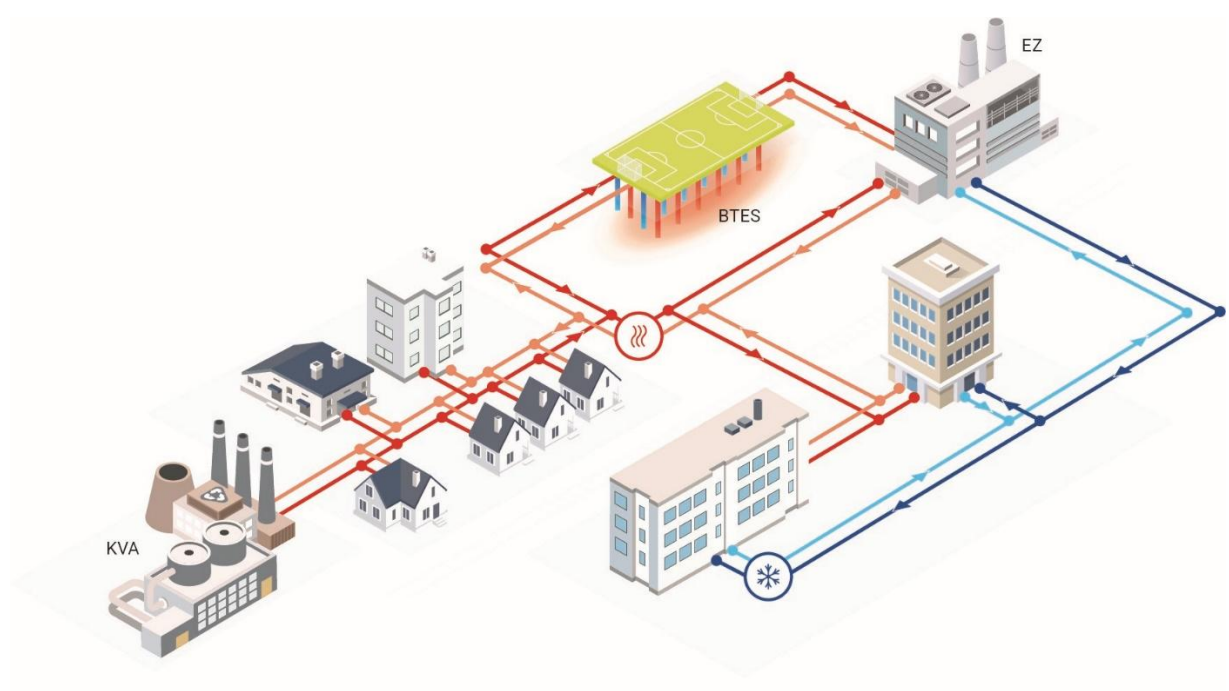




Zwischenbericht vom 22. Oktober 2025

PeaknCool4District

Erdgekoppelte Wärmepumpen zur Spitzendeckung in Wärmenetzen: Potenziale und Herausforderungen



Quelle: © die werke versorgung wallisellen ag

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Ko-Finanzierung:

Energie 360° AG
8048 Zürich
www.energie360.ch

die werke versorgung wallisellen ag
8304 Wallisellen
www.diewerke.ch

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
8000 Zürich
<https://www.stadt-zuerich.ch/de/politik-und-verwaltung/stadtverwaltung/hbd/ahb.html>

SIG – Service Industriels de Genève
1219 Le Lignon
www.sig-ge.ch

Subventionsempfänger/innen:

OST – Ostschweizer Fachhochschule
Institut für Energietechnik & Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
www.ost.ch/iet / www.ost.ch/spf

Autoren/Autorinnen:

Christoph Meier, OST IET, christoph.meier@ost.ch
Alex Hobé, OST SPF, alex.hobe@ost.ch
Florian Ruesch, OST SPF, florian.ruesch@ost.ch
Amelia Heid, OST SPF, amelia.heid@ost.ch
Carsten Wemhöner, OST IET, carsten.wemhoener@ost.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502865-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Dekarbonisierung des Gebäudeparks erfordert eine signifikante Steigerung des Anteils von Fernwärme, insbesondere in städtischen Gebieten. Grosse Herausforderungen für den rasanten Ausbau der Fernwärme sind die Deckung von Lastspitzen mit erneuerbaren Energien und das steigende Bedürfnis nach Klimakälte. Das Projekt zielt darauf ab, das Potenzial dezentraler, erdgekoppelter Wärmepumpen mit Erdsonden oder Grundwasser als Quelle zur Bewältigung dieser Herausforderungen zu untersuchen. Dabei werden verschiedene Aspekte wie die Dimensionierung und Integration der Wärmepumpen sowie die Auslegung der Quellen und die Einflüsse auf den Untergrund untersucht. Die Untersuchung erfolgt anhand konkreter Fallstudien, um praxisrelevante Erkenntnisse für die zukünftige Entwicklung von thermischen Netzen zu liefern.

Die Fallstudie Thusis untersucht Integration von Erdwärmesonden für die Bereitstellung von Wärmelastspitzen und Kälte für ein Spital, welches an einen bestehenden Wärmeverbund angeschlossen ist. Die Analyse des Energiebedarfs zeigt, dass der Kältebedarf aufgrund der alpinen Lage sehr begrenzt ist, jedoch trotzdem in der Grössenordnung des Spitzenlastbedarfs für 50% der Heizleistung liegt und damit die Erdoberflächentemperaturen in den ersten Simulationen über die Jahre nicht absinken.

In der Fallstudie Wallisellen wird das «PeakNCool»-Konzept auf ein neues Wärmenetz angewendet, das sich derzeit in der Planungsphase befindet. Erste Simulationen zeigen, dass der Beitrag des Spitzenkessels von 8 % auf 1 % reduziert werden kann, wenn dezentrale EWS-Wärmepumpen zur Deckung des Kühlbedarfs ins Netz integriert und entsprechend betrieben werden. Im Projektverlauf hat sich zudem gezeigt, dass sich bereits mehrere grössere Sondenfelder im Netzperimeter befinden, die gegebenenfalls in das Konzept des neuen Netzes integriert werden können.

In der Fallstudie Zürich wird untersucht, inwiefern das Grundwasser zur saisonalen Wärmespeicherung genutzt werden kann durch die Nutzung von versetzten Entnahme- und Rückgabebrunnen. Erste Simulationen zeigen, dass sich durch die Platzierung des Entnahme- und Rückgabebrunnens der Einfluss auf die Grundwassertemperatur stark reduzieren lässt.

Résumé

La décarbonisation du parc immobilier nécessite une augmentation significative de la part du chauffage à distance, en particulier dans les zones urbaines. Les principaux défis liés à l'expansion rapide du chauffage à distance concernent la couverture des charges de pointe avec des énergies renouvelables ainsi que la demande croissante en froid. Le projet vise à étudier le potentiel des pompes à chaleur décentralisées, couplées au sol avec des sondes géothermiques ou de l'eau souterraine comme source, afin de relever ces défis. Différents aspects sont examinés, tels que le dimensionnement et l'intégration des pompes à chaleur, la conception des sources ainsi que les impacts sur le sous-sol. L'analyse est réalisée sur la base d'études de cas concrètes, afin de fournir des connaissances pertinentes pour le développement futur des réseaux thermiques.

L'étude de cas de Thusis analyse l'intégration de sondes géothermiques pour l'approvisionnement en chaleur de pointe et en froid d'un hôpital raccordé à un réseau de chauffage existant. L'analyse des besoins énergétiques montre qu'en raison de la situation alpine, la demande en froid est très limitée, mais qu'elle correspond tout de même à environ 50 % de la puissance de chauffage de pointe. Ainsi, dans les premières simulations, les températures du sol ne diminuent pas au fil des années.

L'étude de cas de Wallisellen applique le concept « PeakNCool » à un nouveau réseau de chauffage actuellement en phase de planification. Les premières simulations montrent que la contribution de la chaudière de pointe peut être réduite de 8 % à 1 % si des pompes à chaleur décentralisées avec sondes géothermiques sont intégrées au réseau pour couvrir la demande en froid et exploitées en conséquence. Au cours du projet, il est également apparu que plusieurs grands champs de sondes se trouvent déjà dans le périmètre du réseau et pourraient éventuellement être intégrés au concept du nouveau réseau.



L'étude de cas de Zurich examine dans quelle mesure l'eau souterraine peut être utilisée pour le stockage saisonnier de chaleur grâce à l'utilisation de puits d'extraction et de réinjection décalés. Les premières simulations indiquent que le positionnement de ces puits permet de réduire fortement l'impact sur la température de la nappe phréatique.

Summary

The decarbonization of the building stock requires a significant increase in the share of district heating, particularly in urban areas. Major challenges for the rapid expansion of district heating include covering peak loads with renewable energy and the growing demand for cooling. The project aims to investigate the potential of decentralized, ground-coupled heat pumps with borehole heat exchangers or groundwater as a source to address these challenges. Various aspects are examined, such as the sizing and integration of the heat pumps, the design of the sources, and the impacts on the subsurface. The investigation is based on concrete case studies to provide practice-relevant insights for the future development of thermal networks.

The Thusis case study examines the integration of geothermal boreholes to provide peak heating loads and cooling for a hospital connected to an existing district heating network. The analysis of the energy demand shows that, due to the alpine location, the cooling demand is very limited but still amounts to the peak heating demand at around 50% of the heating capacity. As a result, in the first simulations, ground temperatures do not decrease over the years.

The Wallisellen case study applies the "PeakNCool" concept to a new heating network currently in the planning phase. Initial simulations show that the contribution of the peak boiler can be reduced from 8% to 1% if decentralized borehole heat exchanger (BHE) heat pumps are integrated into the network to cover the cooling demand and operated accordingly. During the course of the project, it also became apparent that several larger borehole fields are already located within the network perimeter, which could potentially be integrated into the concept of the new network.

The Zurich case study investigates the extent to which groundwater can be used for seasonal heat storage through the use of offset extraction and reinjection wells. Initial simulations indicate that by adjusting the placement of these wells, the impact on groundwater temperature can be significantly reduced.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung..... | 3 |
| Résumé..... | 3 |
| Summary | 4 |
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 7 |
| 1 Einleitung | 8 |
| 1.1 Kontext und Motivation | 8 |
| 1.2 Vorarbeiten | 8 |
| 1.2.1. Gute Wirtschaftlichkeit von EWS als Spitzentechnologie..... | 8 |
| 1.2.1. Abgrenzung zu anderen Projekten | 9 |
| 1.2.2. Reduktion fossiler Spitzen und Kapazitätserweiterung | 9 |
| 1.2.3. Kältebedarf und Sondenregeneration..... | 10 |
| 1.3 Forschungsbedarf..... | 11 |
| 1.4 Ziele und Fragestellungen | 12 |
| 2 Projektübersicht | 13 |
| 2.1 Fallstudie Thusis..... | 14 |
| 2.2 Fallstudie Wallisellen | 14 |
| 2.3 Fallstudie Zürich | 15 |
| 3 Fallstudie Thusis | 17 |
| 3.1 Vorgehen und Methoden | 17 |
| 3.2 Situationsanalyse | 17 |
| 3.3 Ermittlung des Wärme- und Kältebedarfs | 18 |
| 3.1 Integrationskonzepte | 21 |
| 3.1 Potentialabschätzung mit EWS-Simulationen | 21 |
| 3.2 Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 23 |
| 4 Fallstudie Wallisellen | 25 |
| 4.1 Vorgehen und Methoden | 25 |
| 4.2 Analyse Kältebedarf und bestehende EWS | 25 |
| 4.1 Lastprofile | 27 |
| 4.1.1. nPro – District Energy Planning Tool..... | 27 |
| 4.1.2. Exceltool | 29 |
| 4.1.3. Vergleich | 31 |
| 4.2 Polysun Simulation und Szenarien | 34 |
| 4.3 Ergebnisse..... | 36 |
| 4.4 Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 39 |
| 5 Fallstudie Zürich | 40 |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1 | Vorgehen und Methoden | 40 |
| 5.2 | Simulationsmodell | 40 |
| 5.3 | Erste Ergebnisse | 43 |
| 5.4 | Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 45 |
| 6 | Nationale und internationale Zusammenarbeit | 46 |
| 7 | Publikationen und andere Kommunikation | 46 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 46 |
| 9 | Anhang | 48 |
| 9.1 | Messwerte Fallstudie Thusis | 48 |



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|---------------------------------------|
| BFE | Bundesamt für Energie |
| COP | Coefficient of Performance |
| EER | Energy Efficiency Ratio («Kälte-COP») |
| EWS | Erdwärmesonde |
| EWSF | Erdwärmensondenfeld |
| KEV | Kostendeckende Einspeisevergütung |
| KVA | Kehrichtverwertungsanlage |



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Fernwärmenetze leisten einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudeparks, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten. Gemäss den Energieperspektiven 2050+, Szenario ZERO Basis soll sich der Beitrag der Fernwärme in der Schweiz fast verdreifachen und im Jahr 2050 15 TWh betragen. Dieser Ausbau hat in den letzten Jahren stark Fahrt aufgenommen und die wichtigen Schweizer Grossstädte haben bereits Milliardeninvestitionen für den Netzausbau gesprochen. Viele Netzbetreiber setzen dabei auf «warme» Netze, welche auf Nutztemperatur ab ca. 70 °C betrieben werden. Solche Netze sind Stand der Technik und weltweit tausendfach erprobt. Drei wichtige Herausforderungen der Zukunft sind dabei aber noch nicht gelöst.

1. Bei Kapazitätsknappheit oder einfach aus wirtschaftlichen Gründen werden oft fossile Spitzendeckungen eingesetzt, wobei erneuerbare Lösungen schwierig und meist kaum wirtschaftlich umsetzbar sind.
2. Erweiterungen von bestehenden Netzen sind oft nicht möglich oder unwirtschaftlich, da die bestehenden Leitungsquerschnitte zu Spitzenlastzeiten ausgenutzt sind.
3. Der wachsende Kühlbedarf kann mit warmen Netzen nicht gedeckt werden.

Das BFE Projekt HP-Source [1] hat gezeigt, dass EWS Anlagen zur Deckung von Leistungsspitzen wirtschaftlich attraktiv sein können. Die Projektidee besteht also darin, dezentrale EWS-Anlagen in warme Fernwärmenetze zu integrieren und mit derselben Infrastruktur sowohl erneuerbare Leistungsspitzen, eine Entlastung der Netzinfrasturktur als auch lokale Klimakälte zur Verfügung zu stellen. Somit bietet die Idee eine Lösung für alle drei erwähnten Herausforderungen. Weil dadurch die Kosten auf die unterschiedlichen Anwendungen aufgeteilt werden können, erhöht die Dreifachnutzung die wirtschaftliche Attraktivität solcher Anlagen zusätzlich.

1.2 Vorarbeiten

1.2.1. Gute Wirtschaftlichkeit von EWS als Spitzentechnologie

In HP-Source wurde gezeigt, dass erdgekoppelte Wärmepumpen im bivalenten Betrieb eine wirtschaftlich interessante Möglichkeit zur erneuerbaren Spitzendeckung darstellen. Der Wärmeentzug aus dem Erdreich, welcher in einem monovalenten Betrieb die benötigten Sondenmeter definiert, wird drastisch reduziert, wenn die Erdwärmesonden nur an kalten Tagen für die Spitzenlast benötigt werden (Abbildung 1). So kann beispielsweise bei einem Gebäude, welches mit einem monovalenten Erdwärmesondensystem 20 Erdwärmesonden benötigt, die Anzahl Sonden auf 4 (20%) reduziert werden, wenn diese nur noch die oberen 50% der Heizleistung und damit ca. 20% der Heizenergie übernehmen.

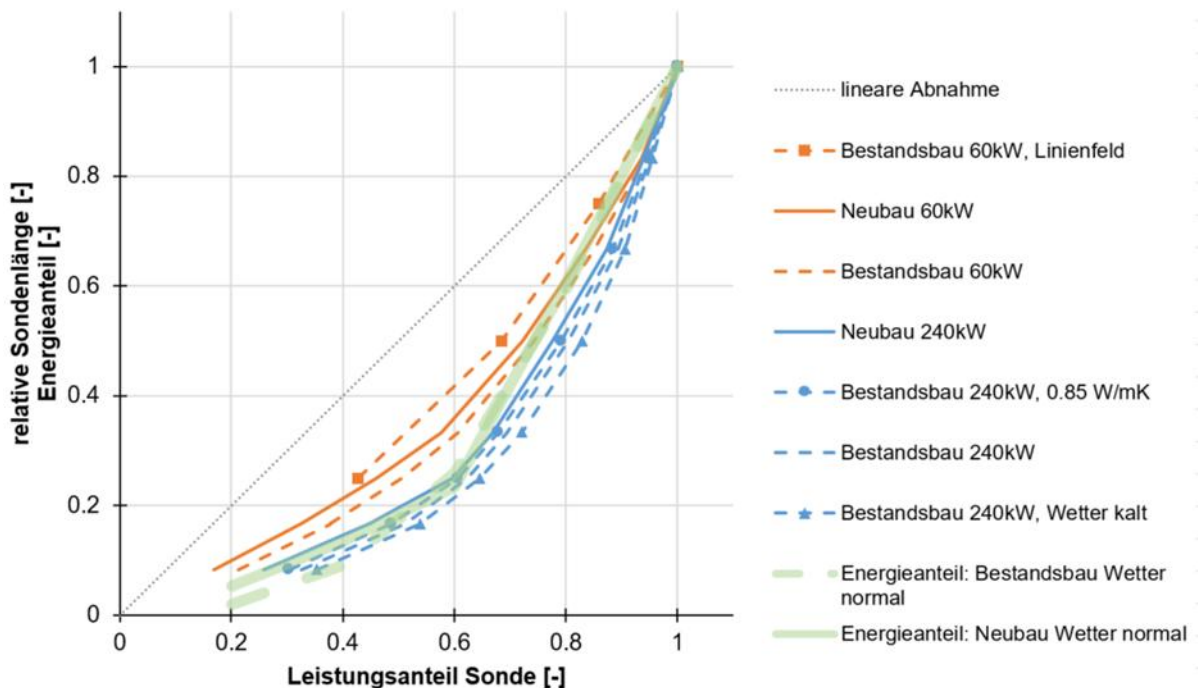


Abbildung 1: Benötigte relative Sondenlänge beim Spitzenlastbetrieb im Vergleich zum monovalenten Betrieb [1]

1.2.1. Abgrenzung zu anderen Projekten

Das Konzept der Spitzenlastdeckung mit Erdwärmesonden wird aktuell im BFE P&D-Projekt Reno-Source [2], [3] mit Luft als Grundlastquelle untersucht.

In diesem Projekt soll dieses Konzept auf Wärmenetze übertragen werden und das Potenzial dezentraler, erdgekoppelter Wärmepumpen zur Spitzendeckung untersucht werden. Dabei können diese bei einzelnen Gebäuden oder in Clustern / Arealen mit erhöhtem Klimakältebedarf platziert werden und im Sommer zur Deckung des steigenden Kühlbedarfs eingesetzt werden. Diese Synergien sollen sowohl für Wärmepumpen mit Erdwärmesondenfelder als auch für Wärmepumpen mit Grundwassernutzung untersucht werden.

Das an der HSLU bearbeitete BFE-Projekt MicroDHC untersucht die Nutzung von Erdwärmesondenfeldern als Übergangslösung mit einer späteren Integration der Felder in einen Wärmeverbund. Die Nutzung der Felder als Übergangslösung wird in PeaknCool4District nicht untersucht, ist jedoch ein möglicher Anwendungsfall.

1.2.2. Reduktion fossiler Spitzen und Kapazitätserweiterung

Hohe Leistungsspitzen werden in vielen thermischen Netzen mit fossilen Energieträgern wie Gas oder Öl gedeckt. Im BFE Projekt BigStoreDH wurden diese Spitzen quantifiziert und der Einsatz von thermischen Speichern zum Ersatz fossiler Spitzen untersucht. Dabei lohnt sich der Einsatz von Tagesspeichern bei kleinen bis mittelgrossen Fernwärmenetzen finanziell, es werden aber immer noch zusätzliche Wärmeerzeuger für die Spitzendeckung benötigt. Bei sehr grossen Netzen können sehr grosse saisonale Speicher, welche Leistungsspitzen vollständig abdecken, finanziell attraktiv sein. Der hohe Platzbedarf solcher Speicher stellt aber speziell für innerstädtische Gebiete ein Problem dar.

Um den massiven Ausbau der Fernwärme umzusetzen, müssen bestehende Netze stark ausgebaut und vorhandene Wärmequellen besser ausgenutzt werden. Die Deckung der Spitzenlast über dezentrale Quellen ermöglicht es, die Anschlussleistung an die Fernwärme zu reduzieren, womit mehr Leistung für andere Gebäude / Areale übrigbleibt. Damit lassen sich beispielsweise lokale Engpässe bei bestehenden Leitungsnetzen überwinden. Viele geeignete Wärmequellen, wie beispielsweise



Kehrichtverbrennungsanlagen, Grundwasserfassungen oder Abwärme von Abwasserreinigungsanlage (ARA) weisen eine begrenzte Leistung auf, die Energiepotenziale sind aber oft noch nicht ausgeschöpft. So haben z.B. Untersuchungen im BFE-Projekt IceGrid [4] gezeigt, dass sich das Einzugsgebiet eines ARA-Netzes mehr als verdoppeln lässt, wenn die Leistungsspitzen mit einem Eisspeicher gedeckt werden können.

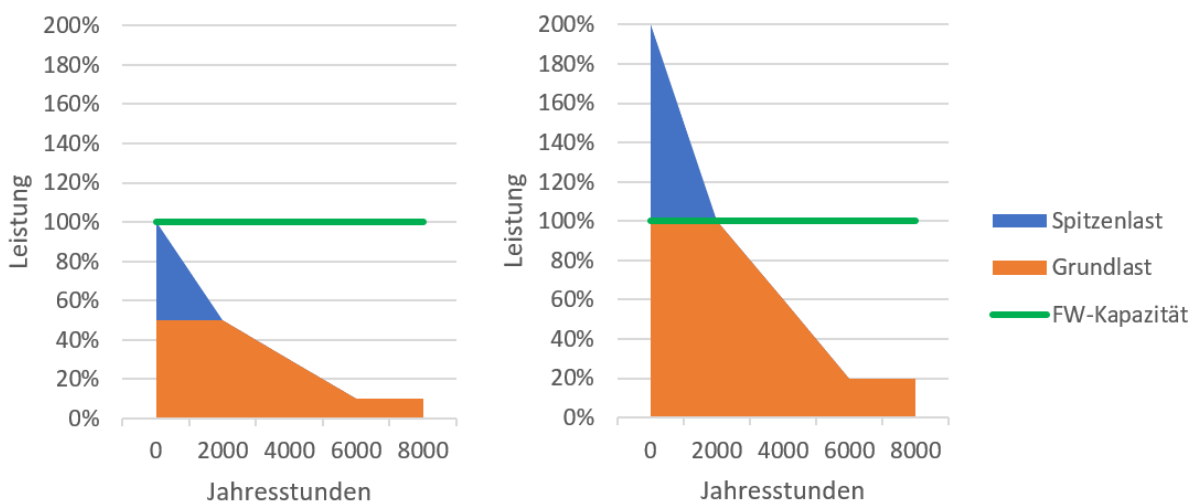


Abbildung 2: Summenhäufigkeit des Wärmebedarfs im Fernwärmenetz. Links: Die komplette Leistung wird aus dem FW-Netz geliefert. rechts: 50% Spitzenlast wird dezentral, direkt bei den Gebäuden, erzeugt. Dadurch kann die Wärmemenge in der Grundlast verdoppelt werden,

1.2.3. Kältebedarf und Sondenregeneration

In den kommenden Jahren wird der Klimakältebedarf von Gebäuden aufgrund von Klimawandels und modernen Bauweisen voraussichtlich stark ansteigen. Im Projekt Cool2Regen [5] wurde aber aufgezeigt, dass in bestehenden dichten Gebieten immer noch deutlich mehr Wärme- als Kältebedarf bestehen bleibt. Ein vollständiger Umstieg ganzer Bestandesquartiere auf eine Versorgung nur mit EWS ist nicht möglich, weil die Dominanz des Wärmebedarfs zu einer Übernutzung und Auskühlung des Untergrundes führen würde.

Ein Vergleich von unterschiedlichen Quellen zur Abschätzung des zukünftigen Wärme- und Kältebedarfs (Abbildung 3) aus dem Projekt DeCarbCH [6] zeigt, dass die Vorhersagen zum Kältebedarf stark streuen, aber in der Grössenordnung von 10-20% des Wärmebedarfs liegen wird. Bezüglich Energiemengen wird der Kältebedarf eine untergeordnete Rolle spielen, so dass es sich in vielen Fällen nicht lohnt, ein speziell für die Kühlung geeignetes Niedertemperaturnetz oder «Anergienetz» zu erstellen. Der erwartete Kältebedarf liegt bezüglich Energiemenge in einer ähnlichen Höhe wie der Wärmebedarf einer typisch ausgelegten (noch oft fossilen) Spitzendeckungsanlage.

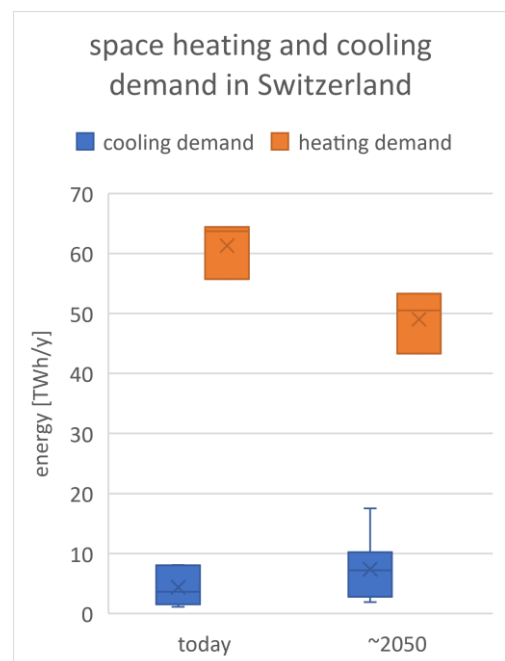


Abbildung 3: Bedarf an Raumwärme- und Kälte (SWEET DeCarbCH 2025)



Eine Kombination von Kühlung und Spitzendeckung kann also zu einer ausgeglichenen Wärmebilanz und somit einem nachhaltigen Betrieb von EWS-Anlagen führen.

Trotz untergeordneter energetischer Relevanz führen Klimawandel, moderne Bauweise oder auch wachsende Ansprüche aus Komfortgründen zu einem stark steigenden Bedürfnis nach Klimakälte. Wenn warme Netze keine Kälte anbieten können, kann dies ein wichtiger Grund sein, um auf einen Anschluss zu verzichten und eine individuelle Lösung zu realisieren. Dies verringert die Anschlussdichte und kann den wirtschaftlichen Betrieb eines Netzes gefährden.

1.3 Forschungsbedarf

Erdwärmesonden und Grundwasser sind bewährte Quellen für Wärmepumpenanlagen. Die Auslegungsrichtlinien sind dabei jedoch auf die Nutzung als alleinige Quelle ausgerichtet. Wie in Abbildung 1 gezeigt, ändert sich jedoch die Dimensionierung eines Erdsondenfeldes drastisch, wenn es nur für die Spitzenlastdeckung eingesetzt wird. Die Integration in ein Wärmenetz führt aber auch gegenüber dem Projekt HP-Source zu veränderten Anforderungen und Regenerationsmöglichkeiten, so dass auch die dabei erarbeiteten Dimensionierungsgrundlagen nicht übertragen werden können. Für die hier vorgeschlagene Anwendung von EWS-Anlagen ergibt sich also ein Forschungsbedarf bezüglich:

- Auslegung von Erdwärmesondenfelder, welche energetisch deutlich geringer, jedoch leistungsmässig höher belastet werden als nach herkömmlichen Auslegungsrichtlinien und welche durch verschiedene Abwärmequellen wieder regeneriert oder sogar überladen werden. In HP-Source wurden diese Effekte zwar in einem begrenzten Rahmen untersucht, zur gezielten Überladung und dem Einfluss von/auf Nachbarfelder, welche nach herkömmlichen Auslegungsrichtlinien bewirtschaftet werden (monovalente EWS-Systeme) besteht jedoch noch Forschungsbedarf.
- Eine saisonale Wärmespeicherung im Grundwasser mit Rezirkulationsanlagen ist mit ausgeglichenen Energieprofilen grundsätzlich möglich [7]. In Gebieten mit Grundwasserfluss werden lokale Erwärmungen oder Auskühlungen hingegen weitergetragen und beeinflussen die Grundwassertemperatur über beträchtliche Distanzen. Dies schränkt die bewilligungsfähige Wärmeabgabe (bez. 3 K Regel) ein. Der Effekt kann durch eine geschickte Platzierung von dezentralen Spitzenanlagen innerhalb eines grösseren Fernwärmegebietes verringert werden, wenn sich die Wärme- und Kälteflüsse im Grundwasserfluss überlagern. Wie stark eine Beeinflussung der Grundwassertemperatur dadurch vermindert werden kann, ist nicht bekannt und soll in dem Projekt quantifiziert werden.
- Die Wärmeproduktion für Spitzenlastdeckung erfolgt heute zu einem grossen Teil mit fossilen Energieträgern. Für die Erreichung der Klimaziele ist das in Zukunft nicht mehr möglich. Ähnlich günstige erneuerbare Spitzenlastlösungen sind noch nicht in Sicht und es muss mit erhöhten Kosten gerechnet werden. Die Kostenzusammensetzung von Erdsonden- oder Grundwasserwärmepumpen zur Spitzendeckung in warmen Netzen weicht in vielen Aspekten von der gut bekannten Standardanwendung ab und muss genauer quantifiziert werden, um deren Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Diese Aspekte sind zum einen die Einsparung von Sondenlänge aufgrund des Einsatzes als Spitze oder zusätzliche Regenerationsmöglichkeiten durch die Einbindung ins Netz sowie die reduzierte Leistungsanforderungen ans Netz durch die dezentrale Platzierung. Der Doppelnutzen für Kühlung und Spitzendeckung ermöglicht zusätzliche Synergieeffekte. Ob diese Synergieeffekte gross genug und wirtschaftlich umsetzbar sind, ist Gegenstand dieser Forschungsarbeit.



1.4 Ziele und Fragestellungen

Die Hauptforschungsfrage lautet:

Können erdgekoppelte Wärmepumpen eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Möglichkeit bieten, um gleichzeitig den Spitzenlastbedarf in Wärmenetzgebieten und den steigenden Kältebedarf spezifischer Gebäude oder Areale im Netzperimeter zu decken?

Um diese grundsätzliche Fragestellung zu klären, werden weitere Punkte analysiert.

- Wie sollen diese Wärmepumpenanlagen eingebunden und dimensioniert werden?
- Welche Vor- und Nachteile bieten kleinere dezentrale Anlagen gegenüber grösseren eher zentralen Systemen?
- Sollen Sonden nur durch die Kälteanwendung oder auch durch das Netz regeneriert oder ggf. auch überladen werden, um deren Kapazität für die Spitzenlastdeckung zu steigern?
- Wie müssen Wärme und Kälteentzug räumlich und zeitlich angeordnet werden, um eine Überwärmung des Grundwassers zu verhindern/minimieren?
- Welcher Effekt hat eine Lockerung der 3 K-Regel für korrespondierende Grundwasserbrunnen auf das Potenzial zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Wärmenetzen?
- Welche Wärmegestehungskosten ergeben sich bei unterschiedlichen technischen Konzepten und wie verhalten sich diese im Vergleich zu anderen erneuerbaren Spitzendeckungs- und Kühlvarianten? Welchen Einfluss haben Synergien wie Kältenutzung auf die Wärmegestehungskosten. Wie sensitiv sind die Wärmegestehungskosten auf Veränderungen der ökonomischen Parameter?

Diese Fragen sollen anhand von drei Fallstudien analysiert werden, um folgende Ziele zu erreichen:

- Erarbeitung und Vergleich von Systemintegrationskonzepten für die Spitzenlastdeckung mit Wärmepumpenanlagen in Wärmeverbünden.
- Untersuchung der Möglichkeiten und Effekte der Sonden- bzw. Grundwasserregeneration durch das Netz oder die Kälteanwendung.
- Analyse der Auswirkungen einer gezielten Überladung der Sonden auf die Kapazität zur Spitzenlastdeckung.
- Erarbeitung von Modellen zur Optimierung der räumlichen und zeitlichen Anordnung von Wärme- und Kälteentzug, um eine Überwärmung des Grundwassers zu verhindern.
- Analyse der Effekte einer Lockerung der 3 K-Regel auf das Potenzial zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Wärmenetzen.
- Wirtschaftlicher Vergleich verschiedener Systemintegrationskonzepte.
- Ermittlung der Wärmegestehungskosten unter verschiedenen technischen Konzepten und Betriebsbedingungen.
- Untersuchung des Einflusses von Synergien, wie der Kältenutzung, auf die Gesamtkosten und Effizienz der Wärmepumpensysteme.
- Analyse der Sensitivität der Wärmegestehungskosten gegenüber ökonomischen Parametern (z.B. Energiepreise, Fördermittel) und Ableitung von Strategien zur Kostenoptimierung.
- Bewertung der technologischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Vor- und Nachteile gegenüber anderen erneuerbaren Technologien zur Spitzenlastdeckung.



2 Projektübersicht

Um das Potenzial dezentraler EWS-Anlagen zur Deckung von Spitzen- und Kühllasten im Gebiet warmer Netze zu analysieren, arbeiten in dem Projekt zwei renommierte Forschungsinstitute der OST mit relevanten Industriepartnern zusammen.

Die Analysen finden aus drei unterschiedlichen Blickwinkeln respektive Betrachtungsebenen statt:

1. Das Zusammenspiel und die Integration in die dezentrale Gebäudetechnik (AP3)
2. Das Zusammenspiel und die Integration ins Wärmenetz (AP4)
3. Die Beeinflussung des Untergrundes (AP5)

Dabei werden die Resultate der jeweils untergeordneten Stufe berücksichtigt, die Modellierung findet in den übergeordneten Betrachtungsweisen mit deutlich weniger Details statt. Drei unterschiedliche konkrete Fallstudien setzen den Fokus auf jeweils eine dieser Betrachtungsebenen. So liegt in der Fallstudie Thusis das einzelne Gebäude, in der Fallstudie Wallisellen die Integration ins Netz und in der Fallstudie Zürich der Einfluss auf den Untergrund im Fokus der Betrachtungen. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse und eine Synthese der unterschiedlichen Resultate in der Form von Handlungsempfehlungen schliessen das Projekt ab.

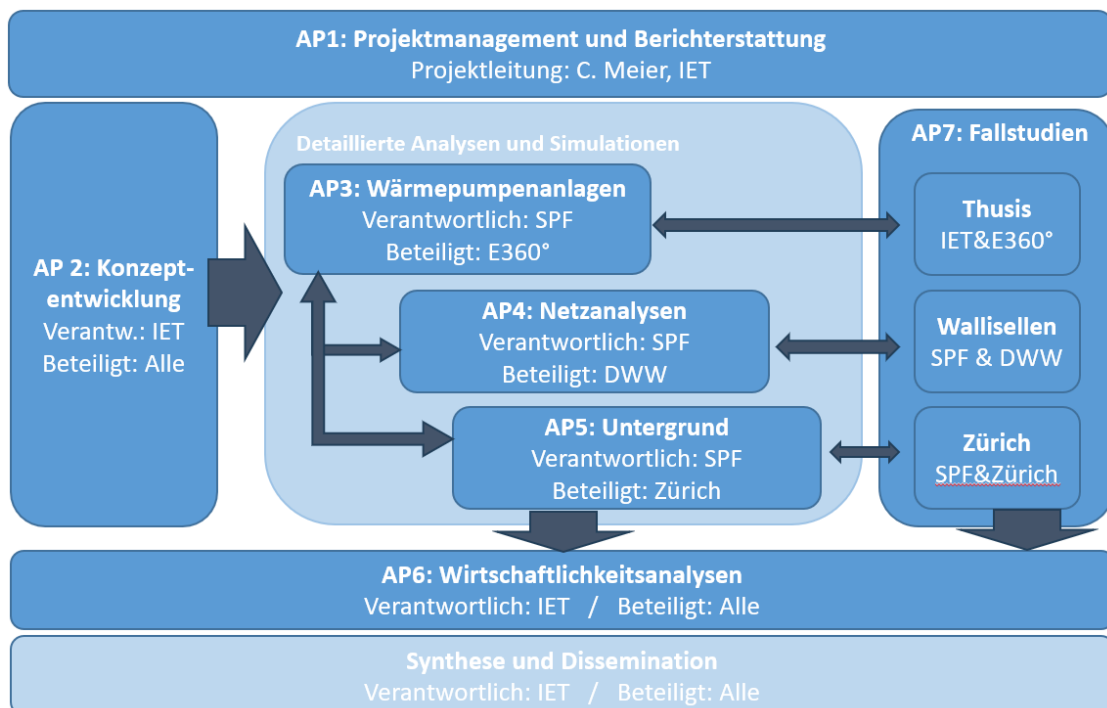


Abbildung 4: Strukturierung des Projekts in Arbeitspakete



2.1 Fallstudie Thusis

In Thusis existiert ein Wärmeverbund mit einer Anschlussleistung von rund 1.8 MW. Das Spital in Thusis ist am Wärmeverbund angeschlossen (260 kW Anschlussleistung für Wärme), hätte aber zusätzlich noch Potential, selbst EWS auf ihrem Gelände zu installieren (ca. 20 Stück). Diese können im Sommer als Kältelieferant dienen und im Winter allenfalls als Spitzenlast für das Fernwärmenetz genutzt werden. Somit könnte man die fossile Spitzenlast, die im Moment mit Öl abgedeckt wird, zum Teil ersetzen.

Diese Fallstudie fokussiert auf die Integration einer Anlage mit Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung in den Wärmeverbund. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Auslegung des Sondenfeldes und den Beitrag, welchen die Anlage an das Fernwärmenetz leisten kann. Dazu werden technische Konzepte zur Kombination der Spitzenlastdeckung mittels Erdwärmesonden mit der Fernwärme für die Grundlastdeckung unter Berücksichtigung der Anforderungen für die Kältenutzung und allfälliger Rückspeisung von Wärme ins Netz entwickelt und daraus die Anforderungen für die Simulationsmodelle abgeleitet.

2.2 Fallstudie Wallisellen

Die Stadtwerke («die werke») Wallisellen wollen in ihrem Gasversorgungsgebiet (Wallisellen, Dietlikon, Wangen-Brüttisellen) einen Wärmeverbund realisieren, um die kantonalen Klimaziele bis 2050 zu erreichen. Dabei sollen nur erneuerbare Energieträger eingesetzt werden, wobei Holz als erschöpft gilt. Die Ausgangslage ist insofern schwierig, weil im Winter nur wenig Bandlast aus Abwärme Reinertrag nach 9 Jahren mit KEV-Vertrag (Preis für Übernahme ist abgezogen) und einer nahe gelegenen KVA zur Verfügung steht. Im Sommer hingegen ist sehr viel Abwärme vorhanden. Die aktuelle Planung geht von einem Wärmebedarf von 50 GWh, einem Kältebedarf von 13 GWh und einer thermischen Leistung von 18 MW aus. Durch die Planung eines Wärmeverbundes auf der «grünen Wiese» können neue Konzepte erprobt und umgesetzt werden, wobei auch Synergieeffekte durch den Zusammenschluss mehrerer Gemeinden erzielt werden können.

Diese Fallstudie fokussiert auf die breitere Integration von Erdwärmesonden und allenfalls Grundwasser zur Spitzenlastdeckung, unter Berücksichtigung vorhandener Abwärmepotentiale zur Grundlastdeckung und zur Regeneration. Der Schwerpunkt liegt auf der Netzanalyse und grossräumigen Auswirkungen im Untergrund wie z.B. die gegenseitige Beeinflussung von Sondenfeldern. Mögliche Standorte für Spitzenlastsondenfelder werden anhand bekannter Cluster von Abwärmequellen (z.B. Industriegebiet) analysiert.

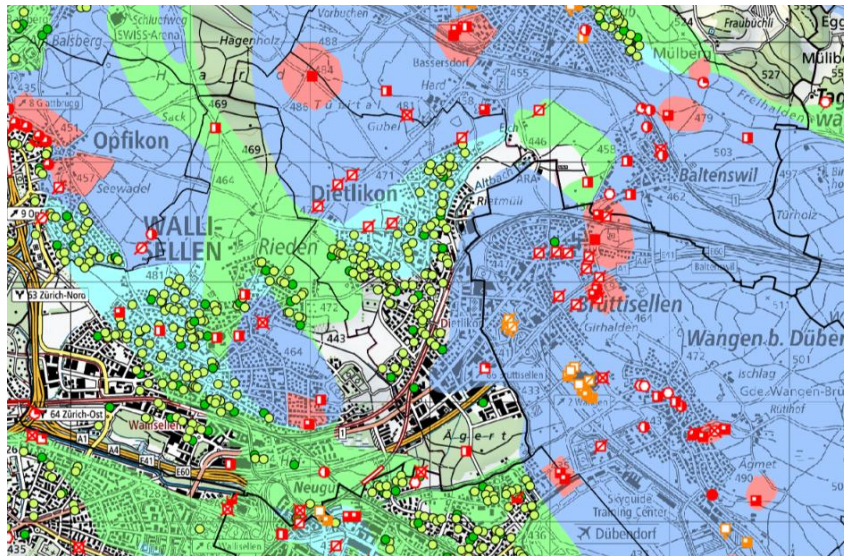


Abbildung 5: Versorgungsgebiet der Werke Wallisellen, Dietlikon, Wangen-Brüttisellen: im hellblauen und grünen Gebiet gibt es Schotter-Grundwasservorkommen, welches für Trinkwassergewinnung ungeeignet ist und Erdwärmesonden sind grundsätzlich zulässig. Im violetten Gebiet gibt es Potenziale für thermische Grundwassernutzung, jedoch kann nicht gebohrt werden [8]

2.3 Fallstudie Zürich

In städtischen Gebieten wird das Grundwasser durch Bauten thermisch beeinflusst. Der Einfluss über die Bauten ist dabei grösser als der Effekt auf Grund des Klimawandels. In der Stadt Zürich liegen grosse Teile des thermisch nutzbaren Grundwassers in urbanen Gebieten, die über thermische Netze mit Wärme versorgt werden. Die Fallstudie betrachtet für den Abschnitt des thermischen Netzes im Gebiet Zürich West die folgenden Themen: 1) wie die Grundwassernutzung für Heizen und Kühlen räumlich anzuordnen ist, 2) wie durch die Nutzung der anthropogene Einfluss vermindert werden kann und 3) wie für das thermische Netz dezentrale Spitzenlast bereitgestellt werden kann.

Diese Fallstudie fokussiert auf die Verteilung möglicher korrespondierender Brunnen in einem begrenzten Stadtgebiet. Die Schwerpunkte liegen in der Untersuchung der Auswirkungen auf die Grundwasserströme und der Ermittlung von Leistungs- und Verteilungsgrenzen.

In dynamischen Simulationen wird der Einfluss des Spitzenlastsystems auf das Fernwärmenetz und auf den Untergrund untersucht und verschiedene Betriebskonzepte oder Positionierung von Brunnenstandorten miteinander verglichen. Für ausgewählte Varianten werden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Wärme- und Kältegestehungskosten ermittelt unter Berücksichtigung der Einpreisung von Synergieeffekten.

Aus den Resultaten der Simulationen und der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden Handlungsempfehlungen für die Fallstudien abgeleitet.

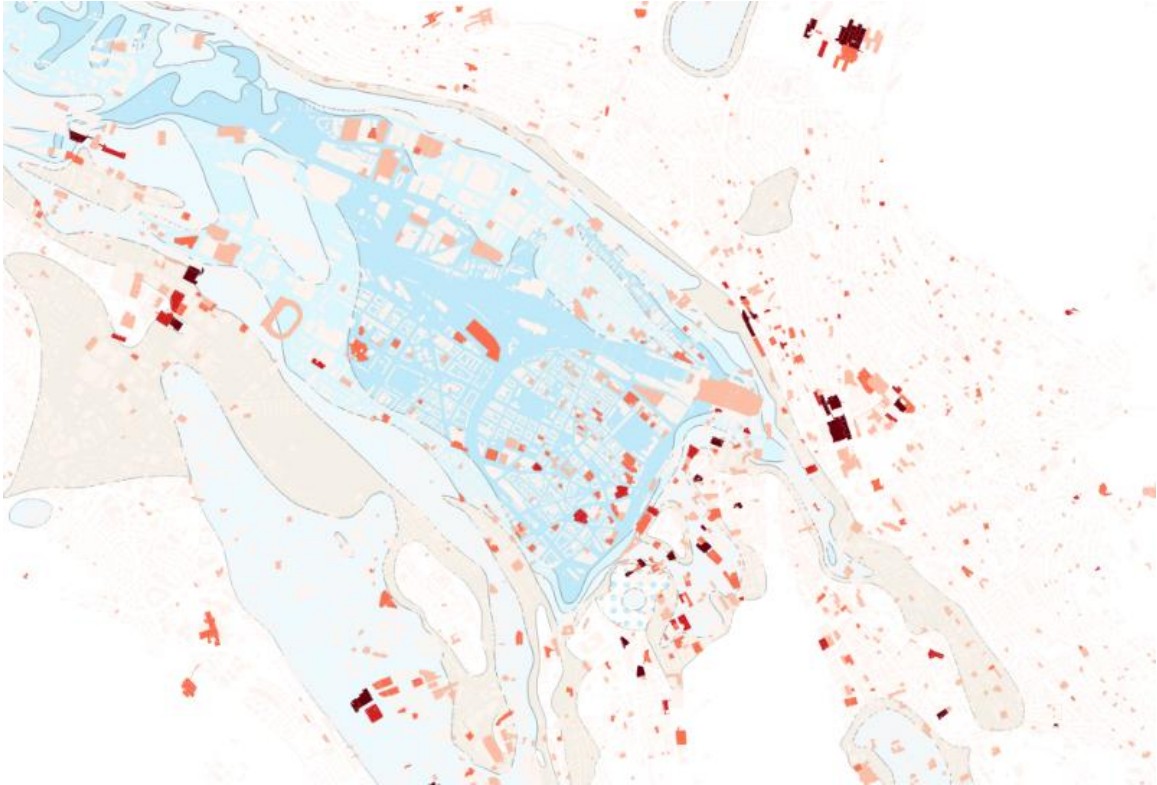


Abbildung 6: Thermischer Einfluss der Bauten auf das Grundwasser (Quelle: Stadt Zürich)



3 Fallstudie Thusis

3.1 Vorgehen und Methoden

In dieser Fallstudie erfolgen die Untersuchungen aus dem Blickwinkel eines einzelnen Wärmebezügers im Fernwärmenetz. Das Objekt der Fallstudie, das Spital Thusis, wird in einem ersten Schritt bezüglich Wärme- und Kältebedarf analysiert sowie die Möglichkeiten zur Installation von Erdwärmesonden ermittelt. Der reale Wärme- und Kältebedarf dient als Grundlage zur Erstellung von künstlichen Lastprofilen für die weiteren Untersuchungen. Dynamische Simulationen ermöglichen anschliessend eine Untersuchung verschiedener Integrationsstrategien als auch die Variation von Randbedingungen wie z.B. die klimatischen Einflüsse.

3.2 Situationsanalyse

In einem ersten Schritt wurde die Ist-Situation für die Fallstudie analysiert.

Das Spital mit einer Energiebezugsfläche von 9892 m² (inkl. unterirdisches Spital und Personalhaus) liegt am westlichen Rand von Thusis auf 730 m.ü.M. Direkt hinter dem Spital erhebt sich ein steiler Hang, wodurch dieses Gebiet nicht geeignet ist zum Bohren von Erdwärmesonden. Wegen des unterirdischen Spitals unter dem Parkplatz verbleibt nur noch das Gebiet zwischen Spital und Strasse (Abbildung 7).



Abbildung 7: Lageplan Spital Thusis. Rot markiert ein möglicher Bereich für Erdwärmesonden (ohne Einbezug der Baulinie). Bild: search.ch

Das Spital ist mit einem Fernwärmeanschluss von 260 kW ausgestattet. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt mittels Wärmepumpe aus der Abwärme der Klima- und Prozesskälte (40%) und direktelektrisch (60%). Im Sommer kann nicht alle Abwärme genutzt werden, der Rest wird über einen Rückkühler mit 240 kW Leistung bei 50/42°C an die Umgebung abgegeben.



Die Heizwärme wird, soweit möglich, mit der Abwärme aus den Wärmepumpen erzeugt. Der Rest wird aus der Fernwärme bezogen. Im Winter kann die Wärmepumpe wegen sehr begrenztem Kältebedarf nur einen kleinen Beitrag zum Heizen leisten, im Sommer wird keine Fernwärme benötigt.

Die Abbildung 8 zeigt ein vereinfachtes Schema der Heizungs- und Kältetechnischen Anlagen und die Lage der Wärmezähler. Die Daten aus den Wärmezählern wurden vom Hauswartsteam täglich manuell erfasst und dienen im Weiteren als Grundlage für die Erstellung von Lastprofilen.

Die Lüftungsanlagen sind mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, womit nur noch eine Vorwärmung und eine Nachwärmung notwendig ist.

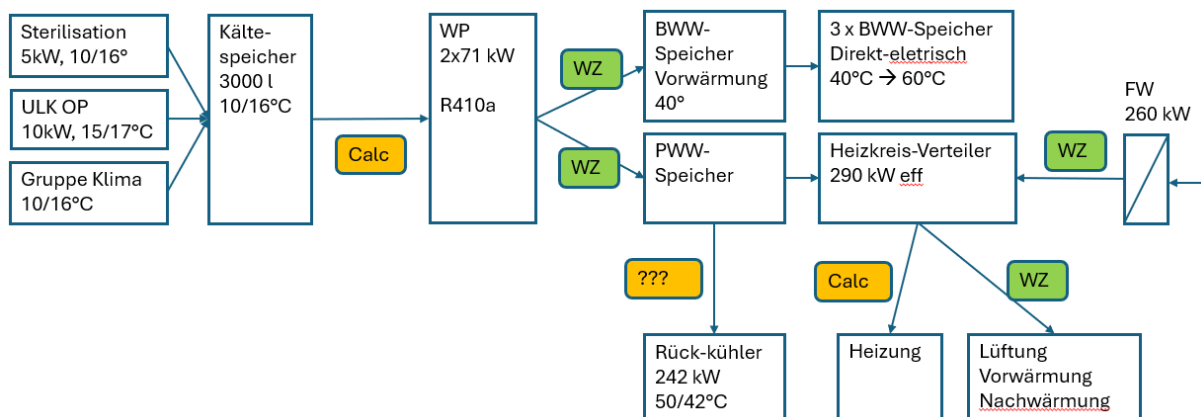


Abbildung 8: Vereinfachtes Schema der Heiz- und Kühlanlagen. Grün sind die Positionen der Wärmezähler, die Daten der gelben «virtuellen» Zähler wurde aus den bekannten Daten berechnet. Die Abwärme, welche über den Rückkühler abgegeben wird, kann nicht direkt aus den vorhandenen Daten berechnet werden.

3.3 Ermittlung des Wärme- und Kältebedarfs

Für die Simulationen werden Lastprofile benötigt. Dazu wurden aus den vorhandenen Messdaten die Verbräuche für Wärme- und Kälte ermittelt, welche dann als Grundlage für die Generierung von künstlichen Lastprofilen verwendet werden.

Die Datengrundlage umfasst die Tageswerte aus den Wärmezählern und Meteodaten.

Die Kälteleistung wurde mit den Wärmezählerdaten der beiden Wärmepumpen und der Annahme eines COP von 4 berechnet. Der Kältebedarf setzt sich aus einer Grundlast von ca. 5 kW (Prozesskälte für die Sterilisation) und der Klimakälte zusammen, welche im Tagesmittelwert bei unter 50 kW liegt.

Die Lastprofile wurden mit nPro [9] erstellt und so angepasst, dass die Tagesmittelwerte der Leistung mit den gemessenen Tageswerten (Energie / 24) übereinstimmen. Die Abbildungen Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Tagesmittelwerte der Kälte- und Heizleistung bei verschiedenen Aussentemperaturen für die Messungen (links) und das künstliche Lastprofil (rechts). Für die Heizleistung ist die Korrelation mit der Aussentemperatur in den Messwerten gut ersichtlich, bei der Kälteleistung scheint der Peak in den Messdaten bei 15° C Aussentemperatur zu liegen. Die Abbildung 9 zeigt, dass die Kälteleistung im Sommer wider Erwarten deutlich zurückgeht und im Herbst dann wieder grösser wird. Eine Nachfrage beim Hauswart hat ergeben, dass hier vermutlich ein Fehler in der Steuerung vorliegt, die Leistung sollte deutlich grösser sein.

Bei der Heizleistung werden die höchsten Leistungen zwischen 0 und 5°C erreicht. Die Ursache dafür konnte nicht abschliessend ermittelt werden. Eine Ursache könnte jedoch sein, dass die Wärmezähler zu diesem Zeitpunkt später als üblich ausgelesen wurden und daher mehr als 24h abdecken. Dafür spricht, dass die mittlere Leistung am folgenden Tag jeweils deutlich niedriger ist.

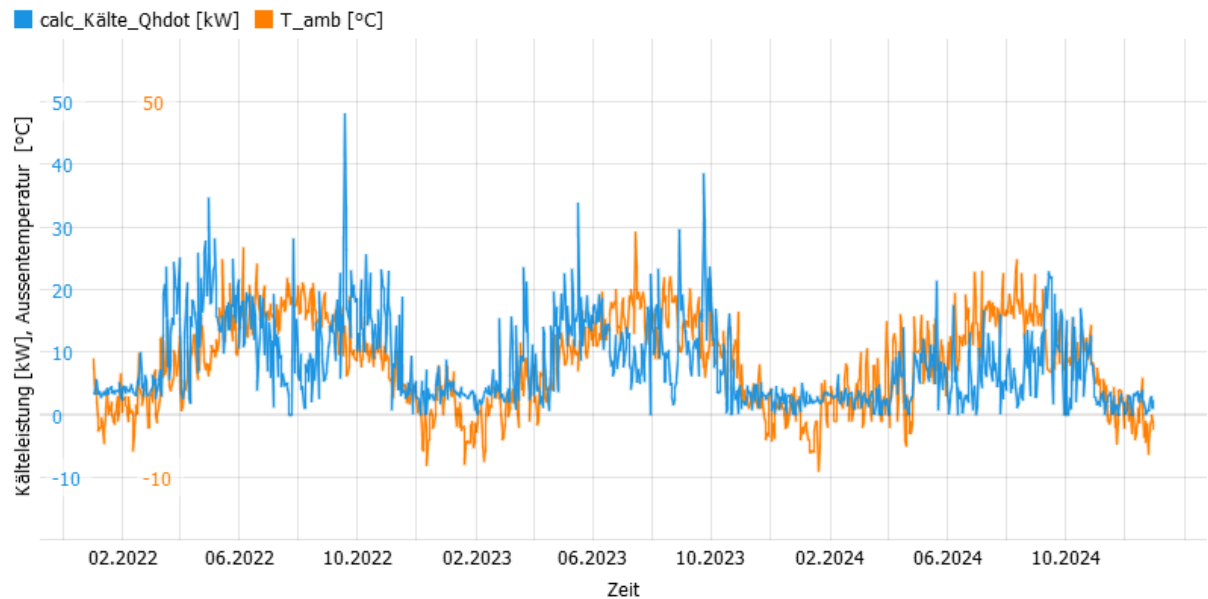


Abbildung 9: Verlauf der Kälteleistung und der Aussentemperatur (Tagesmittelwerte) über drei Jahre.

In Tabelle 1 sind die Jahressummen der gemessenen Jahre und des künstlichen Lastprofils zusammengefasst. Das Verhältnis Abwärme zu Quellenwärme berücksichtigt die Arbeitszahl der Wärmepumpe/Kältemaschine ($COP = 4$, $EER = 5$) aus dem Kälte- und Wärmebedarf.

Tabelle 1: Energiewerte des künstlichen Lastprofils im Vergleich zu den Messwerten

| | <i>künstl. Lastprofil</i> | <i>Messungen</i> <i>2022</i> | <i>2023</i> | <i>2024</i> |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| Wärme [MWh] | 596.0 | 601.5 | 576.15 | 583.071 |
| Kälte [MWh] | 90.0 | 95.04 | 73.56 | 48.24 |
| Kälte / Wärme | 15% | 16% | 13% | 8% |
| Abwärme / Quellenwärme | 24% | 25% | 20% | 13% |

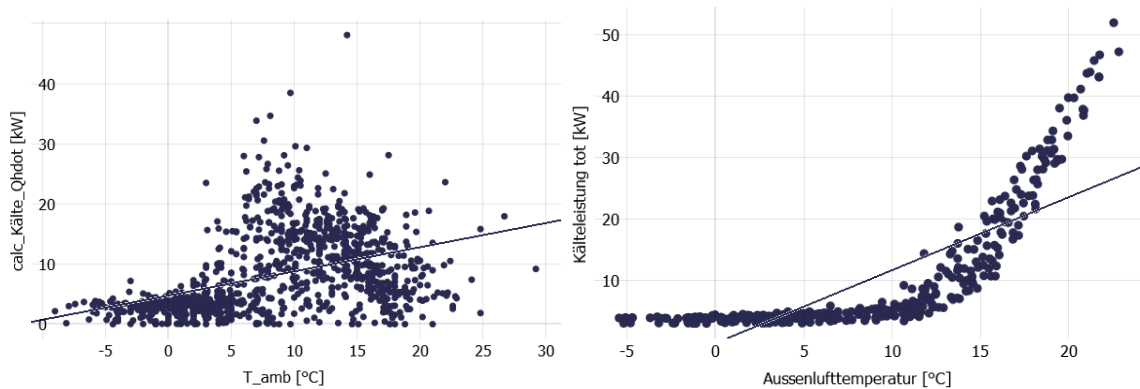


Abbildung 10: Tagesmittelwerte der Kälteleistung in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Links: Messung. Rechts: generiertes Lastprofil

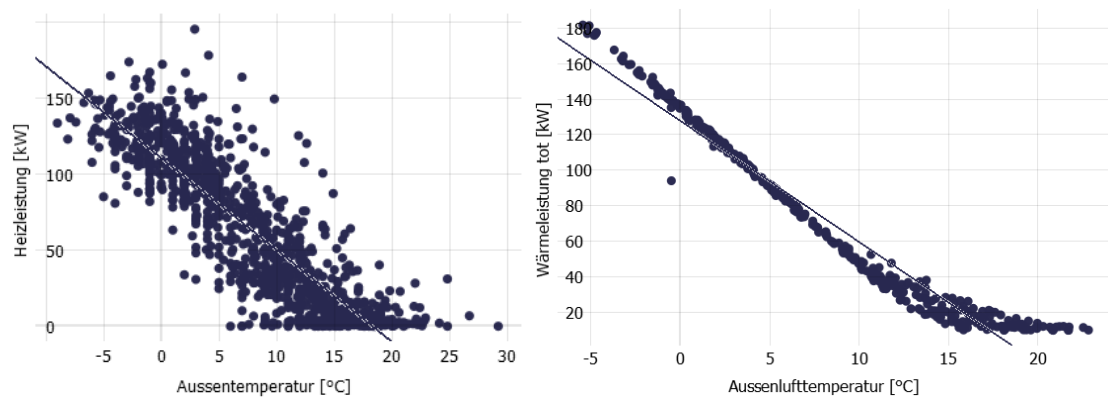


Abbildung 11: Tagesmittelwerte der Heizleistung in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Links: Messung. Rechts: generiertes Lastprofil

Die Abbildung 12 zeigt den Energieanteil der Spitzenlast bei unterschiedlichen Leistungsanteilen.

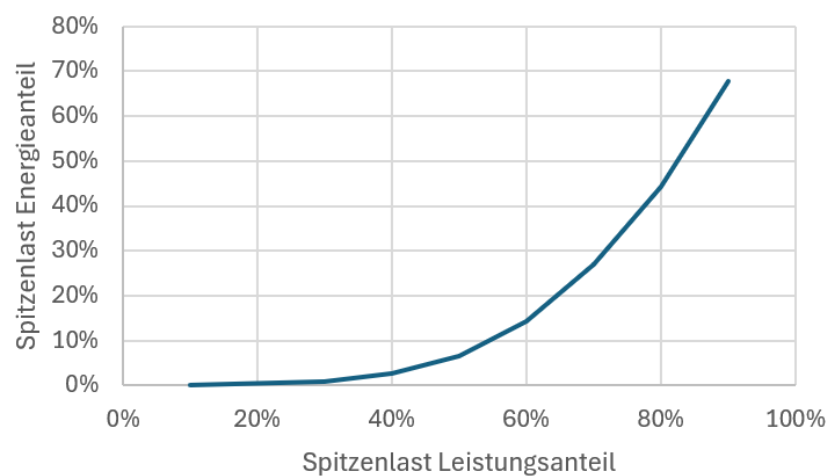


Abbildung 12: Energieanteil der Spitzenlast bei unterschiedlichen Leistungsanteilen



3.1 Integrationskonzepte

In der Begleitgruppe wurden verschiedene Integrationskonzepte für das Spital diskutiert

V1) Minimallösung mit wenigen Sonden

- Nach Kältebedarf dimensioniert
- Geringe Entlastung der Heizung

V2) Maximale Wärmepumpen-Nutzung

- WP-Leistung von 140 kW maximal nutzen
- Sonden nach WP-Leistung dimensionieren

V3) Fläche maximal nutzen

- Maximal Sonden bohren
- Rückspeisung ins Netz (wenn möglich)
- WP-Leistung erhöhen auf Quellenkapazität

V4) zusätzliche EWS-Regeneration über das Netz

- «virtueller» Case, da dies nur Sinn macht in einem Verbund mit Abwärme, welche im Sommer nicht genutzt werden kann.

In der Diskussion haben sich dann Präferenzen für die einzelnen Varianten herausgeschält.

V1 kann ein Businesscase für die Energie 360° AG sein, ist jedoch für die Fallstudie Thusis nicht so entscheidend, da hier die Kälte schon vorhanden ist (Rückkühler) und der Kältebedarf wegen der alpinen Lage nicht so gross ist. Bei anderen klimatischen Bedingungen (Mittelland, Alpensüdseite) oder wenn noch keine Kältequelle vorhanden ist (Neubau, Umnutzung) ist die Variante allfällig attraktiv. Daher werden die Simulationen auch mit anderen Wetterprofilen durchgeführt.

V2 könnte mit einem Blick in die Zukunft interessant sein, wenn die Ressource Holz knapp wird. Die Erdwärmesonden übernehmen dabei auch einen Teil der Grundlast und damit einen wesentlich grösseren energetischen Anteil. Eine Forschungsfrage dabei ist, wieviel Wärme aus den Sonden ausserhalb der Spitzenlastzeit entnommen werden kann, ohne dabei die Spitzenlastfähigkeit allzu stark einzuschränken.

V4 hat in der realen Fallstudie keine Bedeutung, wird jedoch als virtueller Case untersucht für Situationen, in denen viel Abwärme, z.B. aus einer KVA, vorhanden ist, welche im Sommer sonst ungenutzt an die Luft abgegeben werden muss.

3.1 Potentialabschätzung mit EWS-Simulationen

Für eine erste Potentialabschätzung wurden für das Integrationskonzept V2 Simulationen mit «EWS» [10] durchgeführt. Dafür wurde aus dem generiertem Lastprofil der Wärmebedarf und der Wärmeeintrag in die Erdwärmesonden ermittelt. Der Wärmebedarf Heizen und Brauchwarmwasser wurde dafür zusammengefasst, ebenso die Klimakälte und die Prozesskälte. Bis zu einer Leistung von 130 kW (50% der heutigen Fernwärmeanschlussleistung) wird dabei aus der Fernwärme gedeckt, erst bei höheren Leistungen springt die Wärmepumpe ein. Der Kältebedarf wird jedoch stets über die Wärmepumpe abgedeckt und deckt damit einen Teil des Wärmebedarfs. Übersteigt die Kondensatorleistung aus der Kälteproduktion den Wärmebedarf wird die Differenz in das EWS-Feld abgegeben. Benötigt die Wärmepumpe mehr Verdampferleistung als Kälte im Gebäude benötigt wird, so wird die Differenz aus dem Sondenfeld entzogen.

Die damit ermittelte Wärme- und Kälteproduktion wurden als monatliche Werte mit einem COP von 4 und einem EER von 5 in «EWS» übertragen. Die Tabelle 2 zeigt die für die Simulation verwendeten monatlichen Energiewerte für den Kühlbetrieb und den Spitzenlast-Heizbetrieb der Wärmepumpe (die



Wärmenergie umfasst die Raumwärme und die Brauchwarmwasseraufbereitung). Das EWS-Feld deckt damit 6% des Jahreswärmebedarf und 36% des Jahreskältebedarfs. Die restliche Kälte wird direkt, ohne dass eine Zwischenlagerung im EWS-Feld notwendig ist, via Wärmepumpe der Heizenergie zugeführt, weshalb sie in dieser Bilanz nicht auftaucht.

Tabelle 2: Monatswerte mit Volllaststunden und Jahresbilanz des Wärme- und Kältebedarf

| Monat | Heizenergie | | Kühlenergie | Monat | Heizenergie | | Kühlenergie |
|-------|-------------|-----|-------------|-------|-------------|-----|-------------|
| | [kWh] | [h] | [kWh] | | [kWh] | [h] | [kWh] |
| Jan | 13'119 | 102 | 0 | Jul | 0 | 0 | 11'018 |
| Feb | 8'468 | 66 | 0 | Aug | 0 | 0 | 8'934 |
| Mrz | 2'288 | 18 | 0 | Sept | 0 | 0 | 1'237 |
| Apr | 418 | 3 | 439 | Okt | 569 | 4 | 0 |
| Mai | 0 | 0 | 1'963 | Nov | 2'317 | 18 | 0 |
| Jun | 0 | 0 | 8'400 | Dez | 10'751 | 84 | 0 |

| | | | Heizen | Kühlen | | |
|-----------------|---------------------------|--|----------------|--------|--------|------|
| Jahrestotal | Heizenergie / Kühlenergie | | kWh | 37'930 | 31'991 | |
| COP / EER | | | | 4 | 5 | |
| Jahrestotal | EWS Entzug / EWS Eintrag | | kWh | 28'448 | 38'389 | |
| Verhältnis | | | Eintrag/Entzug | | | 135% |
| Leistung | | | kW | 128 | 67 | |
| Volllaststunden | | | h | 296 | 477 | |

| | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--|-----|---------|--------|
| Totalbedarf | Nutzenergie | | kWh | 595'952 | 90'000 |
| Anteil der Spitzenlast am Totalbedarf | | | % | 6% | 36% |

Das Sondenfeld mit 7x200 m wurde in zwei Ausführungen definiert (Abbildung 13):

- «Verteilt»: Die Sonden wurden auf dem verfügbaren Bereich möglichst weit auseinandergesetzt. Der Abstand beträgt ca. 10-15 m
- «Kompakt»: Die Sonden wurden mit einem Abstand von 5 m möglichst eng aneinandergesetzt

Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung: 2 W/mK, Wärmeleitfähigkeit Erdreich: 2.4 W/mK, Dichte Erdreich: 2600 kg/m³, Spez. Wärmekapazität Erdreich 1000 J/kgK



Abbildung 13: Sondenfeld «Verteilt» (links) und «Kompakt» (rechts)

Die Simulationen wurden für die beiden Felder jeweils mit und ohne 2-tägigem Dauerbetrieb Ende Februar durchgeführt. Die Abbildung 14 zeigt die Sondentemperaturen für die Variante «Verteilt» mit Dauerbetrieb Ende Februar. Die minimale Sondentemperatur stabilisiert sich schon im ersten Betriebsjahr



und sinkt nicht weiter ab. Wird jedoch der Kühbetrieb ausgeschaltet, also das Sondenfeld nicht regeneriert, sinkt die Temperatur über 50 Jahre auf $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Diese Auskühlung ist verhältnismässig gering im Vergleich zu monovalent betriebenen EWS-Feldern, was zeigt, dass die Regeneration bei dieser Betriebsart mit nur wenigen Volllaststunden keinen grossen Einfluss hat.

Ein deutlicher Einfluss ist jedoch durch den Stresstest mittels Dauerbetrieb von 2 Tagen sichtbar. In dieser Zeit sackt die Sondentemperatur deutlich ab. Um im verteilten Feld mit dem Stresstest die gleichen minimalen Temperaturen von $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erhalten wie mit den 200 m langen Sonden ohne Stress-test müssten die Sonden auf 265 m verlängert werden.

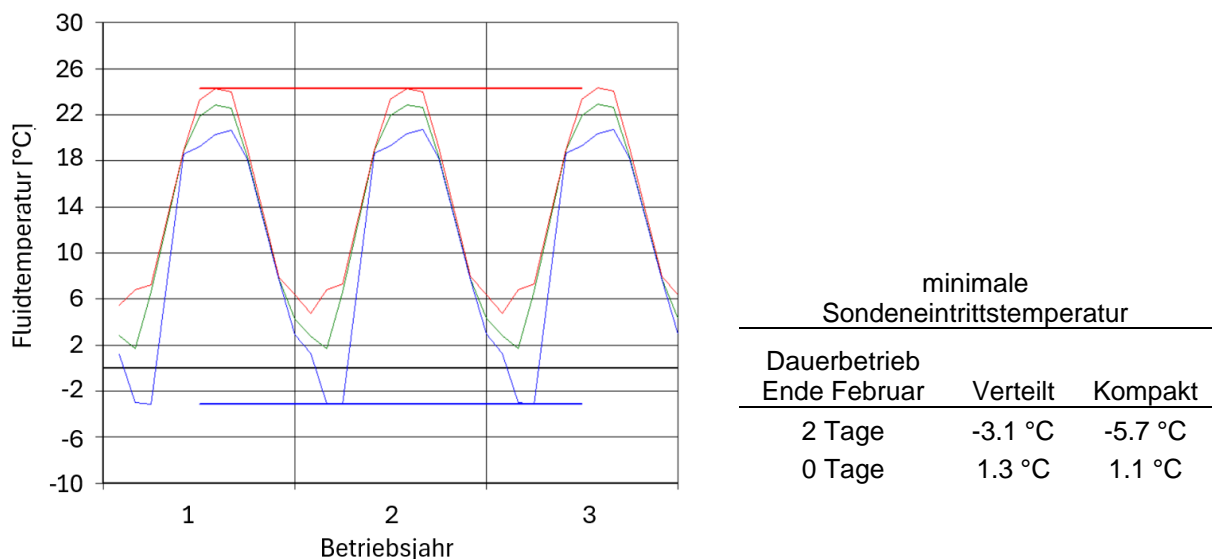


Abbildung 14: Sondenein- (blau) und Austrittstemperaturen (rot) und mittlere Temperatur (grün) für das verteilte Feld mit Dauerbetrieb 2 Tage Ende Februar.

Zum Vergleich wurde eine Simulation als monovalentes EWS-System, also ohne Fernwärmeanschluss, durchgeführt, ebenfalls mit 2 Tage Dauerbetrieb Ende Februar. Die Kälte wird weiterhin soweit möglich direkt genutzt. Es sind 24 Erdwärmesonden mit einer Länge von 290 m notwendig (Abstand 10 m), um nach 50 Jahren die minimale Eintrittstemperatur von $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht zu unterschreiten. Die im Spitzenlastbetrieb notwendige totale Sondenlänge beträgt damit 20% der im monovalenten Betrieb notwendigen Sondenlänge. Ohne Regeneration der Sonde durch die Abwärme müssen die 24 Sonden auf 305 m abgeteuft werden.

Eine weitere Simulation wurde mit dem verteilten Feld, jedoch ohne Regeneration durch die Kälte durchgeführt. Die Sondentemperatur sinkt dabei um ca. 1 K über 50 Jahre.

3.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den mehrjährigen Messdaten der Energieverbräuche des Spitals konnten Lastprofile generiert werden. Durch das alpine Klima ist der Kältebedarf mit 15% des Gesamtwärmebedarfs eher gering, zumal 2/3 der Kälte als Quellenenergie für die Wärmeproduktion direkt genutzt werden können. Für einen Spitzenlastbetrieb von 128 kW, resp. 50% der Gesamtwärmeleistung ergibt sich ein Spitzenlast-Wärmebedarf von 6% oder rund 38 MWh gegenüber einem Kältebedarf von 32 MWh, welcher nicht zeitgleich genutzt werden kann.

Erste Simulationen zeigen, dass der Spitzenlastwärmebedarf mit 7 EWS à 200 m gedeckt werden kann. Dies entspricht 20% der totalen Sondenlänge wie für einen alleinigen Betrieb mit EWS (24x290 m, ohne Fernwärme) benötigt würden. Die Simulation zeigt eine Sensitivität auf die ununterbrochene 2-tägige Betriebsdauer bei maximaler Leistung (Stresstest). So liegt die minimale Sondentemperatur mehr als 4 K höher, wenn der Stresstest nicht durchgeführt wird. Im weiteren Projektverlauf werden Lösungen



durch eine andere Dimensionierung oder Regelung gesucht, um dieser Herausforderung gerecht zu werden.

In der Jahresbilanz wurden ca. 35% mehr Wärme in das Feld eingespeist als daraus entzogen. Die minimale Sondentemperatur stabilisiert sich schon nach dem ersten Betriebsjahr bei $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ und steigt über 50 Jahre nur minim um 0.2 K an. Ohne Regeneration durch den Kältebedarf sinkt die minimale Temperatur um 1 K über 50 Jahre ab. Trotz der alpinen Lage und dem dadurch eher geringen Kältebedarf ist also der Effekt der Regeneration ersichtlich. Im weiteren Projektverlauf wird das Spital virtuell in wärmere Lagen (Mittelland, Tessin) versetzt, um zu untersuchen, wie sich Veränderungen im Wärme- und Kältebedarf auf die Dimensionierung und die Sondentemperaturen auswirken. Im Weiteren wird eine zusätzliche Regeneration über die Fernwärme untersucht, was für Wärmeverbünde, welche aus Abwärme (z.B. KVA) gespiesen werden, eine interessante Option darstellt.



4 Fallstudie Wallisellen

4.1 Vorgehen und Methoden

Für die Fallstudie wurden zunächst eine Kältebedarfsanalyse sowie Lastprofile für Wärme und Kälte erstellt. Diese Lastprofile werden in nPro mit typischen Wetterdaten am Standort Zürich erstellt [11]. Diese Profile bilden die Grundlage für den Bedarf in den Polysun-Simulationen und stellen sicher, dass die Modellierung auf möglichst realitätsnahen Bedarfskurven basiert. In Polysun werden die Profile als Summe des Bedarfs im Netz direkt verwendet und die Deckung dieses Bedarfs in der Simulation anschliessend für unterschiedliche Szenarien angepasst. Darüber hinaus werden die erstellten Lastprofile auch in weiteren Projekten und Analysen der Fallstudie eingesetzt.

4.2 Analyse Kältebedarf und bestehende EWS

Für die spätere Simulation und Analyse wurde der Wärme- und Kältebedarf in Wallisellen untersucht. Im Projekt RegEWS¹ wurde der Wärmebedarf der potenziell angeschlossenen Häuser auf etwas über 42 GWh berechnet. Der Kältebedarf beträgt etwas über 9 GWh und fällt vor allem im Industriegebiet an. Für die Analyse des Kältebedarfs wurden nur Gebiete analysiert, welche sich im Perimeter des geplanten Wärmenetzes befinden. Da der Kältebedarf im Siedlungsgebiet sehr gering ausfällt und aufwändig zu erschliessen wäre, wurde schlussendlich nur der Kältebedarf im Industriegebiet einbezogen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Profile für die Simulation wurden in nPro generiert und die Gebiete mit möglichem Kältebedarf werden in Abbildung 15 dargestellt.

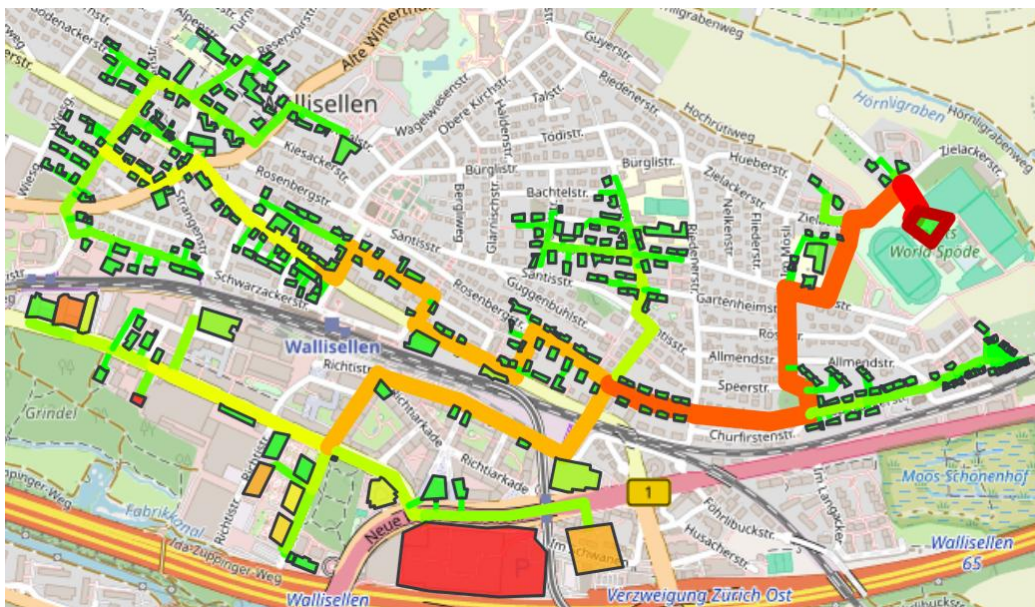


Abbildung 15: Kältebedarf der Häuser in Wallisellen, welche im Perimeter des Wärmenetzes sind.

¹ Internes Projekt mit der Werke Wallisellen mit genauerer Betrachtung des EWSF als saisonaler Speicher.



Tabelle 3: Analyse des Wärme- und Kältebedarfs in Wallisellen sowie deren Maximalleistung.

| | Alle am Netz | nicht am Netz | Totaler Bedarf mit Gebäude mit EWS |
|---------------|--------------|---------------|------------------------------------|
| Kühlung [MWh] | 9'016 | 224 | 9'137 |
| Leistung [kW] | 7'185 | 274 | 7'341 |
| Wärme [MWh] | 42'419 | | 49'400 |
| Leistung [kW] | 16'924 | | 18'757 |

Da Erdwärmesonden zentral und auch dezentral zur Spitzendeckung analysiert werden, wurden mögliche Orte für dezentrale Erdwärmesonden sowie bestehende im Wärmenutzungsatlas [8] untersucht. In Abbildung 16 wird eine Übersichtskarte mit den bestehenden Sonden dargestellt.

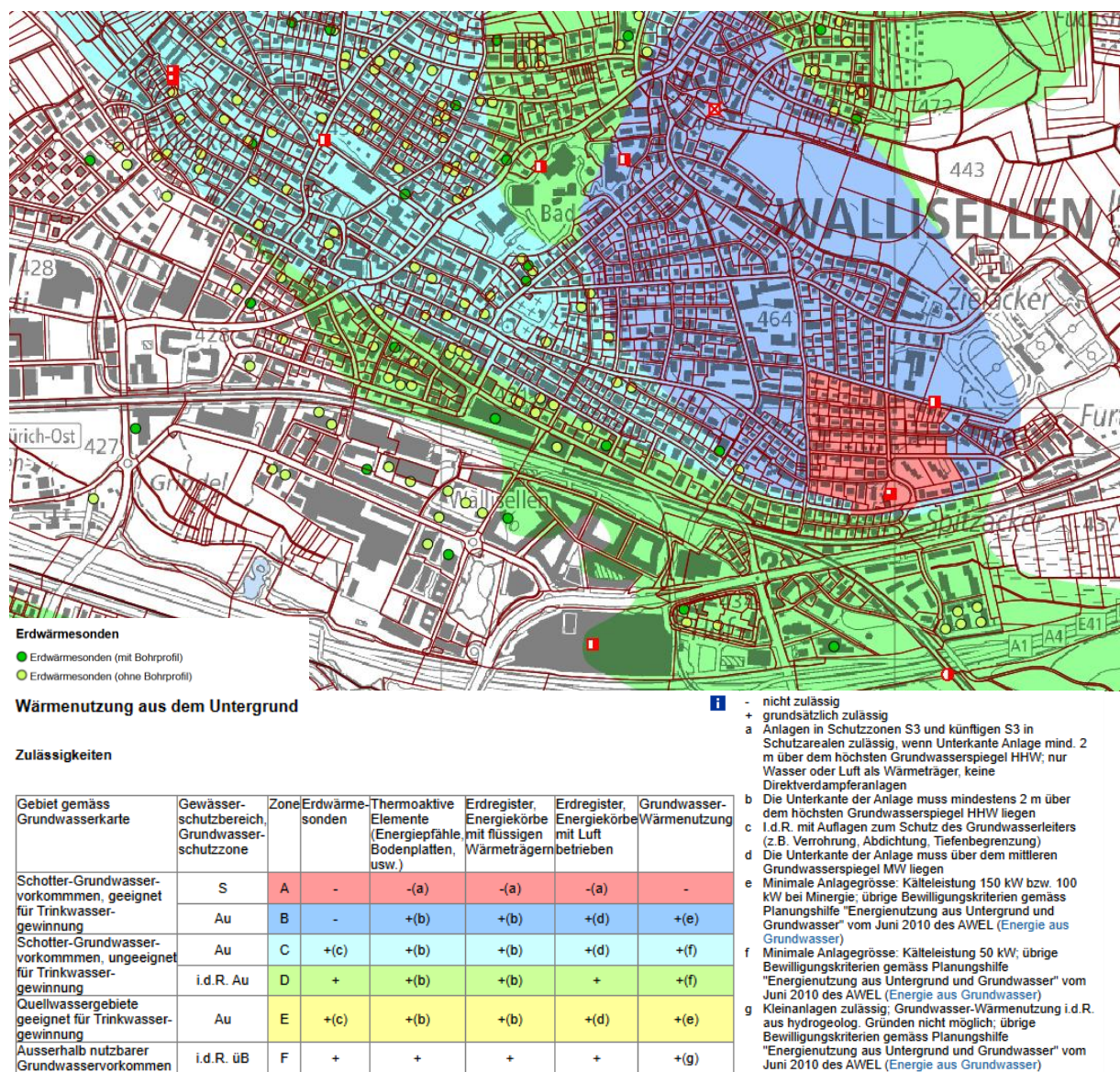


Abbildung 16: mögliche Gebiete für dezentrale Erdwärmesonden sowie bestehende Erdwärmesonden.



In Wallisellen gibt es bereits viele Erdwärmesonden-Bohrungen, in der Nähe des Wärmenetzes insgesamt 712. Allein das Richti-Areal hat 232 Sonden. In Tabelle 4 werden die wichtigsten energetischen Parameter aller Erdsondenfelder im Perimeter des Netzgebietes zusammengefasst. Diese Sonden weisen eine gesamte Entzugsleistung von über 7.4 MW und eine Wärmeeintragsleistung von 5.4 MW auf. Werden nur grosse Erdwärmesondenfelder mit über 20 Erdwärmesonden in der Nähe des möglichen Kältenetzes südlich der Gleise zusammengezählt, sind dies immer noch 349 Sonden mit einer gesamten Leistung von etwa 4.7 MW. Würden diese Gebäude ebenfalls zusätzlich an das Wärmenetz angeschlossen, ergibt dies einen zusätzlichen Wärmebedarf im Netz von 7 GWh und nur einen minim höheren Kühlbedarf. Dies allerdings ohne Kühlbedarf des Richti-Areals, da dieser nicht bekannt ist und daher nicht berücksichtigt wurde.

Tabelle 4: Bestehende Erdwärmesonden und Leistung potenziell angeschlossener Gebäude.

| | ohne Richti Areal | Mit Richti Areal | Gebäude mit >20 EWS in der Nähe |
|--------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|
| Anzahl EWS | 480 | 712 | 349 |
| Leistung Entnahme [kW] | 3818 | 7476 | 4735 |
| Leistung Eintrag [kW] | 1123 | 5405 | 4681 |
| Zusätzlicher Wärmebedarf [MWh] | | | 7000 |
| Zusätzlicher Kältebedarf [MWh] | | | 120 |

4.1 Lastprofile

Für die Untersuchung der Lastspitzen und Lösungen zur Spitzendeckung sind die Lastprofile von entscheidender Bedeutung. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Lastprofile für Fernwärmenetze erstellt und mit verschiedenen Tools analysiert und ausgewertet wurden. Es handelt sich dabei um Lastprofile, welche sich durch die Aggregation von vielen Fernwärmeanschlüssen an einem Netz herausbilden, d.h. die Peaks sind schon geglättet.

4.1.1. nPro – District Energy Planning Tool

Für die Simulationen wurden von nPro [9] generierte Lastprofile verwendet. Die betreffenden Gebäude wurden ursprünglich in einer ersten, von dWW in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie mit TopGrid [12] ermittelt und anschliessend mittels eines geoJSON-Files in nPro importiert. Folglich wurden die Energieverbräuche und Leistungsspitzen pro Jahr für jedes Gebäude aus der Machbarkeitsstudie übernommen. nPro generiert Lastprofile anhand dieser Werte, des Gebäudetyps, der automatisch als Wohngebäude deklariert wird, sowie der Aussentemperatur. Für die Lastprofilgenerierung wurden typische Wetterdaten für den Standort Zürich aus nPro verwendet. Die in Abbildung 17 dargestellte Tagesverteilung findet bei nPro Anwendung. Es wurde festgestellt, dass die Raumwärme sowie das Warmwasser eine hohe Leistungsspitze am Morgen und am Abend aufweisen, während die Nachtstunden eine Absenkung der Leistung zeigen. Die Morgenspitze tritt am Wochenende mit einer gewissen Verzögerung, jedoch in einer erhöhten Form auf (Samstag und Sonntag weisen eine starke Ähnlichkeit in ihrem Verlauf auf). Der Kältebedarf ist länger auf einem Maximum am Nachmittag. Aufgrund der automatischen Deklaration der Gebäude in nPro als Wohngebäude und der entsprechenden Tagesverteilung können die Profile insbesondere für Industriegebäude, Einkaufszentren oder Büros abweichen, was den Grossteil der Gebäude betrifft. Büros und Einkaufszentren weisen an den Arbeitstagen in nPro allerdings einen sehr ähnlichen Tagesverlauf wie die Wohngebäude auf.

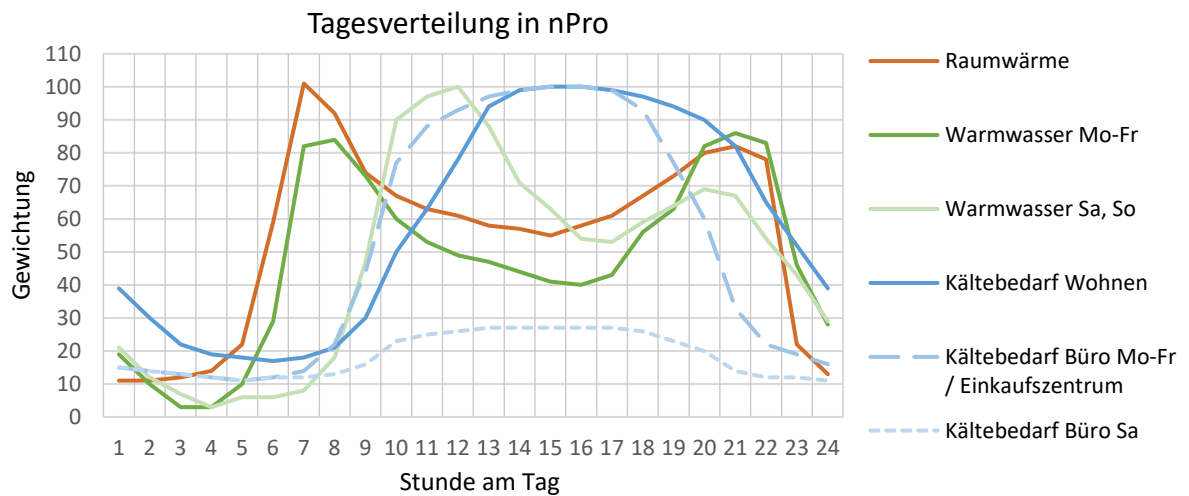


Abbildung 17: Tagesverteilung des Bedarfs von Raumwärme, Warmwasser und Kälte in den von nPro generierten Profilen.

In Abbildung 18 werden die stündlichen Leistungswerte im Netz bei entsprechender Aussentemperatur dargestellt. Die Wärmeleistung umfasst die Wärmeerzeugung für Raumwärme und Warmwasser, jedoch keine Prozesswärme. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Maximalleistungen und jährlichen Energien sowie der festgelegten Tagesverteilung und meteorologischen Wetterdaten wurden die Profile entsprechend generiert. So liegt die Heizgrenze geschätzt bei etwa 22 °C. Die vorliegenden Kälteprofile scheinen eine Kühlgrenze von 10 °C aufzuweisen. Da der Kältebedarf grösstenteils nicht von Wohngebäuden kommt, kann dieser weniger abhängig von der Aussentemperatur sein.

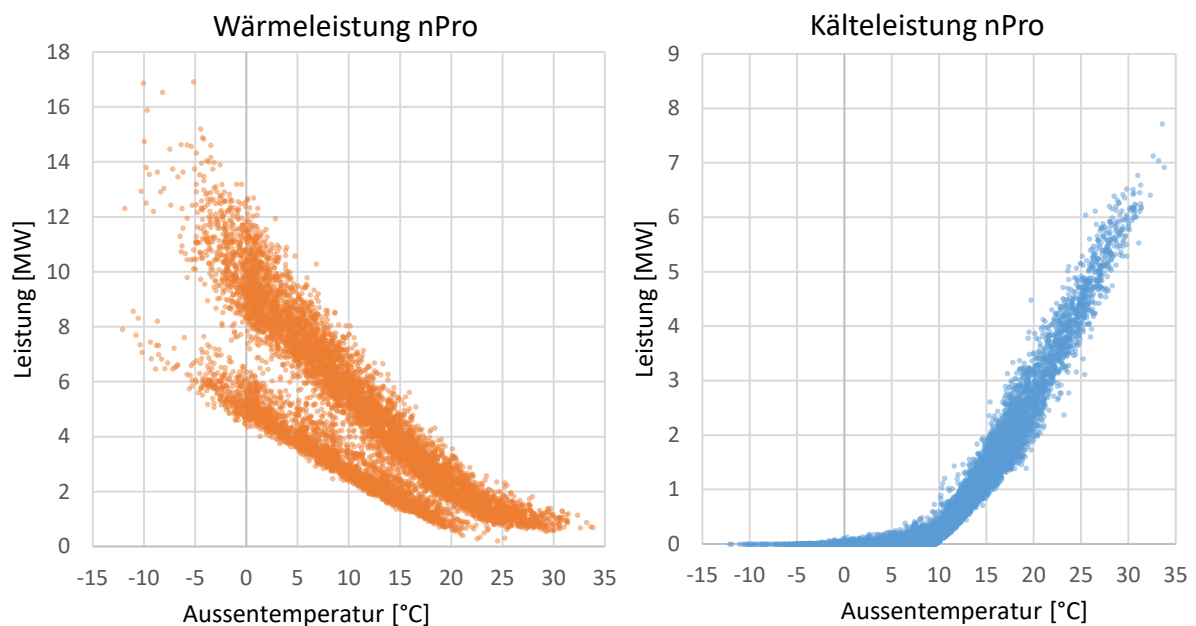


Abbildung 18: Wärme- (links) und Kälteleistung (rechts) nach Aussentemperatur von den in nPro generierten Lastprofilen.



4.1.2. Exceltool

Im Rahmen des Projektes SwissSTES [13] wurde ein Excel basiertes Tool erstellt, welches zur Dimensionierung von Wärmespeichern für Wärmenetze dient. Darin können ebenfalls Wärmebedarfsprofile generiert werden. Die Tagesverteilung orientiert sich dabei an Gasverbrauchsdaten der Stadt Zürich und die Verteilung von Warmwasser an VDI 6002 [14]. Für die Wetterdaten wird das «normale» DRY (design reference year) am Standort Zürich aus der SIA 2028 [15] verwendet. Es werden zusätzlich noch 10% Verluste zum Wärmebedarf dazu gerechnet. Aus den in nPro generierten Profile wurde eine Heizgrenze von 22 °C abgeschätzt und der Anteil der Raumwärme auf ca. 91% und der des Trinkwarmwasser auf 9% festgelegt. Diese Werte wurden auch für das Erstellen der Profile im Excel Tool übernommen.

Zusätzlich kann im Exceltool die Ausprägung von Tagesspitzen mit einem Faktor noch entsprechend skaliert werden. Bei einem Faktor von 0 wird die durchschnittliche Verteilung der Gasverbräuche verwendet, bei 0.5 werden die Leistungsspitzen abgeflacht und bei 1 werden keine Schwankungen im Tagesverlauf angenommen. Dieser Faktor gilt für die Raumwärme sowie für das Warmwasser. mit einem negativen Faktor können Tagesschwankungen gar verstärkt werden, was exemplarisch für die Raumwärme, aber nicht für den Warmwasserbedarf gemacht wurde. In Abbildung 19 werden die Tagesprofile von Raumwärme und Warmwasser mit den unterschiedlichen Faktoren abgebildet.

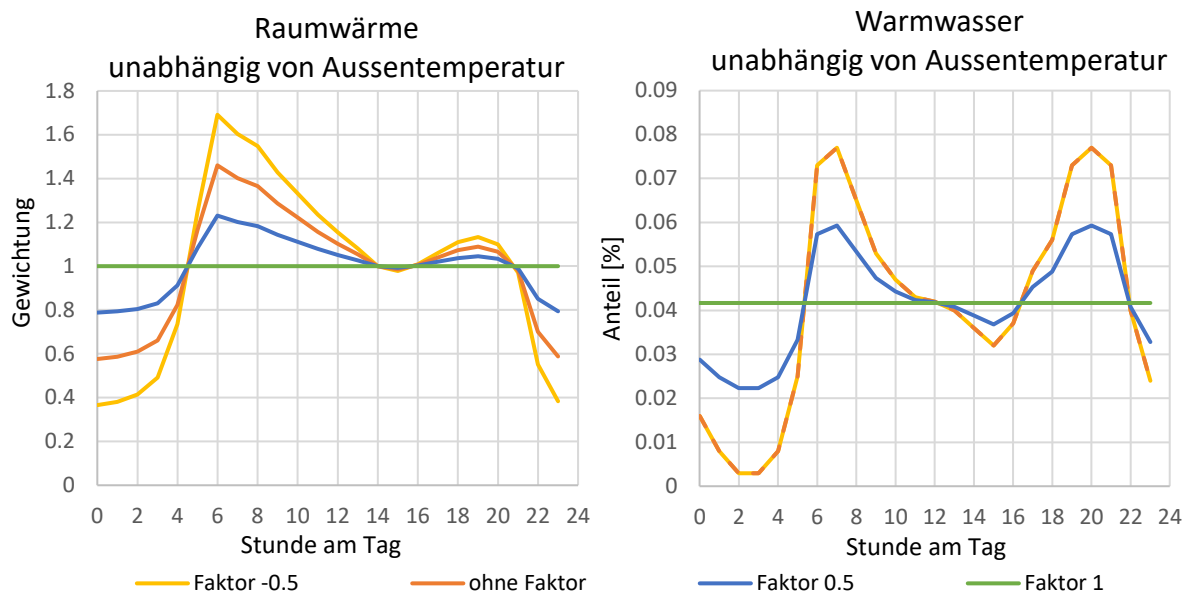


Abbildung 19: Tagesverteilung von Raumwärme (links) und Warmwasser (rechts) von den im Exceltool generierten Profilen unabhängig von der Aussentemperatur.

In den Gasverbrauchsdaten konnte eine Abhängigkeit der Tagesspitzen von der Aussentemperatur ermittelt werden, wobei sich die täglichen Schwankungen mit sinkender Aussentemperatur resp. steigendem Wärmebedarf abschwächen. Diese wurden dann zusätzlich in das Tool integriert und werden in Abbildung 20 dargestellt. An sehr kalten Tagen sind die Spitzen weniger ausgeprägt und der Wärmebedarf mehr auf den Tag verteilt. Dieser Effekt wurde mit vier Temperaturgrenzen umgesetzt. Wenn die Tagesdurchschnittstemperatur unter eine Grenze fällt, wird die entsprechende Tagesverteilung für diesen Tag verwendet. Diese vier Tagesverteilungen können ebenfalls wie die temperaturunabhängige Verteilung noch mit einem Faktor abgeschwächt oder verstärkt werden.

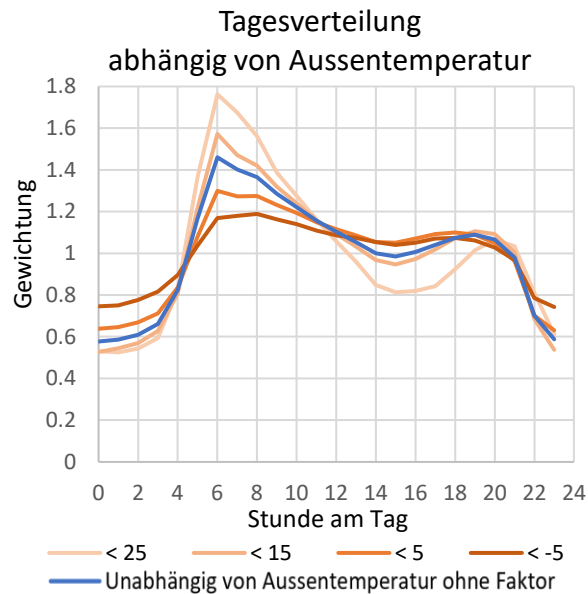


Abbildung 20: Tagesverteilung von Raumwärme abhängig von der Aussentemperatur (rot) im Vergleich zur gemittelten Verteilung (blau).

In Abbildung 21 werden die stündlichen Wärmeleistungen mit den verschiedenen Faktoren für die Tagesverteilung und unabhängig von der Aussentemperatur und in Abbildung 22 abhängig von der Aussentemperatur abgebildet. Die gewählte Heizgrenze von 22 °C ist deutlich erkennbar. Zudem ist die Abhängigkeit der Leistung von der Aussentemperatur sowie das Plateau des Warmwassers sichtbar. Die Tagesverteilung der Leistung zeigt sich in Form eines Fächers, wobei eine erhöhte Verteilung der Leistung mit sinkenden Temperaturen auftritt. Bei der Verwendung eines Faktors 1, d. h. ohne eine Tagesverteilung, sondern der Anwendung eines Tagesdurchschnitts, zeigen sich alle Leistungswerte unterhalb der Heizgrenze als linear abhängig von der Aussentemperatur (in grün).

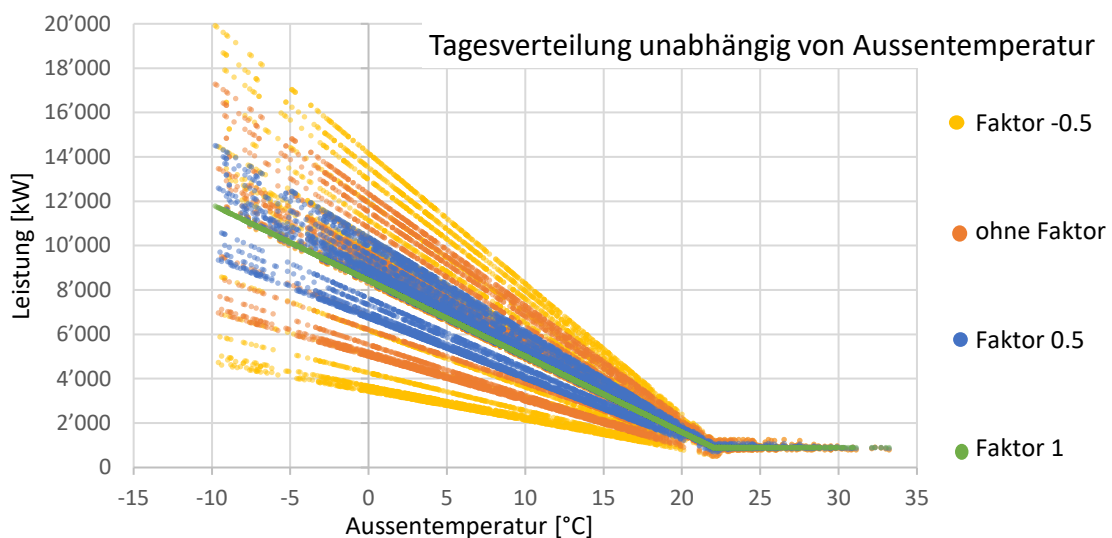


Abbildung 21: Stündliche Leistungen bei den jeweiligen Aussentemperaturen mit einer Tagesverteilung unabhängig von der Aussentemperatur und mit unterschiedlichen Faktoren.

Mit der von der Aussentemperatur abhängigen Tagesverteilung ist bereits bei höheren Aussentemperaturen eine verstärkte Fächerung zu verzeichnen. Bei höheren Temperaturen wird eine erhöhte



Leistung berechnet, während die höchsten Leistungswerte bei tiefen Temperaturen nicht mehr benötigt werden. Abgesehen davon lässt sich eine vergleichbare Tendenz mit den vier Faktoren beobachten.

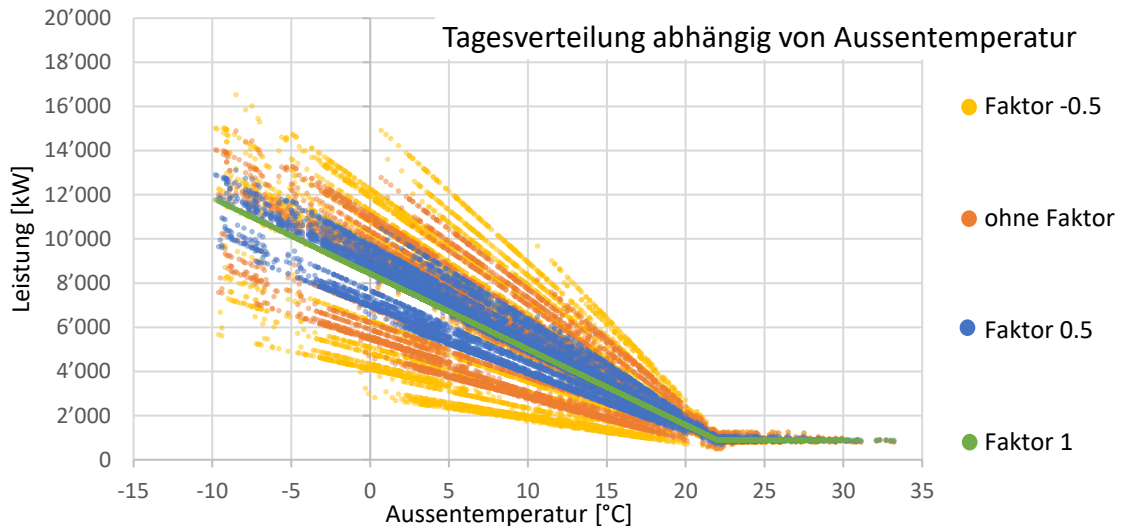


Abbildung 22: Stündliche Leistungen bei den jeweiligen Aussentemperaturen mit einer Tagesverteilung abhängig von der Aussentemperatur und mit unterschiedlichen Faktoren.

Die höheren Leistungen bei einer temperaturunabhängigen Verteilung sind auch in der Jahresdauerlinie in Abbildung 23 sichtbar. Bis auf die maximalen Leistungen sind die Jahresdauerlinien sehr ähnlich, auch mit verschiedenen Faktoren.

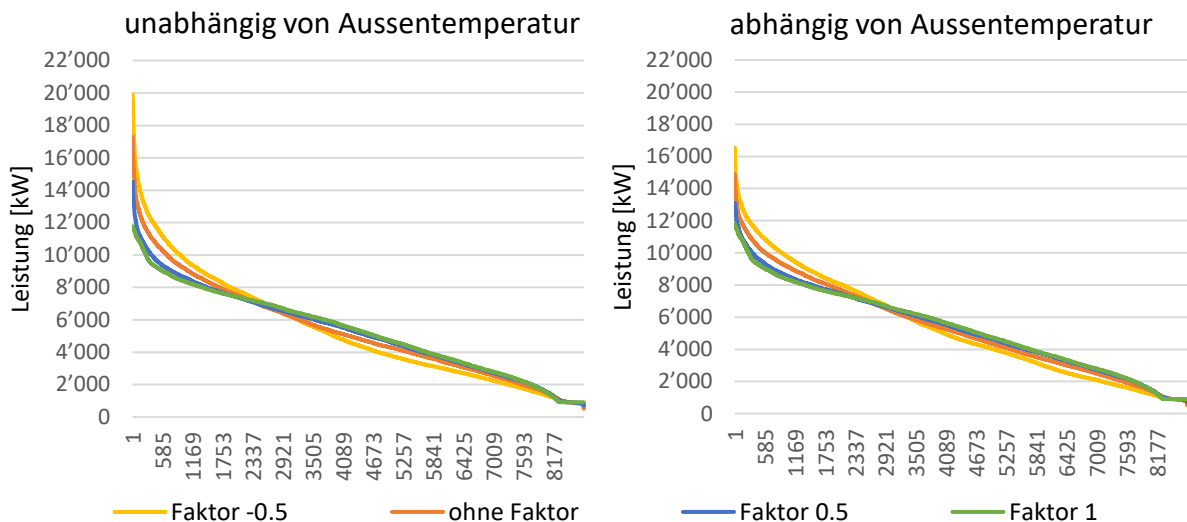


Abbildung 23: Jahresdauerlinie mit einer Tagesverteilung unabhängig (links) und abhängig (rechts) von der Aussentemperatur sowie mit unterschiedlichen Faktoren.

4.1.3. Vergleich

In Abbildung 24 wird ein Vergleich der Tagesverteilung von nPro und dem Exceltool mit verschiedenen Faktoren dargestellt. Das Warmwasserprofil von nPro stimmt sehr gut überein mit dem im Exceltool verwendeten Profil der VDI 6002 überein. Beim Profil der Raumwärme allerdings sind die Morgenspitzen aus nPro stark ausgeprägt, sogar deutlicher als das Exceltool-Profil mit einer Verstärkung mit dem



Faktor -0.5. Es zeigt sich also, dass die automatisch mit nPro generierten Profile eine sehr hohe Ausprägung von Tagesschwankungen aufweisen.

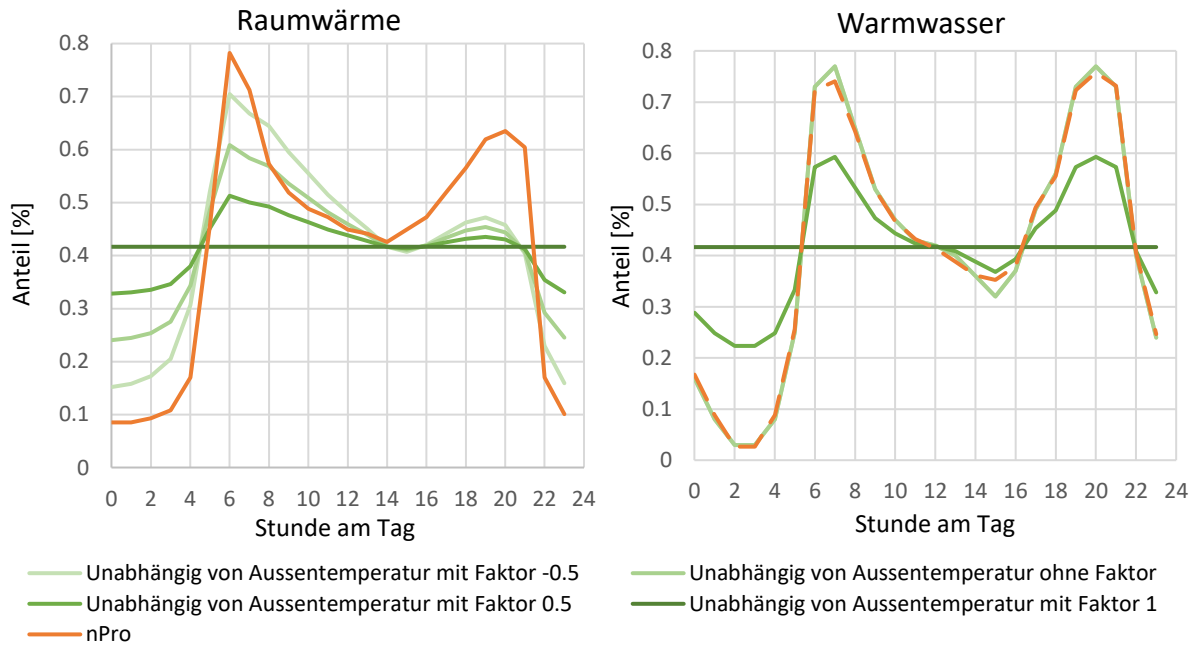


Abbildung 24: Vergleich der Tagesverteilung von Raumwärme und Warmwasser mit dem Exceltool berechnet mit unterschiedlichen Faktoren und von nPro generiert.

In Abbildung 25 werden die stündlichen Leistungen bei der jeweiligen Aussentemperatur mit den Profilen von nPro und vom Exceltool abhängig und unabhängig von der Aussentemperatur verglichen. Es sind ähnliche Trends zu sehen, wobei der lineare Zusammenhang des Excel Tools zu sehen ist und der Algorithmus von nPro eine gewisse Streuung der Punkte verursacht.

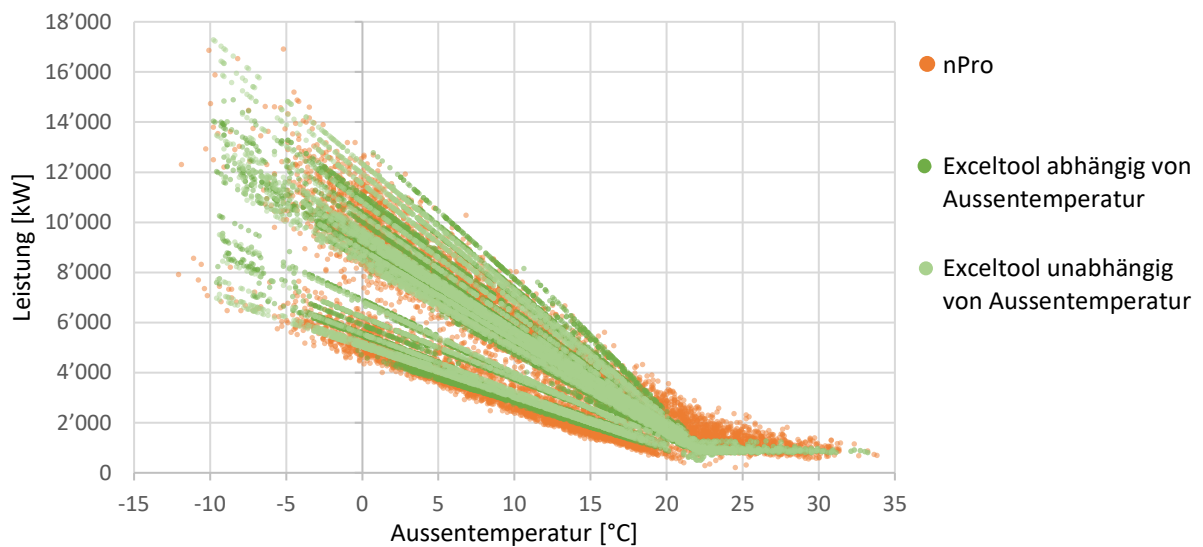


Abbildung 25: Vergleich der stündlichen Leistungen bei der jeweiligen Aussentemperatur von nPro generiert und vom Exceltool berechnet mit einer Tagesverteilung abhängig und unabhängig von der Aussentemperatur.



In Abbildung 26 werden die Jahresdauerlinie von nPro und vom Exceltool mit unterschiedlichen Faktoren (der Unterschied von temperaturabhängig und temperaturunabhängig ist nicht sehr ausgeprägt) abgebildet. nPro generiert Profile mit weniger Leistung in einem grossen Teil der Stunden im Jahr, dafür eher hohe Leistungsspitzen in ganz wenigen Stunden. Für die Berechnung im Exceltool wurden jedoch auch andere Wetterdaten als im nPro verwendet. Die tiefste Aussentemperatur im Jahr kann grossen Einfluss auf die maximale Leistung haben und die Anzahl Leistungswerte im Jahr ist ebenfalls abhängig von der Aussentemperatur.

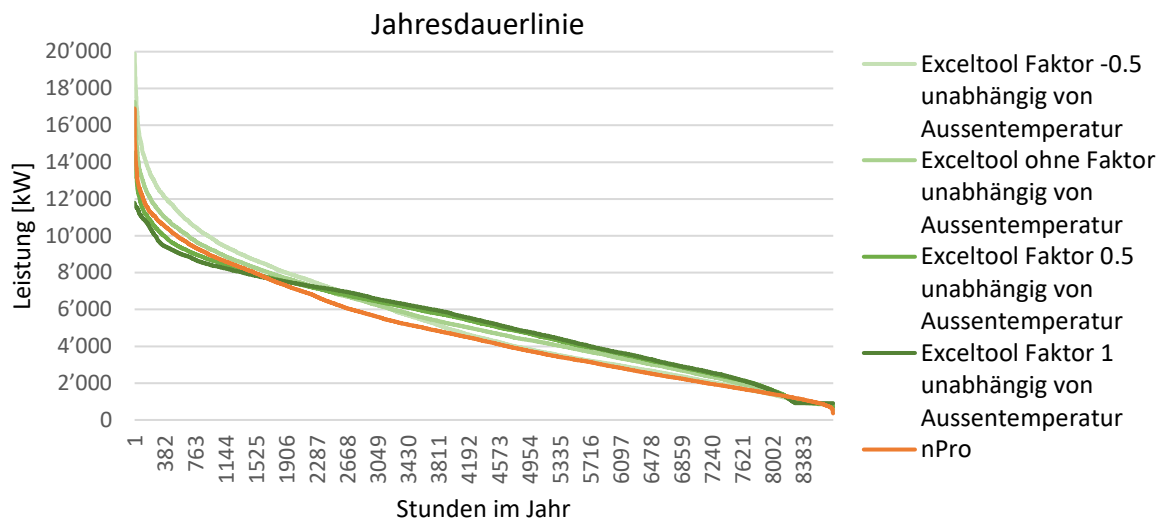


Abbildung 26: Jahresdauerlinie mit dem Profil von nPro generiert und vom Exceltool berechnet mit unterschiedlichen Faktoren in der Tagesverteilung.

Die Profile ähneln sich in ihrer grundsätzlichen Charakteristik zwar stark, jedoch zeigen sich insbesondere bei der Modellierung der absoluten Spitzen deutliche Unterschiede. Gerade diese Spitzenwerte sind für das Projekt von besonderer Relevanz, da sie maßgeblich die Ergebnisse beeinflussen können. Basierend auf den verfügbaren Gasdaten aus Zürich lässt sich vermuten, dass die morgendlichen Verbrauchsspitzen an sehr kalten Tagen deutlich weniger ausgeprägt sind. Um dieses Phänomen jedoch fundiert beurteilen zu können, fehlen bislang umfassende Untersuchungen und belastbare Datengrundlagen.

Das Excel-Tool bietet jedoch die Möglichkeit, diese Spitzenwerte gezielt zu variieren und dadurch Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Im Projekt werden weiterhin die nPro-Profile verwendet, dadurch sind die resultierenden Analysen und Aussagen möglicherweise stärker auf extreme Spitzen ausgerichtet.

4.2 Polysun Simulation und Szenarien

In der Machbarkeitsstudie (RegEWS) wurde ein innovatives Konzept für die Wärmeversorgung des Netzgebietes entwickelt, welches hier als Basis für die Einbindung dezentraler EWS übernommen wurde. Das Konzept beruht auf der Nutzung der Abwärme aus der KVA Hagenholz, welche in den Sommermonaten im Überschuss und zu sehr günstigen Preisen verfügbar ist. Diese Abwärme wird im Sommerhalbjahr direkt zur Deckung des Wärmebedarfs und zur Beladung eines zentralen Erdsondenfeldes auf 70 °C verwendet. Im Winter wird der Bedarf durch eine zentrale Wärmepumpe gedeckt, welche das Erdsondenfeld oder bei ausreichenden Aussentemperaturen auch Aussenluft als Quelle verwendet. Leistungsspitzen werden in dem Konzept mit Spitzenkessel gedeckt, welche mit Biogas betrieben werden.

Um das Potential von dezentralen Erdwärmesonden in der Unterstützung des Wärmenetzes zu Spitzenlastzeiten zu analysieren, wurden Simulationen mit der Software Polysun [16] durchgeführt. Es wurde auf die Kältebereitstellung fokussiert und daher sind die Hauptwärmequellen in allen Variationen dieselben (Schema siehe Abbildung 27). Der Wärmebedarf und das Wärmenetz wurden vereinfacht in einer Senke zusammengefasst.

Der Kühlbedarf und die Kälteerzeugung wurden mittels «Multiplikator» in die Simulation eingebunden, so dass entweder eine grosse (zentrale) Kältemaschine oder viele kleine, dezentrale Anlagen mit demselben Schema simuliert werden können. Je nach Variante, welche simuliert werden soll, werden die Komponenten der Kälteerzeugung unterschiedlich dimensioniert, angesteuert oder ausgelassen. Die hydraulische Einbindung wird daher mit dem verwendeten Schema zum Teil stark vereinfacht oder abstrahiert.

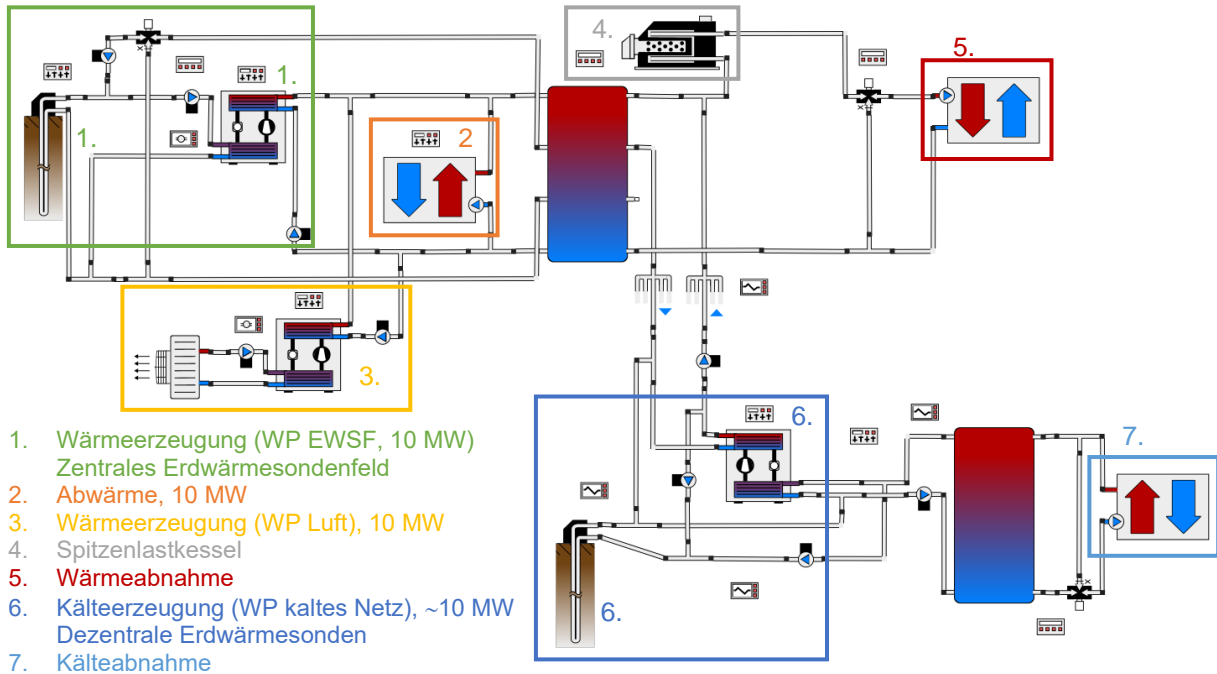


Abbildung 27: Schema des Wärmenetzes oben und des Kältenetzes unten der Variation «bestehende EWS».

Für den Vergleich verschiedener Konzepte wurden vier verschiedene Variationen untersucht. Die Referenzvariante ist ein Wärmenetz mit den vorher genannten Wärmequellen und eine davon unabhängige und individuelle Kältedeckung, wie schematisch in Abbildung 28 dargestellt wird. Die Spitzenlasten im Wärmenetz werden mit dem Spitzenlastkessel, der Kältebedarf wird nicht über ein Kältenetz, sondern individuell über Erdwärmesonden und Wärmepumpen gedeckt.

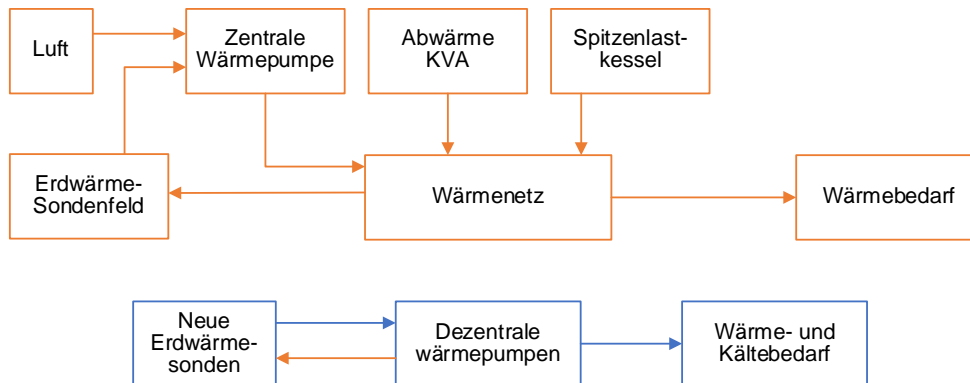


Abbildung 28: Variation "keine Netzverbindung".

Bei der zweiten Variante wird der Kältebedarf über ein separates Kältenetz gedeckt, wie in Abbildung 29 dargestellt. Dieses wird mit der zentralen Wärmepumpe gespeisen, welche in diesem Fall ebenfalls als Kältemaschine eingesetzt werden kann. Die Abwärme der Kältemaschinen wird im Sommer in das warme Netz oder in das zentrale Erdsondenfeld eingespeist. Wenn dieses keine Wärme mehr aufnehmen kann, wird die Abwärme in die Luft abgegeben. Die zentrale Kältemaschine kann in diesem Fall nur sehr bedingt zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

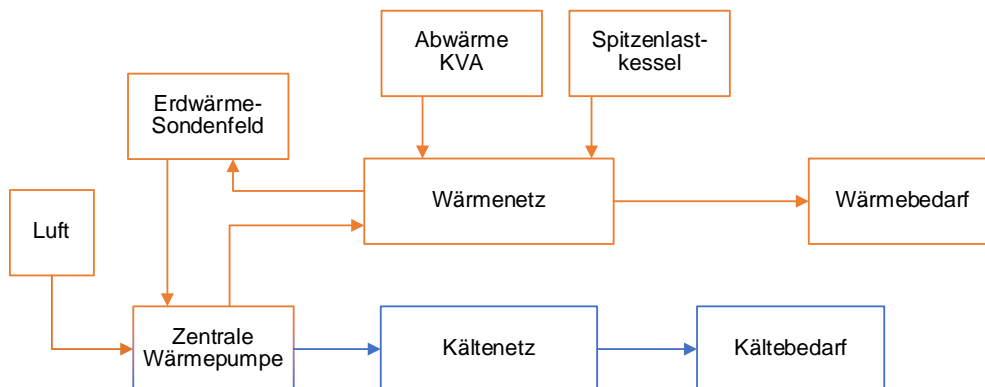


Abbildung 29: Variation "nur Kältenetz".

Eine weitere Variante deckt den Kältebedarf über dezentrale Wärmepumpen und neue Erdwärmesonden an den Orten mit Kältebedarf, wie in Abbildung 30 dargestellt. Werden die Erdwärmesonden zu warm, kann die Wärme zusätzlich in das Wärmenetz abgegeben werden. Im Winter können die dezentralen Wärmepumpen das Wärmenetz unterstützen und gleichzeitig die Erdwärmesonden für den Sommer abkühlen. Dies entspricht der in diesem vorgeschlagenen «PeakNCool»-Einbindungsvariante.

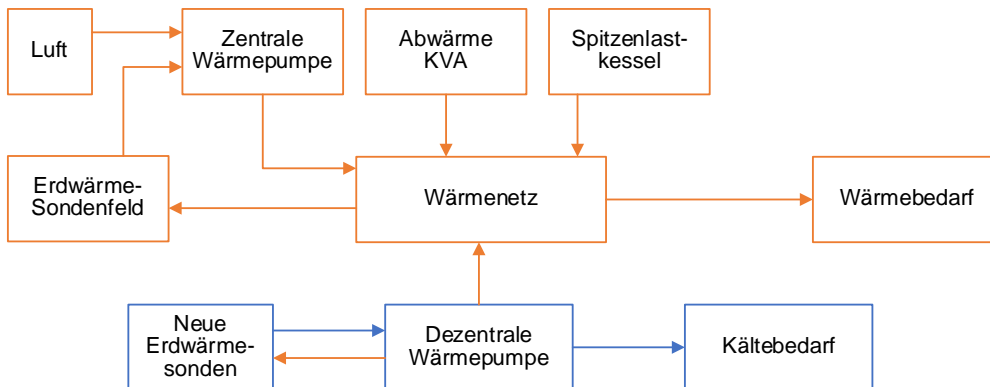


Abbildung 30: Variation "neue EWS".

Die letzte Variante ist sehr ähnlich, nur werden die bestehenden, dezentralen Erdwärmesonden für die Kältedeckung und die Speicherung der Wärme für die Unterstützung des Wärmenetzes genutzt, wie in Abbildung 31 dargestellt. Die Gebäude mit den bestehenden Erdwärmesonden würden ebenfalls an das Wärmenetz angeschlossen und somit steigt der Wärmebedarf an. Damit auch andere Kunden mit dem Kältebedarf versorgt werden können, braucht es hier aber ein Kältenetz.

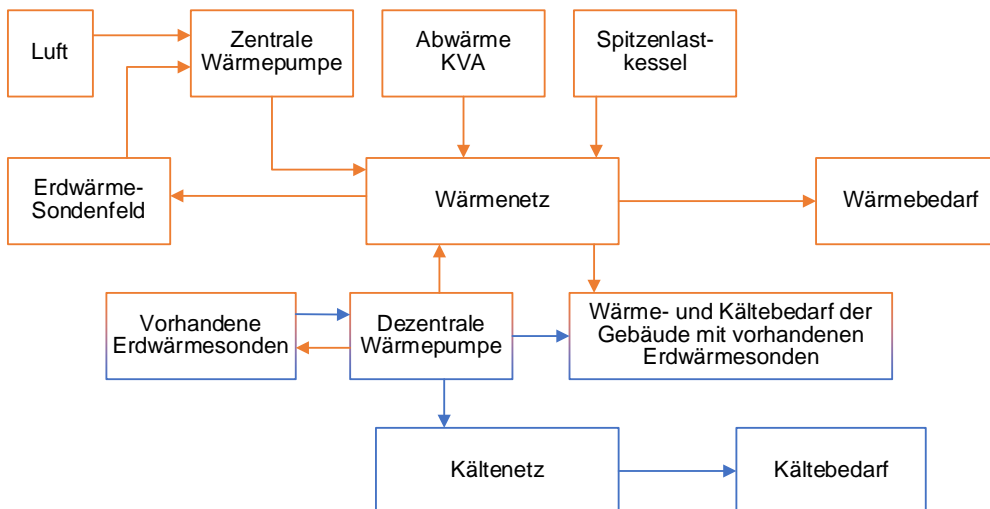


Abbildung 31: Variation "bestehende EWS".

4.3 Ergebnisse

In Abbildung 32 wird die jährliche Wärmebereitstellung im Wärmenetz durch die unterschiedlichen Quellen aller vier simulierten Variationen abgebildet. Die Variante mit bestehenden EWS hat durch den Anschluss der zusätzlichen Gebäude einen höheren Wärmebedarf. Hier abgebildet ist nur die direkte Deckung des Bedarfs, die Regeneration wird hier nicht abgebildet. Diese besteht aus etwa 19 GWh im Sommer und kommt hauptsächlich aus der KVA-Abwärme und teilweise aus der Abwärme der Kühlung im Sommer bei der entsprechenden Variante.

Die Abwärme deckt bei allen Variationen, ausser «nur über Netz» ungefähr ein Drittel der Energie direkt im Sommer oder teilweise in den Übergangsjahreszeiten. Die Wärmepumpe EWSF deckt 17 bis 24% je nach Variation und die Wärmepumpe mit Luft als Quelle etwa 23 bis 39%. Kann die Kältemaschine



die Abwärme in das Netz speisen wie bei «nur über Netz», kann diese etwa 17% des Wärmebedarfs decken, dies vor allem im Sommer, wodurch der Anteil der genutzten Abwärme aus der KVA verringert wird. Bei den Varianten mit dezentralen EWS kann die Wärme aus den dezentralen Wärmepumpen/Kältemaschine etwa 30% des Bedarfs decken. Diese dezentralen Wärmepumpen führen auch zu einer Verringerung des Gasverbrauchs von ca. 8% bei den Varianten «keine Netzverbindung» und «nur über Netz» auf lediglich ca. ein Prozent.

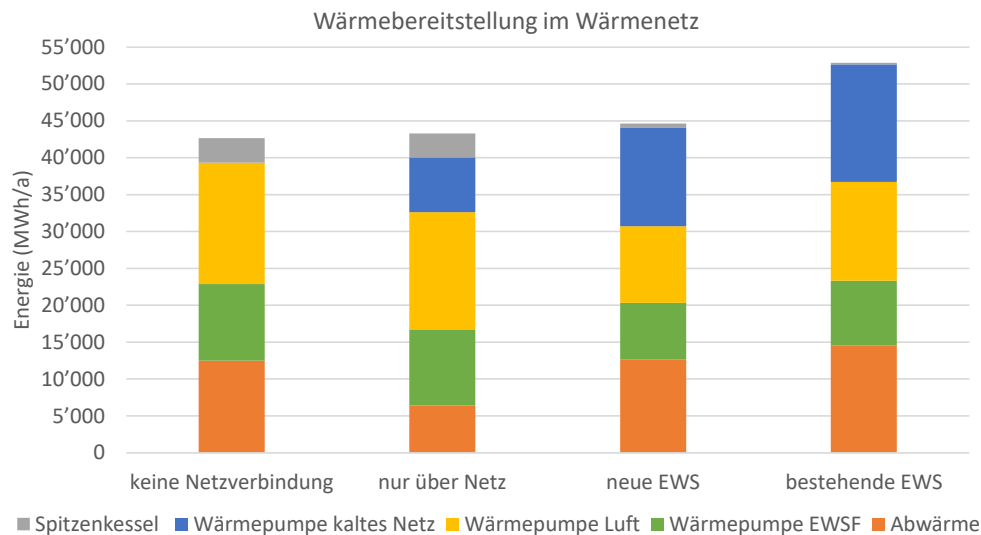


Abbildung 32: Jährliche Wärmebereitstellung im Wärmenetz der verschiedenen Variationen und Energiequellen ohne Regeneration.

Abbildung 33 und Abbildung 34 veranschaulichen den zeitlichen Verlauf der Wärmebereitstellung durch die unterschiedlichen Quellen der Varianten "nur Kältenetz" und "neue EWS". In diesen beiden Abbildungen ist die Abwärmenutzung ohne Regeneration, also nur die direkte Deckung des Wärmebedarfs durch die KVA dargestellt. Abbildung 35 zeigt die Variante "neue EWS" inklusive KVA Abwärme für die Regeneration des zentralen EWS-Feldes und der Abwärme der Kältebereitstellung.

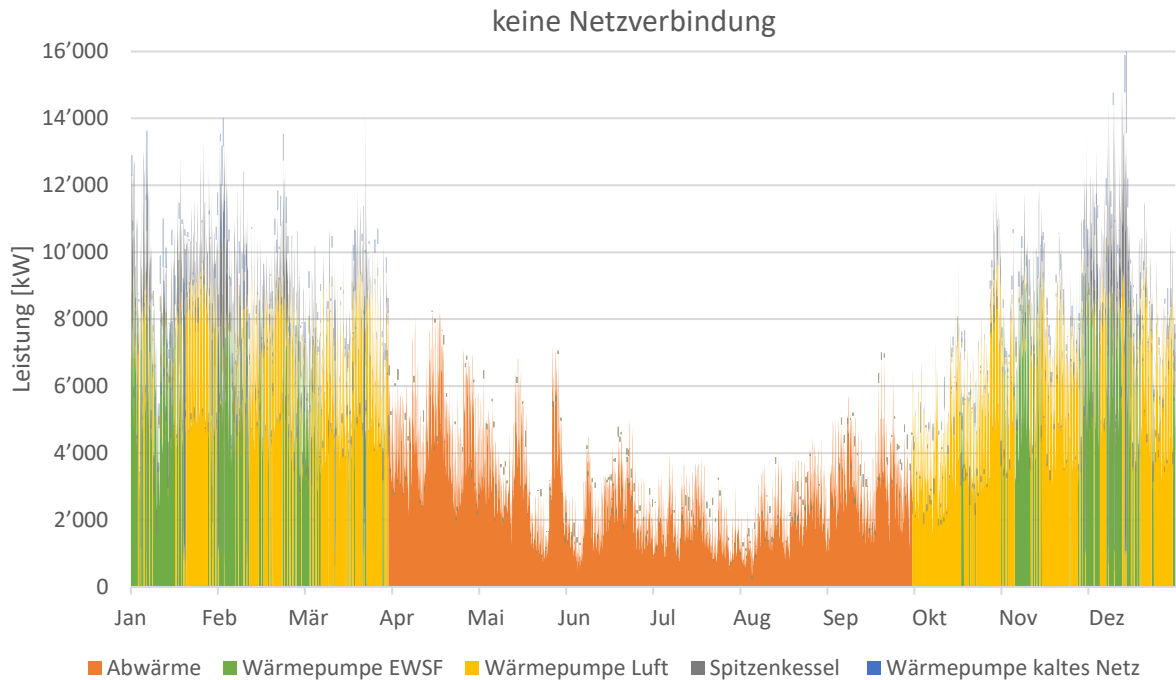


Abbildung 33: Jahresverlauf der Wärmebereitstellung über die verschiedenen Quellen der Variante "keine Netzverbindung".

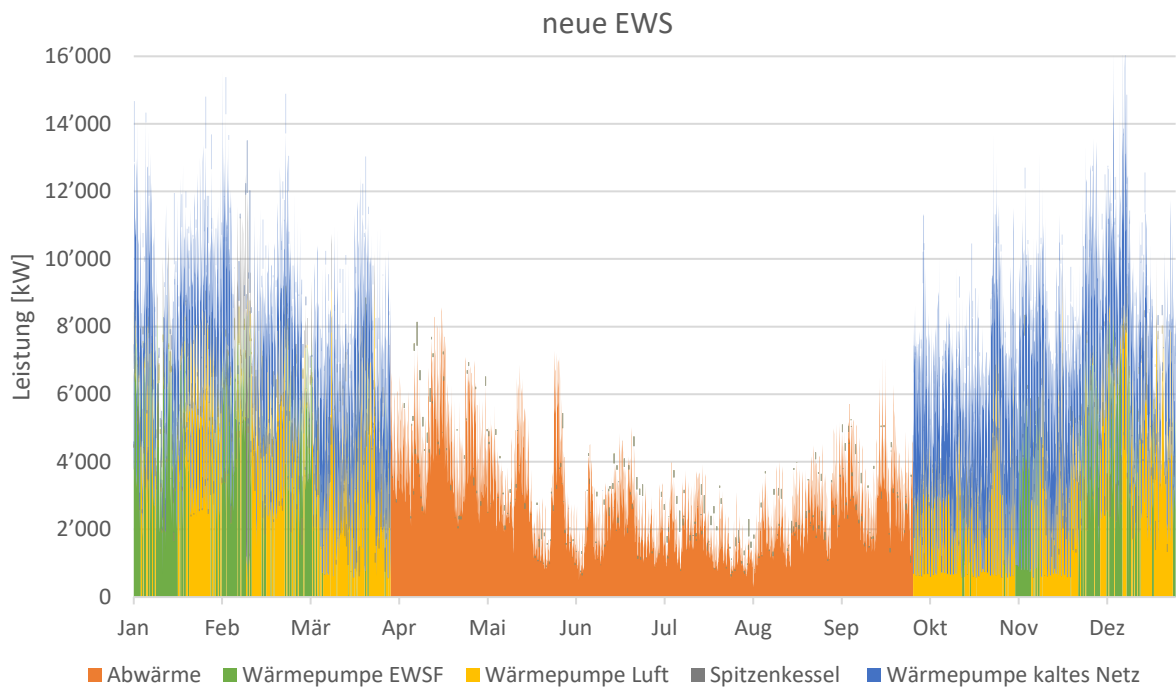


Abbildung 34: Jahresverlauf der Wärmebereitstellung (ohne Regeneration) über die verschiedenen Quellen der Variante "neue EWS".

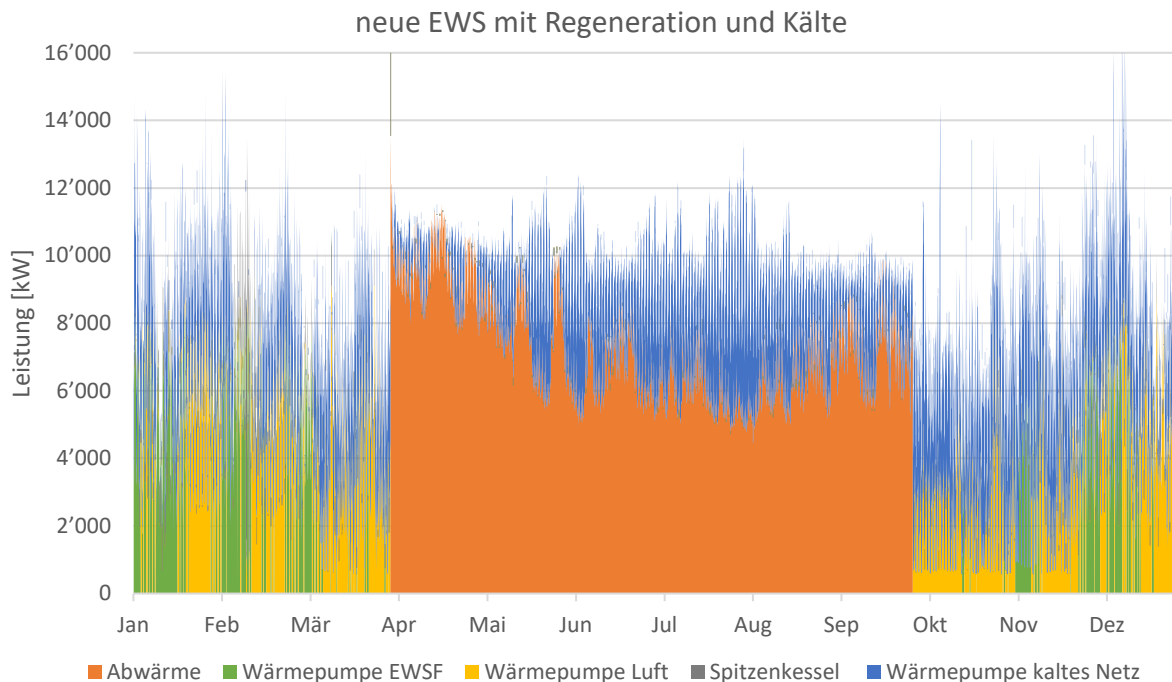


Abbildung 35: Jahresverlauf der Wärmebereitstellung für den Verbrauch und die Regeneration über die verschiedenen Quellen der Variante "neue EWS".

4.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Wärme- und Kältebedarf für das Netzentwicklungsgebiet in Wallisellen konnte aus einer bereits bestehenden Machbarkeitsstudie übernommen und mithilfe des Tools *nPro* in hochaufgelöste Jahresprofile umgewandelt und eingesetzt werden. Ein Vergleich mit einer Bedarfsmodellierung aus dem Projekt *SwissSTES* [13] zeigt jedoch, dass *nPro* bei der Profilerstellung starke tageszeitliche Schwankungen aufweist und dadurch hohe Morgenspitzen generiert. Mit dem im Projekt *SwissSTES* entwickelten Tool können Profile mit ähnlichen Verteilungen erzeugt werden; dieses erlaubt jedoch eine differenzierte Gewichtung der Tagesspitzen. Im weiteren Projektverlauf ist daher eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich unterschiedlich stark ausgeprägter Tagesschwankungen vorgesehen.

Darüber hinaus wurde das aktuelle, innovative Konzept zur Wärmebereitstellung mit einem neuen Wärmenetz für Wallisellen in die Simulationssoftware *Polysun* implementiert. Dieses Konzept wurde anschliessend mit verschiedenen Varianten der Kälteerzeugung kombiniert, die anhand dynamischer Jahressimulationen miteinander verglichen wurden. Eine Auswertung der Jahresbilanzen zeigt, dass eine dezentrale Kälteerzeugung mit Wärmepumpen, Kältemaschinen und Erdsonden (EWS) ebenfalls signifikant zur Spitzenlastabdeckung beitragen kann. Mit dem Konzept „PeakNCool“ zur Deckung des bestehenden Kühlbedarfs im Netzgebiet kann der Anteil des Spitzenlastkessels von ca. 8 % auf ca. 1 % reduziert werden. Diese ersten Simulationen zeigen grundsätzlich das energetische Potenzial des Ansatzes. Im Projektverlauf wurde zudem festgestellt, dass im Netzgebiet bereits zahlreiche bestehende Sondenfelder vorhanden sind, die gegebenenfalls an das Netz angeschlossen und als „PeakNCool“-Anlagen betrieben werden könnten.

Im weiteren Projektverlauf sind Parameterstudien zur Auslegung und Dimensionierung der einzelnen Komponenten der „PeakNCool“-Anlagen geplant. Basierend auf diesen Dimensionierungsvorschlägen können die energetischen Analysen verfeinert und Sensitivitäten ausgearbeitet werden. Zudem dienen sie als Grundlage für einen Kostenvergleich der unterschiedlichen Varianten.



5 Fallstudie Zürich

5.1 Vorgehen und Methoden

Anstatt die Effizienz des Gesamtsystems zu untersuchen, konzentriert sich dieses AP auf die Auswirkungen von dezentralen Wärmepumpen auf das Grundwasserreservoir unterhalb von Zürich. Wenn diese zur Bereitstellung von Kühlung und winterlichen Leistungsspeaks genutzt werden, Effizienzsteigerungen sind zweitrangig gegenüber der Einhaltung der gesetzlichen Beschränkungen hinsichtlich der Auswirkungen auf das Grundwasser. Die wichtigste gesetzliche Einschränkung ist die sogenannte „Drei-Kelvin-Regel“ [17], welche oft interpretiert wird als: *Die Temperaturdifferenz zum natürlichen Zustand darf sich in einer Entfernung von 100 m vom Brunnen um maximal 3 K ändern.*

Die Untersuchungen werden anhand eines dynamischen Simulationsmodells durchgeführt, welches schrittweise aufgebaut wird.

5.2 Simulationsmodell

Die anfänglichen Modellierungen konzentrieren sich daher auf ein einfaches Modell (Abbildung 33). Dieses besteht aus 1) einem Reservoir über 2) einem Grundwasserhemmer und 3) einer Hintergrundflussgeschwindigkeit. Mithilfe von zwei Brunnen 4) wird Wasser extrahiert und wieder eingespeist. Dieses Modell ist eine Modifikation des Modells, welches für eine Studie des AWEL [7] eingesetzt wurde.

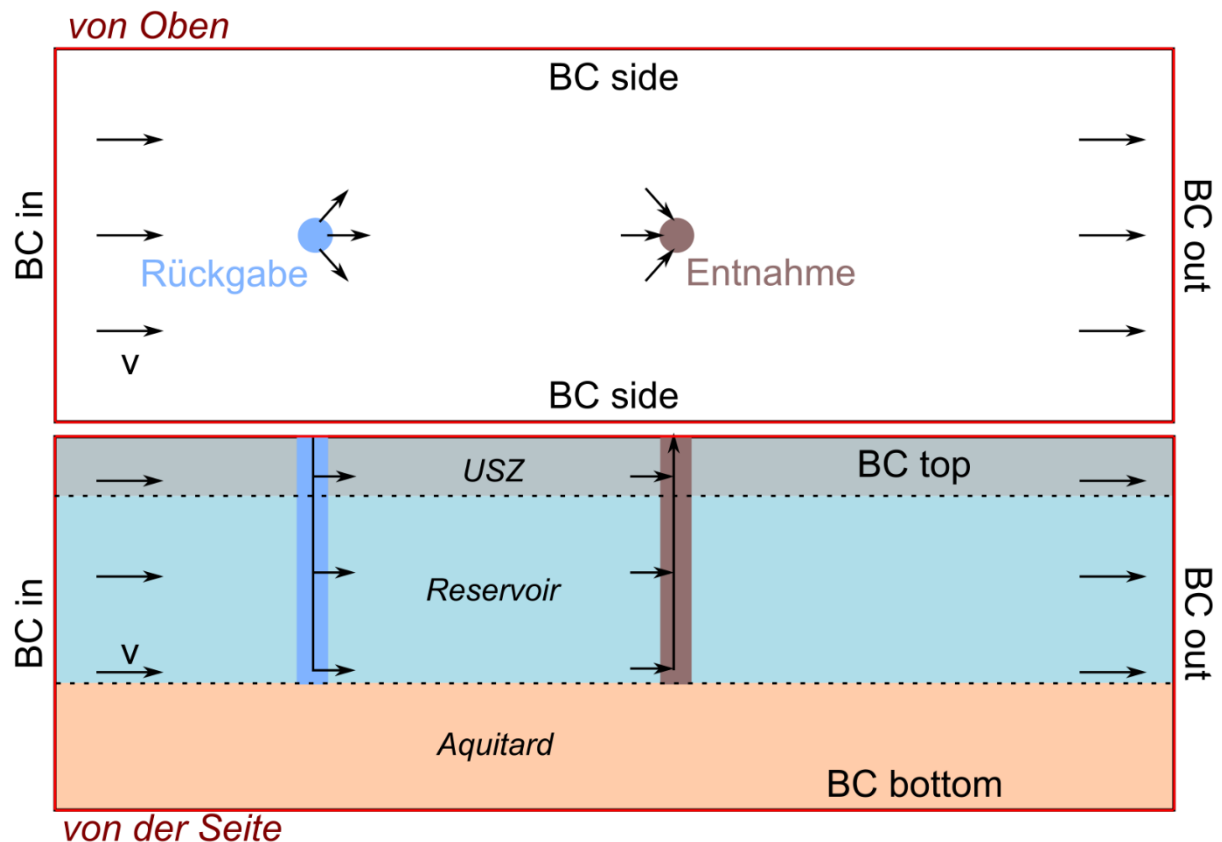


Abbildung 36: Einfaches Grundwassermodell (Modifiziert von AWEL). USZ: Ungesättigte Zone, v: Geschwindigkeit des Hintergrundflusses. BC: Randbedingungen. BC side, top, bottom sind alle ohne Wasserfluss und ohne Wärmefluss. BC in: Konstanter Fluss und Temperatur. BC out, Konstanter Fluss verlässt die Simulation.

[7]



Der Rückgabebrunnen wird stromaufwärts des Entnahmebrunnens platziert, da so sichergestellt wird, dass der grösste Teil der Wärme- oder Kältefahne in der nächsten Saison extrahiert wird[7]. Wenn sich der Rückgabebrunnen stattdessen stromabwärts des Entnahmebrunnens befindet, kann sich die thermische Fahne ungehindert ausbreiten, wie im Folgenden gezeigt wird. In diesem Fall müsste die maximale Temperaturdifferenz in der Fahne niedriger sein. Das ursprüngliche Modell von AWEL enthält auch eine ungesättigte Zone (Abbildung 33). Diese ist noch nicht Teil des aktuellen Modells und wird später implementiert.

Für die Simulationen wird MODFLOW 6 [18] (z.B. [19]) zusammen mit FloPy [18][20] als Python-Schnittstelle verwendet. Diese robuste Open-Source-Grundwassermodellierungssoftware ermöglichen die Integration mit GIS über den nationalen Massstab hinaus. Dies stellt sicher, dass alle Entwicklungen in diesem Projekt mit geringem Aufwand und ohne Lizenzkosten geteilt und erweitert werden können. Das neue Grundwasserenergie-transportmodell (GWE) [21] für MODFLOW ermöglicht die Kopplung der Grundwasserströmungsmodelle von MODFLOW mit Energiegleichungen. Dadurch kann der gekoppelte Code Diffusion, Advektion, Konvektion und Wärmespeicherung simulieren. Die ungesättigte Zone wird später mit dem UZF-Modell [22] von MODFLOW implementiert.

Die vielseitige GUI IMOD (z.B. [23]) und ihre Python-Schnittstelle imod-python [18] (z.B. [24]) wurden für dieses Projekt in Betracht gezogen und zunächst verworfen. Obwohl diese Schnittstelle und ausführliche Tutorials hilfreich gewesen wären, ist das erforderliche GWE-Modell derzeit nicht in IMOD integriert. Es ist auch unklar, ob es in Zukunft integriert wird. Lizenzierte Software (z. B. Comsol [18], FeFlow [18]) wurden für dieses Projekt verworfen, da die Modelle ohne den Erwerb der Lizenz weder ausgeführt noch visualisiert werden können. Ebenfalls wurde OpenGeoSys [18] (z.B. [25]) untersucht, aber ebenfalls verworfen, da es die Anforderungen für dieses Projekt derzeit nicht erfüllt. Für die Visualisierung wird VisIt [18] verwendet.

Abbildung 37 zeigt das anfängliche Gitter des Modells. Das Gitter wurde einfach gehalten, um die Modellinteraktionen mit geringem Rechenaufwand durchzuführen. Im weiteren Projektverlauf wird das Gitter angepasst werden, um die Modellgenauigkeiten zu verbessern. Tabelle 5 zeigt die Simulationsparameter und Tabelle 6 die zeitlichen Flüsse und Schritte. Diese Werte werden während des Projektes angepasst und nähern sich den Werten von AWEL [7] an. Bei der Rückgabe wird das Wasser mit jeweils $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber der Hintergrundtemperatur kontinuierlich zurückgespeist (konstante Leistung). In kommenden Simulationen werden die Einspeisepprofile dem Peak'n'Cool-Konzept angepasst.



Tabelle 5: Simulationsparametern

| Parameter | Wert | Einheit |
|----------------------------------|-------------|-------------------|
| Brunnenabstand | 100 | m |
| Simulationsdauer | 1 | Jahr |
| Hydraulischer Kopf BC in | 0.9 | m |
| Hydraulischer Kopf BC out | -0.9 | m |
| Longitudinale Dispersion | 5 | m |
| Laterale Dispersion | 0.5 | m |
| Thermische Leifähigkeit Wasser | 0.6 | W/(mK) |
| Thermische Leifähigkeit Gestein | 2.0 | W/(mK) |
| Wärmekapazität Wasser | 4180 | J/(kgK) |
| Wärmekapazität Gestein | 820.0 | J/(kgK) |
| Dichte Wasser | 1000 | kg/m ³ |
| Dichte Gestein | 2000 | kg/m ³ |
| Porosität | 0.1 | - |
| | | |
| Reservoir | | |
| Mächtigkeit | 25 | m |
| Hydraulische Leifähigkeit | 5e-4 | m/s |
| Spezifischer Speicherkoeffizient | 1e-4 | 1/m |
| Grundwasserhemmer | | |
| Mächtigkeit | 20 | m |
| Hydraulische Leifähigkeit | 1e-6 | m/s |
| Spezifischer Speicherkoeffizient | 1e-4 | 1/m |

Tabelle 6: Brunnenflüsse für das 1. Simulationsjahr

| | # Tage | Fluss [m³/Tag] | Rückgabe Temperatur [°C] | Zeitschritte [Tage] |
|-----------|---------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1. Winter | 120 | 25 | - 8 | 30 |
| 1. Sommer | 150 | 45 | + 8 | 30 |
| 2. Winter | 90 | 25 | - 8 | 30 |



5.3 Erste Ergebnisse

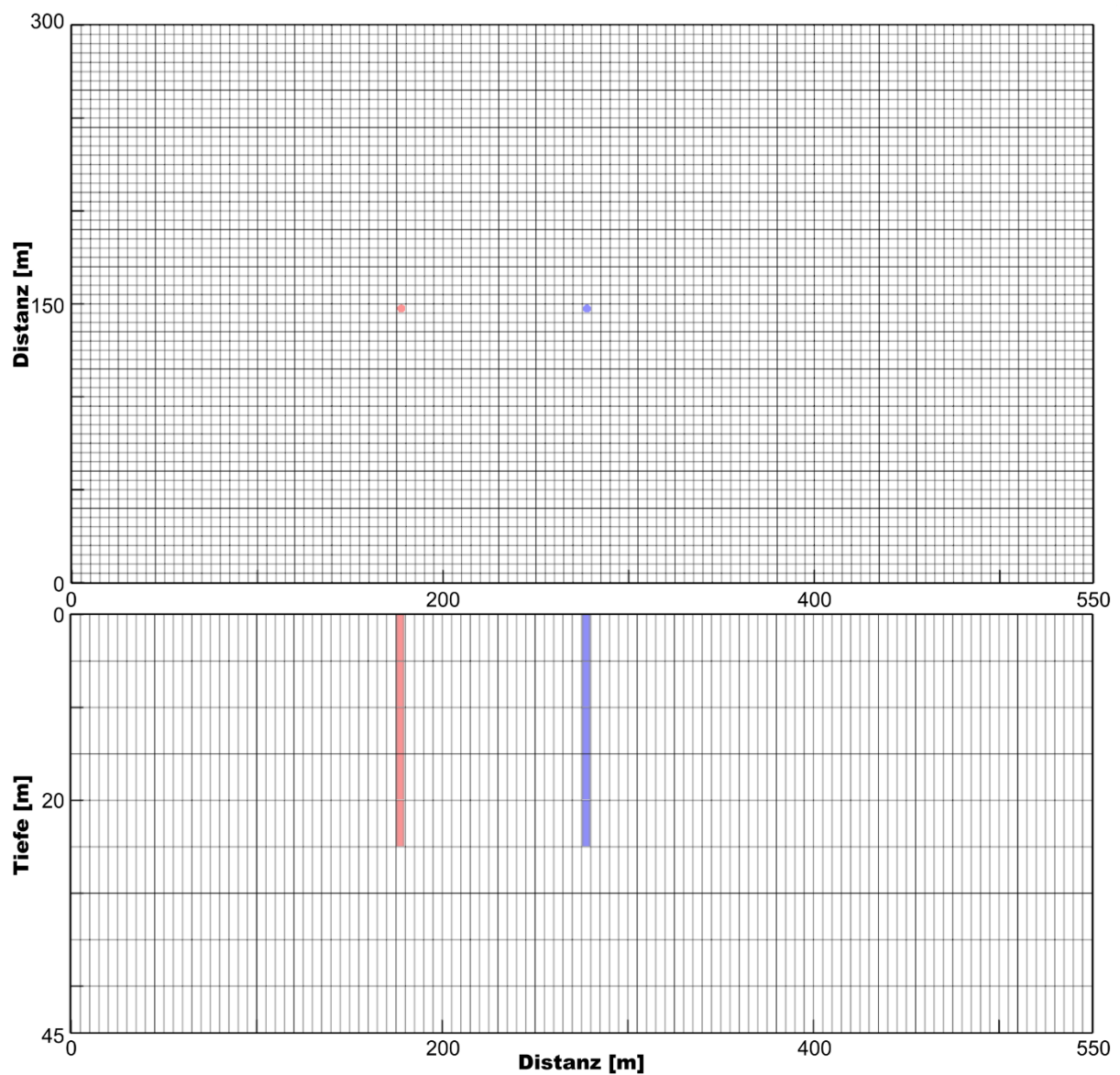


Abbildung 37: Anfängliches Simulationsgitter des Grundwassermodells. 5 m x 5 m x 5 m Zellen mit Einnahmebrunnen (Blau) und Rückgabebrunne (Rot). Das Modell ist 550 m lang, 300 m breit, und 45 m tief. Somit besteht es aus neun schichten.



Die ersten Ergebnisse für das Ausgangsmodell sind in den Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Resultaten besteht in der Brunnenplatzierung: Rückgabe stromabwärts (Abbildung 38) oder stromaufwärts (Abbildung 39). Befindet sich der Rückgabebrunnen stromabwärts des Entnahmebrunnens (Abbildung 38), findet kein Zufluss vom Rückgabebrunnen zum Entnahmebrunnen statt (fast alle Pfeile zwischen den Brunnen zeigen nach rechts). Daher können die thermischen Fahnen ungehindert von den Brunnen wegfliessen. Befindet sich der Rückgabebrunnen stromaufwärts des Entnahmebrunnens (Abbildung 39), fliesst der grösste Teil des Zuflusses vom Rückgabebrunnen in den Entnahmebrunnen. Zu Beginn der 2. Winterperiode ist aus dem ersten Winter schon nichts mehr sichtbar (vgl. Abbildung 38 und Abbildung 39).

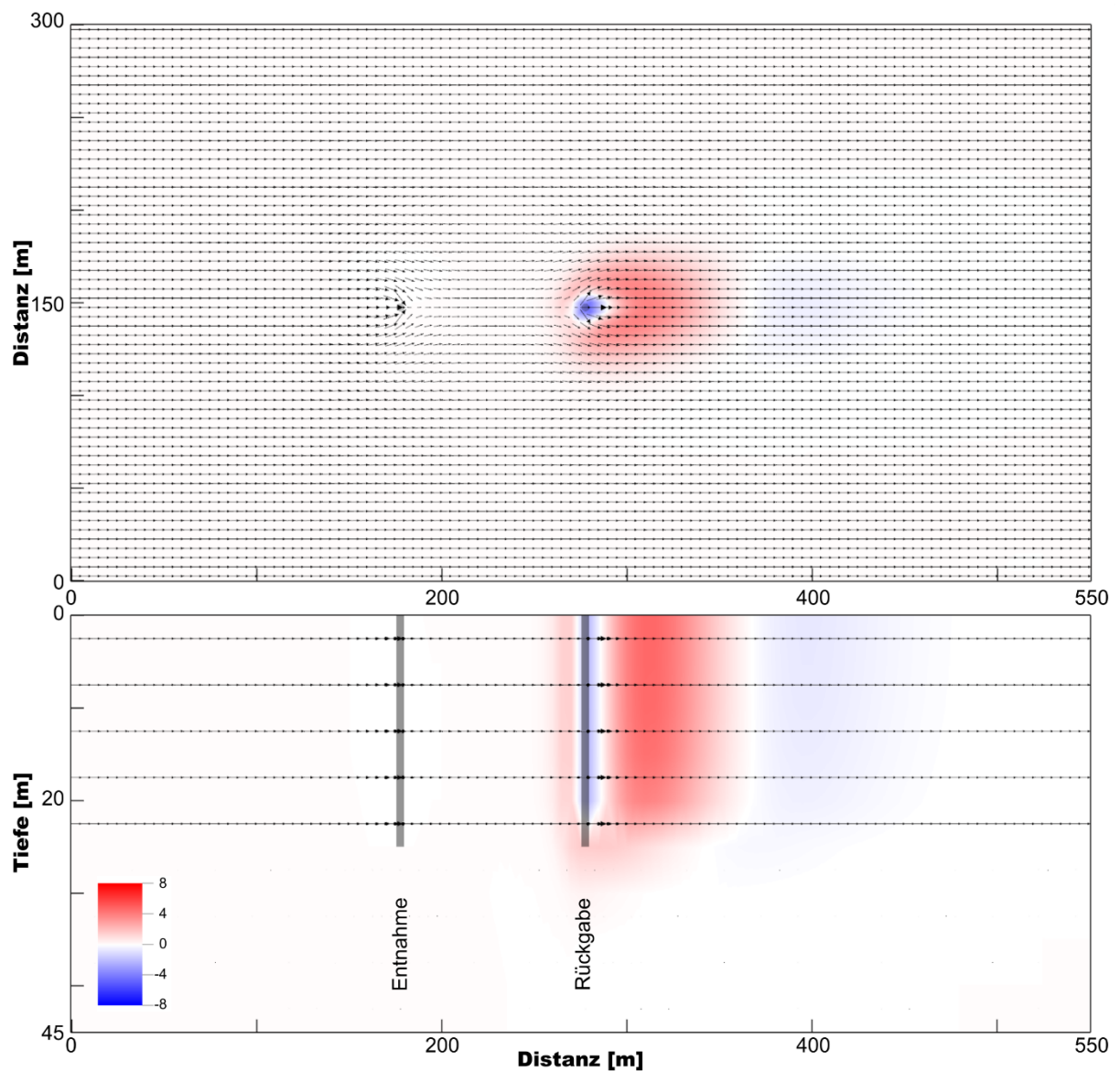


Abbildung 38: Anfängliche Resultate für das Ausgangsmodell im ersten Jahr, wenn man den Rückgabebrunnen stromabwärts vom Entnahmebrunnen platziert. Am Anfang der Winterperiode (November) wird relativ wärmeres Wasser entzogen und relativ kälteres Wasser im Reservoir eingespeist. Die Pfeile zeigen den Hintergrundfluss und den Fluss zwischen den Brunnen (Grau). Innerhalb der Aquitarde ist der Fluss vernachlässigbar klein.

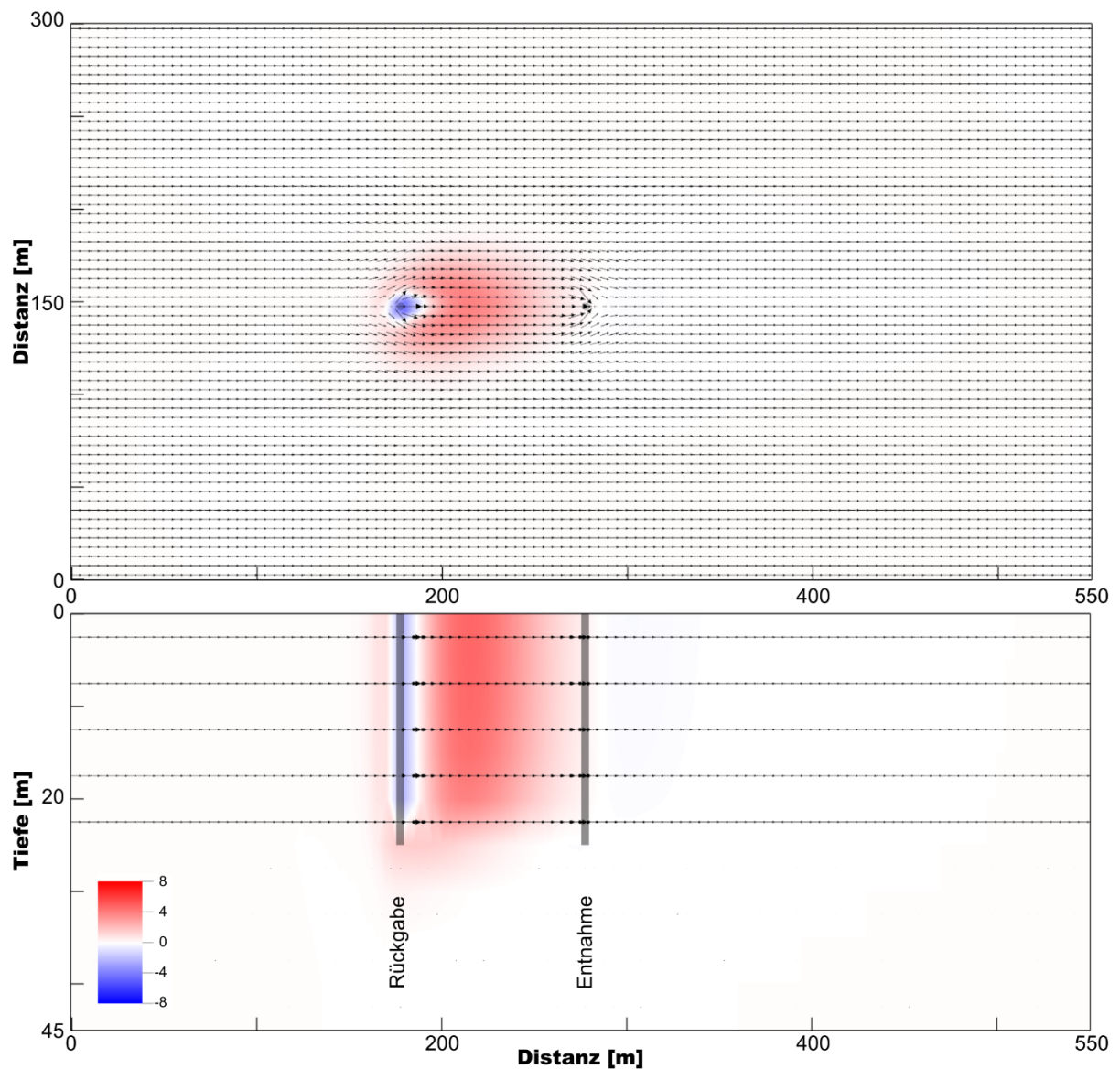


Abbildung 39: Anfängliche Resultate für das einfache Grundwassermodells im ersten Jahr. Am Anfang der Winterperiode (November) wird relativ wärmeres Wasser entzogen und relativ kälteres Wasser im Reservoir eingespeist. Die kleinen Pfeile zeigen den Hintergrundfluss und den Fluss zwischen den Brunnen (Grau). Innerhalb der Aquitarde ist der Fluss vernachlässigbar klein.

5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Obwohl die ersten Ergebnisse für detaillierte Fragen nicht genau genug sind, zeigen sie deutlich die Bedeutung der Brunnenplatzierung. Bevor die Sensitivitätsstudie der Brunnenplatzierung durchgeführt werden kann, braucht es noch die folgenden Ergänzungen.

Im nächsten Schritt werden die ungesättigten Zonen implementiert. Für die Definition des Gitters wird ein Algorithmus entwickelt, welcher die Brunnen als Eingabe benützt und davon ausgehend ein Gitter um die Brunnen bildet, womit die zeitaufwändigen manuellen Anpassungen eingespart werden können. Mit diesen Verbesserungen wird der Einfluss der Brunnentopologie auf das Reservoir untersucht. In einem weiteren Schritt wird dann eine grössere Zahl von Brunnen integriert.



6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

- Das aktuell von der HSLU bearbeitete BFE-Projekt MicroDHC untersucht die Nutzung von Erdwärmesondenfeldern als Übergangslösung mit einer späteren Integration der Felder in einen Wärmeverbund. Die Nutzung der Felder als Übergangslösung wird in PeaknCool4District nicht untersucht, ist jedoch ein möglicher Anwendungsfall. Die beiden Projekte ergänzen sich daher gut, die Projektteams tauschen sich auch regelmässig aus.
- Im Rahmen des nationalen Projektes „Sweet DeCarbCH“ wurde beschlossen, sich im neuen Work Package „WPX“ mit „Integrated District Heating and Cooling (iDHC) Networks“ zu befassen. Die Werke Wallisellen stellen hierzu ebenfalls ihr geplantes Netz als Fallstudie zur Verfügung. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, den PeakN Cool-Ansatz mit den iDHC-Ansätzen und den Methoden des DeCarbCH-Konsortiums zu vergleichen und unter dem grossen DeCarbCH-Konsortium zu verbreiten.
- Durch die enge Zusammenarbeit mit den Industriepartnern ist ein Austausch mit der Praxis gewährleistet.

7 Publikationen und andere Kommunikation

- Posterpräsentation an der 31. Wärmepumpentagung in Bern [26]

8 Literaturverzeichnis

- [1] Wemhoener C., Meier C., Buesser S., and Baetschmann M., „HP-Source: Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen,“ Rapperswil, 2023.
- [2] Meier C. and Wemhöner C., „RenoSource – Mehrquellen-Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung,“ In *Tagungsband der 31. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik» 12. Juni 2025, Eventfabrik Bern.*
- [3] Wemhoener C., Meier C., Büttgenbach, S., Meier R., Huber R., Huber J., and Jacober M., „Reno-Source: Pilot- und Demonstrationsprojekt «im Kehl», Baden: Mehrquellen-Wärmepumpensystem für den Wärmeerzeugerersatz mit Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung,“ 1. Zwischenbericht. Rapperswil, 2024.
- [4] Hobé A., Birchler D., Ruesch F., and Carbonell D., „IceGrid - Implementation of ice storage tanks into 5GDHC network as seasonal storage or load shifting element,“ Yearly report 2023.
- [5] Ruesch F., Füglistner L., Halder M., Sommer T., and Zakovorotnyi A., „Cool2Regen - Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade,“
- [6] *SWEET DeCarbCH: Swiss Energy research for the Energy Transition*, DeCarbonisation of Cooling and Heating, 2025. <https://www.sweet-decarb.ch/> (accessed August 25, 2025).
- [7] Ghelfi M., Schildknecht A., Lehman B., Kobler R., Jörin U., Badoux V., Huber E. et al., „Saisonale Wärmespeicherung im Grundwasser,“ 2022.



- [8] GIS-Browser Kanton Zürich. <https://maps.zh.ch> (accessed August 20, 2025).
- [9] nPro: District Energy Planning Tool: nPro Energy GmbH. <https://www.npro.energy> (accessed August 20, 2025).
- [10] Huber Energietechnik AG, EWS, 2025.
- [11] Lawrie, Linda K, and Drury B Crawley, *Repository of Building Simulation Climate Data: Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)*, <http://climate.onebuilding.org>, 2022. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/default.html (accessed Oktober 22, 2025).
- [12] topGrid: Digitale Energieplanung und thermische Netze: Jonas Grand. <https://www.top-grid.ch/home#home> (accessed August 25, 2025).
- [13] SwissSTES: Swiss Seasonal Thermal Energy Storage, Innosuisse Flagship Project, 2025. <https://www.swissstes.ch/> (accessed August 25, 2025).
- [14] VDI 6002 - Solare Trinkwassererwärmung.
- [15] SIA 2028:2010. Klimadaten für Bauphysik, Energie und Gebäudetechnik.
- [16] Polysun: Simulations- und Planungssoftware für Energiesysteme: Vela Solaris AG. <https://www.velasolaris.com/> (accessed August 25, 2025).
- [17] Gewässerschutzverordnung: SR 814.201, 1998.
- [18] Childs, H., Brugger, E., Whitlock, B., Meredith, J., Ahern, S., Pugmire, D., Biagas, K. et al., "VisIt: An end-user tool for visualizing and analyzing very large data," *High performance visualization-enabling extreme-scale scientific insight*, vol. 16, pp. 358–396, 2012.
- [19] Hughes, J. D., Langevin, C. D., and Banta, E. R., "Documentation for the MODFLOW 6 framework," 2017.
- [20] Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., and Fienen, M. N., "Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy," *Groundwater*, vol. 54, no. 5, pp. 733–739, 2016.
- [21] Morway, E. D., Provost, A. M., Langevin, C. D., Hughes, J. D., Russcher, M. J., Chen, C.-Y., and Lin, Y.-F. F., "A new groundwater energy transport model for the MODFLOW hydrologic simulator," *Groundwater*, vol. 63, no. 3, pp. 409–421, 2025.
- [22] Morway, E. D., Niswonger, R. G., Langevin, C. D., Bailey, R. T., and Healy, R. W., "Modeling variably saturated subsurface solute transport with MODFLOW-UZF and MT3DMS," *Groundwater*, vol. 51, no. 2, pp. 237–251, 2013.
- [23] Vermeulen, P., Quan, N. H., Nam, N. D. G., van Hung, P., Tung, N., Thanh, T., and Rien, D., "Groundwater modeling for the Mekong Delta using iMOD," 2013. In *20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia*.
- [24] van Engelen, J., Delsman, J., and Bootsma, H., "Reproducible large-scale groundwater modelling projects using the iMOD Python package," 2022.
- [25] Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J.-O., Fischer, T., Görke, U. J. et al., "OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media," *Environmental Earth Sciences*, vol. 67, no. 2, pp. 589–599, 2012.
- [26] Meier C., "Wärmepumpen zur Spitzenlastdeckung in Wärmenetzen," Posterbeitrag. In *Tagungsband der 31. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik» 12. Juni 2025, Eventfabrik Bern*.



9 Anhang

9.1 Messwerte Fallstudie Thusis

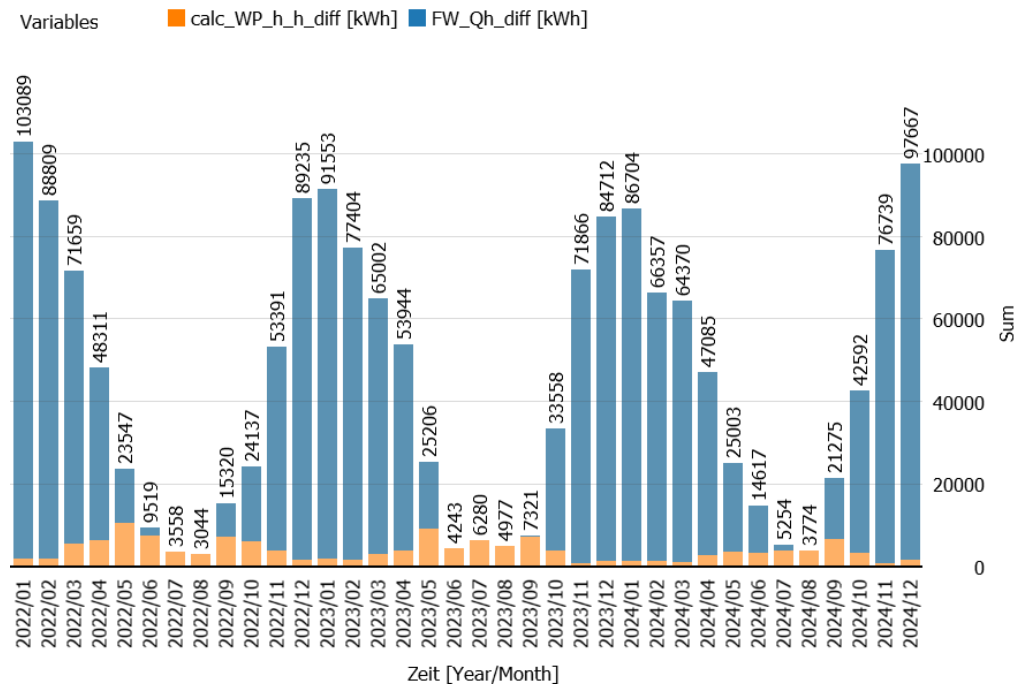


Abbildung 40: Messwerte: monatlicher Wärmeenergiebedarf aus der Fernwärme (blau) und der Kälteproduktion (orange)

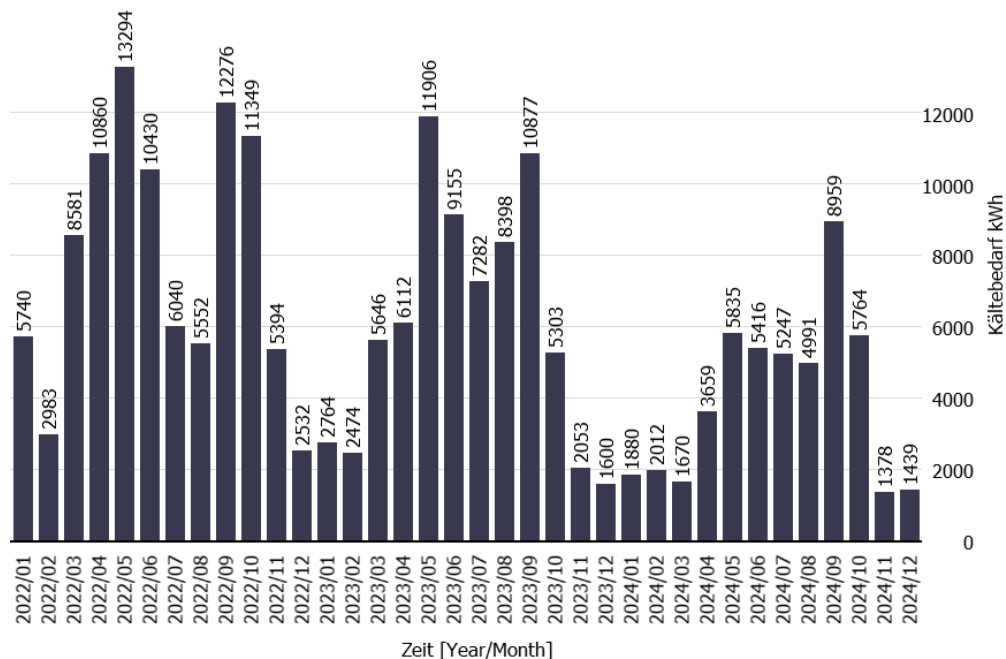


Abbildung 41: Messwerte der monatlichen Kälteproduktion