustufen der in Kapitel 2.2 vorgeschlagenen Ausbaustufen realisieren und ist somit sehr flexibel einsetzbar. Die möglichen Erlöse eines solchen Einsatzszenarios setzen sich zusammen aus einem gewissen Grundertrag durch den Wärmeverkauf und weiteren Erträgen am Flexibilitätsmarkt. Es gilt allerdings zu bedenken, dass dieses Konzept nur in den Monaten zwischen Oktober-März überhaupt möglich ist, da nur hier der Wärmebedarf vorhanden ist. In den Sommermonaten besteht kein Flexibilitätspotential.

Die genaue Dimensionierung hängt aber auch hier stark von Anwendungsgebiet zu Anwendungsgebiet ab und müsste für jeden Tunnel einzeln betrachtet werden. Nicht zu vernachlässigen sind dabei mögliche vertragliche Verpflichtungen zur konstanten Wärmebereitstellung, insbesondere dann, wenn der Tunnel zu einem wesentlichen Bestandteil des Wärmeversorgungskonzepts der Region ist, was den Einsatz am Flexibilitätsmarkt potenziell erschweren könnte.

5.3 Wichtigste Erkenntnisse

Der Einsatz von PV-Anlagen ist prinzipiell sinnvoll, auch völlig ohne jegliche Überlegungen der Wärmegewinnung. Die Möglichkeit PV am Tunnel zu installieren, ist üblicherweise auf die Portalbereiche und deren nähere Umgebung beschränkt, was dazu führt, dass der PV-Ertrag eher in der Größenordnung des Tunneleigenverbrauchs liegt. Auch eine mögliche Verschattung im gebirgigen Gelände muss berücksichtigt werden und bedarf einer Detailplanung von Tunnel zu Tunnel.

Bei Tunneln mit niedrigem Eigenbedarf (und daher potenziellen PV-Überschüssen) kann ein Batteriespeicher zur Eigenbedarfsoptimierung angedacht werden. Aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten des Batteriespeichers bedarf es aber auch hier für jeden Tunnel eine Detailanalyse zur Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung.

Der Einfluss von PV auf den Einsatz von Wärmepumpen im Tunnel ist vernachlässigbar, da der elektrische Verbrauch der Wärmepumpen viel höher als mögliche PV-Erträge ist und - wie bereits zuvor geschildert - die PV-Erträge Großteiles bereits vom Tunneleigenbedarf aufgebraucht werden.

Auch der Einsatz als mögliche Flexibilität am Strommarkt ist auf die Wintermonate (Oktober - März) beschränkt. Dies bedarf einer Abstimmung mit dem Wärmenetzbetreiber aufgrund der potenziell bedeutenden Rolle im Wärmenetz.

6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Geografische Übersicht der näher untersuchten Tunnel	9
Abbildung 2: Tunnel St. Andrä.....	10
Abbildung 3: Tunnel Mötz-Kirchenriese.....	11
Abbildung 4: Tunnel Mils	12
Abbildung 5: Tunnel Kaisermühlen.....	13
Abbildung 6: Tunnel Hirschstetten.....	14
Abbildung 7: Tunnel Stadlau und Stadlau Rampe 54	15
Abbildung 8: Tunnel Flachau.....	16
Abbildung 9: Tunnel Freinberg und AST Donau Nord	17
Abbildung 10: Tunnel Bindermichl.....	18
Abbildung 11: Tunnel Plabutsch.....	19
Abbildung 12: Tunnel Arlberg	20
Abbildung 13: Tunnel Wöll, Rothenthurm, St. Peter	21
Abbildung 14: Semmeringtunnel	22
Abbildung 15: Tunnel Königsdorf	23
Abbildung 16: Tunnel Rudersdorf.....	24
Abbildung 17: Systemübersicht verfügbarer Energie-Geostrukturen a.....	27
Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Energiegewinnung bei Energietunneln	28
Abbildung 19: Organigramm zur Tunnelkategorisierung und Zuordnung möglicher Energie-Geostrukturen in Abhängigkeit von der Tunnelbauweise.	30
Abbildung 20: Flussdiagramm zur Abschätzung der Wärmeentzugsleistung bei Tunnelthermieranlagen.	33
Abbildung 21: Abgeschätzte relative Wärmeentzugsleistung je Meter Tunnel für die untersuchten Tunnelobjekte.....	35
Abbildung 22: Abgeschätzte absolute Wärmeentzugsleistung für die untersuchten Tunnelobjekte, aufgeschlüsselt nach jeweils betrachteter Energie-Geostruktur.	36
Abbildung 23: Abgeschätzte jährliche Wärmeentzugsarbeit für die untersuchten Tunnelobjekte, aufgeschlüsselt nach jeweils betrachteter Energie-Geostruktur.	36

Abbildung 24: Vergleich der berechneten absoluten jährlichen Wärmeentzugsarbeit der untersuchten Tunnel (unterteilt nach Energie-Geostruktur) mit dem durchschnittlichen Heizenergiebedarf einer 4-Personen-Wohnung (ca. 13 MWh/Jahr).	37
Abbildung 25: a) Von CEA dargestellte Gebäudebestände, b) In CEA verwendete Datenbanken und c) Erforderliche Einträge zu den Gebäudebeständen	42
Abbildung 26: Auswahl des Untersuchungsgebietes am Beispiel des Kaisermühlen Tunnels	43
Abbildung 27: Heizenergiebedarf der vom Kaisermühlentunnel umliegenden Gebäude	45
Abbildung 28: Heizenergiebedarf der vom Plabutschtunnel umliegenden Gebäude	46
Abbildung 29: Heizenergiebedarf der vom Tunnel Freinberg umliegenden Gebäude (links: in die Berechnung einbezogene Gebäude, rechts: Heizenergiebedarf der Gebäude)	47
Abbildung 30: Errechnetes Jahreswärmelastprofil für die Siedlungsgebiete im Einzugsbereich des Tunnels Plabutsch (blau), Kaisermühlen (dunkelbraun) und Mils (hellbraun).	48
Abbildung 31: Tunnel Arlberg Winter (1. Märzwoche): Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis). PV-Anlage 600 kWp ohne Batteriespeicher	54
Abbildung 32: Tunnel Arlberg Sommer (Mitte Juli). Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis). PV-Anlage 600 kWp ohne Batteriespeicher	54
Abbildung 33: Ganzjahresprofil des Tunnels Bindermichl bei Einsatz einer 800 kWp PV-Anlage und einer 750 kWh Batterie. Tunnelverbrauch. Elektrischer Verbrauch (oben, grün), PV-Ertrag (entspricht negativem Bezug – Mitte rot) und resultierender Netzbezug (unten türkis).	55
Abbildung 34: Jährlicher Netzbezug (MWh) für verschiedene Größenkombinationen von PV und BESS für den Tunnel Bindermichl.	57
Abbildung 35: Gesamtjahresbetrachtung des Tunnels Plabutsch. Wärmebedarfsprofil (grau) und Wärmepumpenprofil (rot). Stromseitig abgebildet sind der elektrische	

Bedarf der Wärmepumpen (blau), Tunnel Grundbedarf (gelb), PV-Ertrag einer 800 kWp-Anlage (violett) und Netzbezug (grün).	59
Abbildung 36: Minimale und maximale freie Netzkapazitäten von benachbarten Umspannwerken jeder Tunnel	60

7. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ergebnisse der Wärmebedarfsanalyse der Untersuchungsgebiete rund um die Tunnel	44
Tabelle 2: Umspannwerke in der Nähe der betrachteten Tunnel	51
Tabelle 3: Umspannwerke nahe des Arlbergtunnels und ihre Kapazitäten	51
Tabelle 4: Freie elektrische Kapazität für Wärmepumpen (links: Tunnel Kaisermühlen, rechts: Tunnel Semmering)	52

8. LITERATUR

- [1] *Adam, D.; Markiewicz, R.:* Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *In: Géotechnique*, Vol. 59 (2009), Iss. 3, pp. 229-236.
- [2] *Barla, M.; Di Donna, A.:* Energy tunnels: concept and design aspects. *In: Underground Space*, Vol. 3 (2018), Iss. 4, pp. 268-276.
- [3] *Barla, M.; Di Donna, A.; Insana, A.:* A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 87 (2019), pp. 1-14.
- [4] *Barla, M.; Di Donna, A.; Perino, A.:* Application of energy tunnels to an urban environment. *In: Geothermics*, Vol. 61 (2016), pp. 104-113.
- [5] *Barla, M.; Di Donna, A.; Santi, A.:* Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling. *In: Renewable Energy*, Vol. 147 (2020), pp. 2654-2663.
- [6] *Barla, M.; Insana, A.:* Energy tunnels as an opportunity for sustainable development of urban areas. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 132 (2023), 104902.
- [7] *Bourne-Webb, P.J.; Bodas Freitas, T.M.; Da Costa Gonçalves, R.A.:* Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers. *In: Energy and Buildings*, Vol. 125 (2016), pp. 130-141.

- [8] *Brandl, H.*: Energy foundations and other thermo-active ground structures. *In: Géotechnique*, Vol. 56 (2006), Iss. 2, pp. 81-122.
- [9] *Brunner, A.; Markiewicz, R.; Pistor, J. et al.*: Energiefundierungen - Langzeiterfahrungen und aktuelle Entwicklungen. *In: Österreichischer Ingenieur- und Architekten - Verein* (Hrsg.): Gründungen. Tagungsbeiträge der 14. Österreichischen Geotechniktagung, 2024, Wien, S. 51-67.
- [10] *Brunner, A.; Markiewicz, R.; Pistor, J. et al.*: Langzeiterfahrungen zur geothermischen Nutzung des Lainzer Tunnels in Wien. *In: Bauingenieur* 98 (2023), Heft 07-08, S. 243-256.
- [11] *Buhmann, P.; Moormann, C.; Westrich, B. et al.*: Tunnel geothermics - A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects. *In: Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol. 8 (2016), pp. 1-7.
- [12] *Campbell, G. S.; Jungbauer, Jr.; Bidlake, W. et al.*: Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *In: Soil Science*, Vol. 158 (1994), pp. 307–313.
- [13] *Capozza, A., De Carli, M., Galgaro, A. et al.*: Linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore. Padova, Italy, 2012.
- [14] *Côté, J.; Konrad, J. M.*: A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *In: Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42 (2005), pp. 443–458.
- [15] *Cousin, B.; Rotta Loria, A.; Bourget, A. et al.*: Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 91 (2019), 102997.
- [16] *Dai, X.; Bidarmaghz, A.; Narsilio, G.A.*: Energy tunnels: A review of the state of the art and knowledge gaps to harness renewable energy from underground infrastructure. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 142 (2023), 105431.
- [17] *De Feudis, S.; Insana, A.; Barla, M.*: Seizing the opportunity of energy retrofitting of existing tunnels. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 154 (2024), 106109.
- [18] *De Vries, D. A.*: Thermal properties of soil. *In: Physics of Plant Environment* (Ed. by W. R. Wijk, 1963), North Holland Publishing Company, pp. 210–235.
- [19] *Di Donna, A.; Loveridge, F., Piemontese, M. et al.*: The role of ground conditions on the heat exchange potential of energy walls. *In: Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol. 25 (2021), 100199.
- [20] *Franzius, J.N.; Pralle, N.*: Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 164 (2011), pp. 35-40.

- [21] Geisler, T.; Richter, W.; Marcher, T.: Enhancing the performance of open geothermal tunnelwater systems by heat absorbers. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 145 (2024), 105591.
- [22] Insana, A.; Barla, M.: Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. *In: Renewable Energy*, Vol. 152 (2020), pp. 781-792.
- [23] Johansen, O.: Thermal conductivity of soils. Norwegian University of Science, Ph.D. dissertation, 1975.
- [24] Kostadinovic, A.; Markiewicz, R.; Adam, D.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von ungefrorenen Böden und Korngemischen – Teil 1. *In: Bauingenieur 100* (2025), Heft 5, S. 132-144.
- [25] Laloui, L.; Loria Rotta, A. F.: Analysis and Design of Energy Geostructures. Theoretical Essentials and Practical. Academic Press, 2019.
- [26] Lee, C.; Park, S.; Choi, H. et al.: Development of energy textile to use geothermal energy in tunnels. *In: Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 59 (2016), pp. 105-113.
- [27] Magdy, A.; Ogunleye, O.; Mroueh, H. et al.: A review of exploiting shallow geothermal energy through tunnels: Current status and future prospects. *In: Renewable Energy*, Vol. 238 (2025), 121958.
- [28] Markiewicz, R.; Adam, D.; Hupp, K. et al.: Richtlinie. Erdwärmenutzung mit Massivabsorbern, Österreichische Bautechnik Vereinigung, Ausgabe Oktober 2019.
- [29] Markiewicz, R.; Adam, D.; Unterberger, W. et al.: Geothermische Anlagen bei Grund und Tunnelbauwerken. Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlicher Nutzen. *In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau* (Hrsg.): BASt Heft B 96, Fachverlag nw der Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach, 2013.
- [30] Mimouni, T.; Dupray, F.; Laloui, L.: Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel. *In: Geothermics*, Vol. 51 (2014), pp. 380-387.
- [31] Moormann, C.; Buhmann, P.; Friedemann, W. et al.: Tunnel geothermics – International experience with renewable energy concepts in tunnelling. *In: Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 9 (2016), Iss. 5, pp. 467-480.
- [32] Ostermann, V., Götzl, G., Steckler, A. et al.: Energie der Zukunft. GEO-Pot. Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs. Überregionale, interdisziplinäre Potenzialstudie zur Erhebung und Darstellung des oberflächennahen geothermischen Anwendungspotenzials auf Grundlage eines regelmäßigen Bearbeitungsrahmens.

Publizierter Endbericht, Projektsteuerung durch Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), Wien, 2010.

- [33] ÖWAV - Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2. Auflage, Ausgabe Mai 2009.
- [34] SIA 384: Erdwärmesonden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SN 546384/6, Ausgabe Juni 2021.
- [35] SIA D 0190: Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührenden Betonbauteilen – Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2005.
- [36] VDI 4640 Blatt 1 - Entwurf: Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ausgabe Dezember 2021.
- [37] VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ausgabe Juni 2019.
- [38] *Wilhelm, J.; Rybach, L.:* The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels. *In: Geothermics*, Vol. 32 (2003), Iss. 4, pp. 557-568.
- [39] Durchschnittlicher Jahresheizbedarf aus AEA Musterhaushaltsberechnung 2022:
https://www.konsumentenfragen.at/konsumentenfragen/Bauen__Wohnen_und_Versorgungsleistungen/News/Energiesparen_-_los_geht-s_-_Teil_4.html?#; 20.06.2025; 11:01 Uhr
- [40] Fonseca, Jimeno A. & Schlueter, Arno, 2015. "Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 142(C), Seiten 247-265.
- [41] <https://www.eutilities.at/verfuegbare-netzanschlusskapazitaeten>
- [42] Kapeller, Maggauer, Patha, Reisz, Wimmer und Kathan, „Techno-Economic System and Component Analysis for Hybrid Power Plants, “IEEEExplore, EEM25, April 2025
- [43] <https://pvgis.com/en>

9. ANHÄNGE

Im eCall:

- Detailbericht Wärmegewinnungstechnologien
- Bewertungsmatrix