

RegEWS – Machbarkeitsstudie zur Reduktion des Flächenbedarfs von grossen Erdwärmesondenfelder für thermische Netze

Autoren Igor Bosshard, die werke versorgung wallisellen ag
Florian Ruesch, Ostschweizer Fachhochschule – Institut für Solartechnik SPF
Amelia Heid, Ostschweizer Fachhochschule – Institut für Solartechnik SPF
Krisztina Kelevitz, Ostschweizer Fachhochschule – Institut für Solartechnik SPF

Datum 25. November 2025

Subventionsgeber Kanton Zürich – Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich
www.zh.ch/de/energie

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

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Einführung	4
2.1	Ausgangslage und Motivation	4
2.2	Projektbeschreibung und Ziele	5
3	Konzept- und Modellentwicklung	5
3.1	Technisches Konzept	5
3.2	Profilgenerierung	6
3.3	Simulation mit mit pygfunction und verwendete Parameter	10
3.4	Simulierte Szenarien	12
4	Ergebnisse	14
4.1	Unterschiedliche Regenerationstemperaturen	14
4.2	Unterschiedliche Temperaturlimits zur Nutzung der Luft	16
4.3	Weitere Szenarien	20
4.3.1	Regenerationsdauer und Sondenabstände	20
4.3.2	Vergleich von zentralen und dezentralen EWSF	22
4.3.3	Zukünftiges Klimaszenario	22
5	Wirtschaftlichkeit	23
6	Weitere Abklärungen	25
6.1	Zonen- und Nutzungsplan	25
6.2	Einfluss auf Grundwasserschutzzone	26
6.3	Minimaler Abstand der Erdwärmesonden	29
6.4	Wärmeauswirkungen auf die Rasenfläche	30
7	Schlussfolgerungen und weitere Schritte	32
8	Bibliographie	34
9	Abkürzungsverzeichnis	34
10	Anhang	35
10.1	Wärmeentzug, Sondentemperatur und COP bei verschiedenen Temperaturlimiten	35
10.2	Auswertung von EWS-Leistung, Fluidtemperatur und COP auf Stundenbasis	39
10.3	Verwendete Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen	40

1 Zusammenfassung

Das Projekt «RegEWS» untersucht, wie sich der Flächenbedarf grosser Erdwärmesondenfelder (EWSF) für thermische Netze durch eine gezielte Regeneration mit sommerlicher Hochtemperaturabwärme signifikant reduzieren lässt. Die anfängliche Herausforderung in Wallisellen zeigte einen Bedarf von über 1'000 Sonden und damit einen grossen Flächenbedarf von bis zu 50'000 m² für ein vollständig erneuerbares Wärmenetz. Angesichts fehlender Alternativen wie Grundwasser oder Holz wurde das neuartige Konzept entwickelt, um diesen Flächenverbrauch zu minimieren.

Technisches Konzept

Das Versorgungskonzept basiert auf einer Grosswärmepumpe, die den Winterwärmebedarf primär deckt und das EWSF als Quelle nutzt. Dieses kann bei moderaten Aussentemperaturen durch einen aussenluftwärmetauscher ergänzt werden. In der Übergangszeit und im Sommer wird der Wärmebedarf primär durch KVA-Abwärme gedeckt, welche auch zur Regeneration des EWSF verwendet wird. Zur Spitzenlastdeckung wird Biogas eingesetzt. Die Regeneration erfolgt gezielt bei höheren Temperaturen, wodurch sich die Wärmekapazität des geothermischen Speichers stark erhöht. Als Standort eignen sich Kunstrasen-Fussballfelder, die eine Regeneration auf höheren Temperaturen ermöglichen.

Simulationsergebnisse

Die Regenerationstemperatur mit einer erhöhten Temperatur von 70 °C ist der entscheidende Faktor: Die benötigte Anzahl an Sonden sinkt dadurch von 594 (bei 20 °C) auf nur noch 192, was einer Reduktion um den Faktor 3 entspricht. Mit diesen 192 Sonden kann bereits mehr als die Hälfte (59 %) des Winterwärmebedarfs gedeckt werden. Eine Verlängerung der Regenerationsdauer von sechs auf sieben Monate erhöht den Deckungsgrad auf 68 %.

Wirtschaftlichkeit und Betrieb

Mit steigender Regenerationstemperatur sinken die Wärmegestehungskosten (WGK) um bis zu 11 %, wobei ein Bereich von 60–70 °C optimal ist. Um den hohen Biogasanteil von ca. 31 % zu reduzieren und somit die Versorgungssicherheit zu erhöhen, bietet es sich an, Luft/Wasser-Rückkühler einzubinden. Ein Umschaltpunkt von etwa 3 °C Aussentemperatur gilt als technisch und ökonomisch sinnvoll und reduziert den Biogasanteil auf 12 %.

Machbarkeit und Umweltaspekte

Untersuchungen zeigen, dass weder die Spielfläche noch das Grundwasser im weiteren Umfeld kritisch beeinflusst werden. Die Erwärmung des Grundwassers bleibt im spezifisch untersuchten Fall unter 1 K. Die ersten Abklärungen lassen den Schluss zu, dass zusätzliche Dämmmassnahmen des EWSF gegen oben nicht erforderlich sind, da der thermische Einfluss auf die Kunstrasenflächen im Vergleich zur Sonneneinstrahlung sehr gering ist.

Fazit und nächste Schritte

Das Konzept ermöglicht den Aufbau eines kompakten, vollständig erneuerbaren thermischen Netzes mit erheblich reduziertem Flächenbedarf und Kosten. Dieser neue Ansatz ist ein wichtiger Baustein für den Ausbau und die Kapazitätserhöhung thermischer Netze in Gebieten, in denen Flächen- oder Ressourcenknappheit herrscht. Aufgrund der positiven Ergebnisse wird das Projekt im Rahmen eines Vorprojekts (Start Q1 2026) von die werke weiterverfolgt.

2 Einführung

2.1 Ausgangslage und Motivation

Thermische Netze leisten einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten. Gemäss den Energieperspektiven 2050+, Szenario ZERO Basis, soll sich ihr Beitrag in der Schweiz bis 2050 auf rund 15 TWh fast verdreifachen. Der Ausbau hat sich in den letzten Jahren stark beschleunigt. Viele Gemeinden im Kanton Zürich prüfen, bauen oder betreiben bereits thermische Netze. Um die Klimaziele des Kantons Zürich zu erreichen, ist jedoch ein Paradigmenwechsel beim Neubau thermischer Netze erforderlich, insbesondere in Bezug auf die Spitzenlastabdeckung. Diese soll künftig nicht mehr fossil erfolgen. Dies ist auch deshalb entscheidend, weil die Industrie und das Gewerbe zunehmend eine 100 % erneuerbare Energieversorgung einfordern.

Die werke versorgung wallisellen ag (*die werke*) ist ein lokales Energieversorgungsunternehmen, das seine Dienstleistungen vollständig dekarbonisieren und seinen Gaskunden eine klimaneutrale Alternative anbieten möchte. Aktuell treiben die werke den Bau eines thermischen Netzes in den Gemeinden Wallisellen, Dietlikon und Wangen-Brütisellen voran. Das Projekt «Energieverbund SaisonLink» soll von Grund auf neu geplant und gebaut werden mit dem Ziel möglichst vollständig auf fossile Energieträger zu verzichten. Die Herausforderungen in Wallisellen und Umgebung sind jedoch erheblich. Für grössere Wärmenetze steht nur die Geothermie in ausreichender Menge zur Verfügung. Gewässer sind kaum nutzbar oder fehlen ganz, und das Grundwasser weist teilweise kein oder nur ein geringes Energiepotenzial auf. Diese Situation dürfte auch andere Gemeinden im Kanton betreffen. Derzeit setzen viele noch auf die Ressource Holz, was jedoch in naher Zukunft nicht mehr nachhaltig möglich sein wird.

Die untiefe Geothermie (Erdwärmesonden) ist in der Schweiz grundsätzlich gut etabliert, jedoch meist auf kleinere Areale oder Einzelgebäude beschränkt. Es gibt einige Beispiele von Anergienetzen für Gebiete mit vergleichbarem Wärme- und Kühlbedarf. In diesen Netzen gleichen grössere Erdwärmesondenfelder (EWSF) mit wenigen hundert Sonden die saisonale Verschiebung des Wärme- und Kältebedarfs aus. Grössere EWSF, die als Hauptenergiequelle für ein wärmedominiertes thermisches Netz dienen und auch die Spitzenlast abdecken, sind den Autoren nicht bekannt. Aktuelle Berechnungen gehen davon aus, dass für Wallisellen eine Fläche von ca. 20'000 – 50'000 m² für Erdwärmesonden benötigt wird.

Die beiden grössten Herausforderungen bei solch grossen EWSF sind:

- Der Flächenbedarf ist sehr gross. Die erforderlichen freien Flächen sind im Siedlungsgebiet kaum verfügbar.
- Die hohen Investitionskosten für EWS beeinflussen die Wirtschaftlichkeit eines thermischen Netzes erheblich.

Aus diesen Gründen ist es wichtig, die Anzahl der Sonden und damit den Flächenverbrauch so gering wie möglich zu halten. Im Gegensatz zu bisherigen Anergienetzen steht in der Umgebung von Wallisellen viel sommerliche Hochtemperatur-Abwärme zur Verfügung, die zur Regeneration der EWSF genutzt werden könnte. Diese könnte die EWSF deutlich stärker erwärmen und somit die Kapazität bei gleichbleibender Sondenzahl markant erhöhen.

Um diesen Effekt genauer zu quantifizieren, sind weitergehende Untersuchungen und neue Konzepte notwendig.

2.2 Projektbeschreibung und Ziele

Das Hauptziel dieses Projektes ist es zu klären, ob durch die (Über-)Regeneration von EWSF auf verschiedenen Temperaturniveaus der spezifische Flächenbedarf und die Kosten für EWSF nachhaltig reduziert werden können. Für die Regeneration kommt zum einen KVA-Abwärme, zum anderen aber auch die Kombination von verschiedenen anderen Quellen wie beispielsweise Abwärme (Industrie, Gebäudekühlung), Solarthermie oder Wärmepumpen mit Luftwärmetauscher in Frage (die Aufzählung ist nicht abschliessend).

Weitere zentrale Fragestellungen des Projektes sind:

- Wie wirkt sich eine räumliche Aufteilung der EWSF auf die Effizienz und Planung aus?
- Welche alternativen Ansätze ermöglichen eine Reduktion der EWSF-Grösse bei gleichzeitiger Deckung der Spitzenlast?
- Wie beeinflussen verschiedene Varianten die Wärmegestehungskosten und damit die Wirtschaftlichkeit des Netzes?

Nach Kenntnis der Autoren wäre ein thermisches Netz mit 100 % erneuerbaren Energien und einer Überregeneration der EWS zur Reduktion des Flächenbedarfs bisher einzigartig in der Schweiz und könnte helfen, weitere Erkenntnisse für die Umsetzung von thermischen Netzen im Kanton und in der Schweiz zu erlangen und damit die Energiewende voranzutreiben.

Die Ausgangslage ist insofern schwierig, da keine fossilen Energieträger zum Einsatz kommen sollen, Holz als erschöpft gilt und im Winter keine Bandlast aus Abwärme zur Verfügung steht. Im Sommer hingegen ist sehr viel Abwärme vorhanden. Durch die Planung eines thermischen Netzes auf der «grünen Wiese» können neue Konzepte erprobt und umgesetzt werden.

3 Konzept- und Modellentwicklung

3.1 Technisches Konzept

Das Energiekonzept basiert auf einer grossflächigen leitungsgebundenen Energieversorgung. Der Schwerpunkt liegt auf der Versorgung von Liegenschaften mit Wärme für Heizung und Warmwasser. Die Versorgung mit Kühlenergie beschränkt sich auf Versorgungsgebiete mit einem ausreichend hohen Klimakältebedarf. Die Kühlung wurde im Rahmen dieser Studie jedoch nicht näher betrachtet.

Das technische Konzept nutzt verschiedene Energieträger und -quellen zur Wärme- und Kälteerzeugung (siehe Abbildung 1).

- Elektrizität aus Wasserkraft und Solarenergie für den Betrieb einer Grosswärmepumpe zur Deckung des Wärmebedarfs im Winter und zur Kälteerzeugung im Sommer.
- Abwärme aus der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Hagenholz der Stadt Zürich zur Grundlastabdeckung in der Übergangszeit und im Sommer sowie zur Beladung eines EWSF als saisonalen Geothermiespeicher.
- Erneuerbare Gase (Biogas) zur Deckung von Spitzenlasten über einen Gaskessel oder zur Notversorgung bei einem Ausfall der anderen Wärmeerzeuger.

Die Kernkomponente des Konzepts ist eine Grosswärmepumpe, die insbesondere zur Versorgung in den Wintermonaten benötigt wird. Als Wärmequelle dient ein Erdwärmesondenfeld (EWSF), da andere Quellen nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen. Erste Abschätzungen zeigen, dass etwa 1'000 Erdwärmesonden mit einer Tiefe von 250 m erforderlich wären, was einen grossen Platzbedarf zur Folge hätte. Die in diesem Projekt gemachten Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass sich die Anzahl der benötigten Sonden durch eine Regeneration mit hohen Temperaturen deutlich reduzieren lassen. Bei der Evaluierung möglicher Flächen für das EWSF hat sich gezeigt, dass Sportanlagen mit Fussballfeldern und Kunstrasen eine geeignete Option darstellen. Diese wurden im Rahmen der Studie näher untersucht.

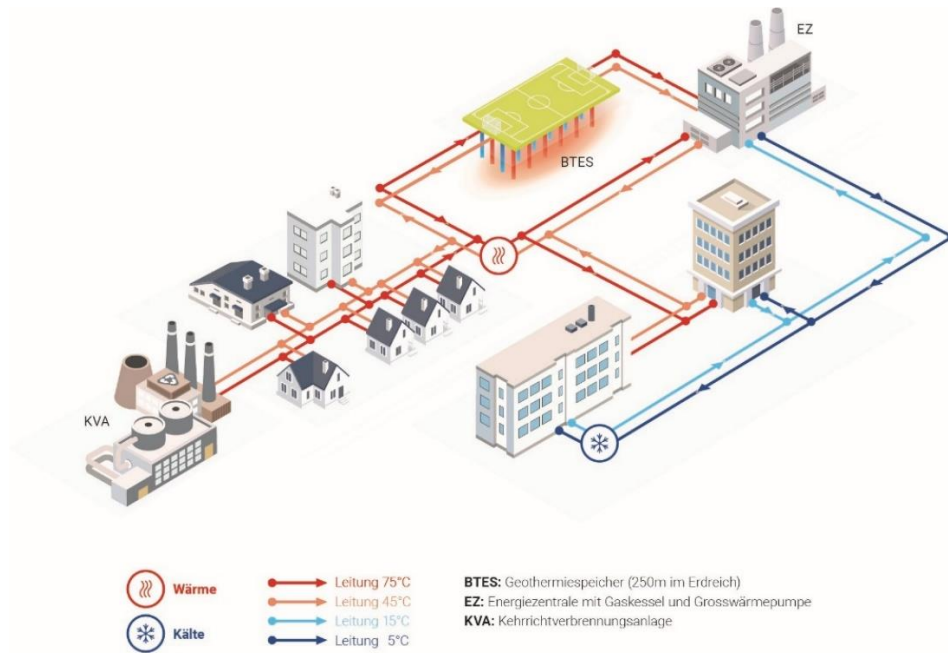


Abbildung 1 Darstellung des technischen Versorgungskonzepts mit den wichtigsten Elementen.

3.2 Profilergenerierung

Die Wärmeverbrauchsprofile wurden mithilfe der Software nPro¹ erstellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Gebäuden, die in nPro gleichzeitig verarbeitet werden können, wurde das Versorgungsgebiet Wallisellen in mehrere Zonen unterteilt. Teilweise wurden mehrere kleinere Gebäude zu einem gemeinsamen Anschluss zusammengefasst, um die Berechnungen zu vereinfachen.

Die Gebäudeinformationen sowie bekannte Energieverbräuche und Leistungsbedarfe der jeweiligen Zonen wurden über ein GeoJSON-File in nPro importiert. Auf Basis dieser Daten generiert nPro für jedes Gebäude stündlich aufgelöste Lastprofile für Heizwärme, Warmwasser und Klimakälte unter Berücksichtigung der jeweiligen Aussentemperaturen. Die Wetterdaten im nPro werden mit typischen Wetterdaten am Standort Zürich von den Jahren 2004 bis 2023 aus Climate.OneBuilding.Org² erstellt.

In Abbildung 2 sind beispielhafte Tagesverläufe der summierten Wärme- und Kältebedarfe aller Zonen für verschiedene Monate dargestellt. Die Wärmeprofile zeigen typischerweise zwei Spitzenlasten pro Tag, jeweils eine am Morgen und eine am Abend. Die Kälteprofile hingegen weisen eine ausgeprägte, längere Spitze am Nachmittag auf.

¹ <https://www.npro.energy/>

² <https://climate.onebuilding.org/>

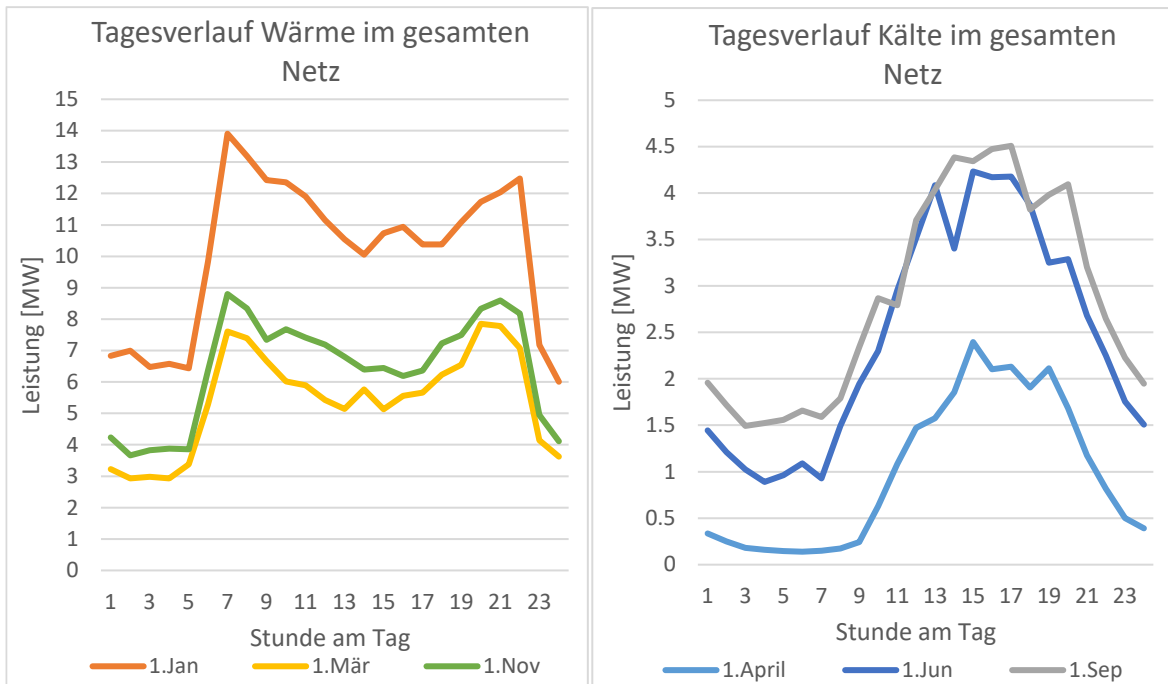


Abbildung 2 Beispiele von Tagesverläufen von Wärme- und Kältebedarf im gesamten Netz in verschiedenen Monaten.

Der Wärme- und Kältebedarf der einzelnen Zonen sowie des gesamten Netzes, inklusive der jeweils benötigten maximalen Leistungen, sind in Tabelle 1 und Abbildung 3 dargestellt.

Der gesamte jährliche Wärmebedarf im Netz beträgt rund 40 GWh. Die Zone 1, die überwiegend Industrie- und Gewerbebauten umfasst, weist den höchsten Wärmebedarf auf, gefolgt von Zone 2_1 in der hauptsächlich Wohngebäude liegen.

Der Kältebedarf stammt ebenfalls überwiegend aus Zone 1 und summiert sich auf etwa 9.3 GWh pro Jahr. Die Verteilung der maximalen Leistungen auf die einzelnen Zonen zeigt ein ähnliches Muster wie die Energiebedarfe.

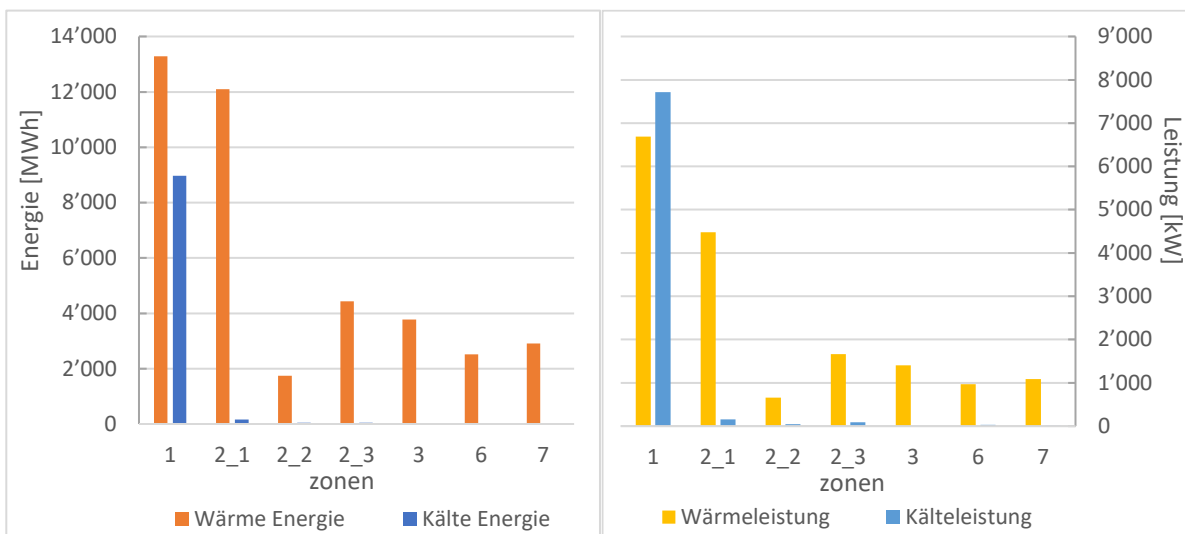


Abbildung 3 Wärme- und Kältebedarf und maximale Leistungen der Zonen.

Zonen		1	2_1	2_2	2_3	3	6	7	Total
Wärmeenergie	MWh/a	13'300	12'000	1'700	4'400	3'800	2'500	2'900	40'800
Wärmeleistung	kW	6'000	4'500	600	1'700	1'400	1'000	1'100	16'300
Kälteenergie	MWh/a	9'000	160	50	50	0	40	3	9'300
Kälteleistung	kW	7'700	160	40	90	0	30	2	8'000

Tabelle 1 Wärme- und Kältebedarf, maximale Leistungen der Zonen und Summenwerte (gerundet).

Der Jahresverlauf des Wärme- und Kältebedarfs im gesamten Netzgebiet ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Bedarfsentwicklung orientiert sich an den Aussentemperaturen sowie den importierten Wärmebedarfswerten und maximalen Leistungen der einzelnen Gebäude.

Der Wärmebedarf umfasst sowohl Heizwärme als auch Warmwasser, jedoch keine Prozesswärme. Beim Kältebedarf ist die Klimatisierung berücksichtigt, Prozesskälte hingegen nicht.

Eine separate Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit im Netz erfolgt nicht, da die zugrunde liegenden Leistungsdaten der Gebäude grösstenteils auf Messwerten basieren und somit die Gleichzeitigkeit bereits teilweise in den Daten enthalten ist.

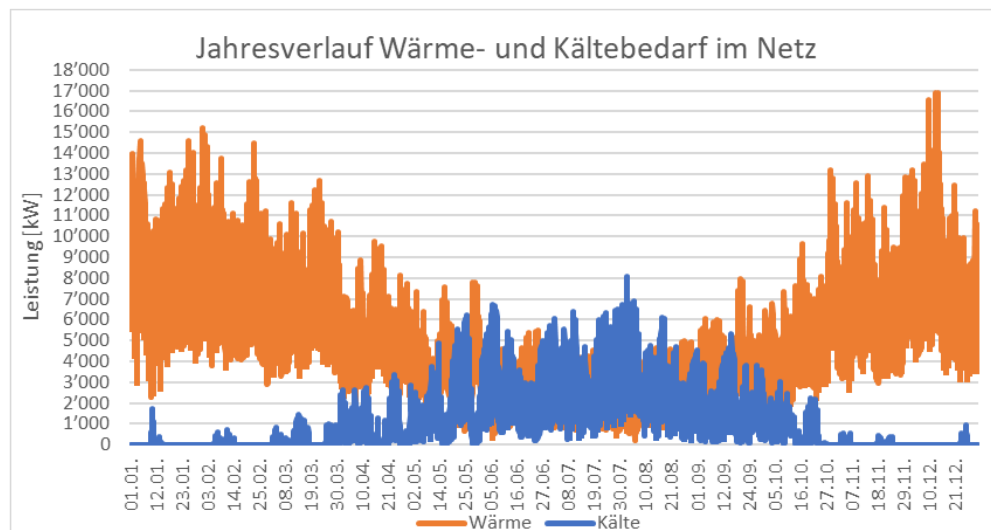


Abbildung 4 In nPro generierter Jahresverlauf des Kälte- und Wärmebedarf im gesamten Netz (DRY – Zürich).

Neben dem Standardjahr (DRY – Design Reference Year) für den Standort Zürich wurde ein zusätzliches Zukunftsszenario berücksichtigt, um die Auswirkungen des Klimawandels in der Analyse mit einzubeziehen. Dabei handelt es sich um das Szenario RCP8.5 2060 DRY, das ein extremes Treibhausgas-Emissionsszenario für das Jahr 2060 darstellt.

Die entsprechenden Wetterdaten wurden in nPro importiert und dienten als Grundlage für die Neuberechnung der Lastprofile. Da die Energiemengen und Leistungen als feste Eingabewerte vorgegeben sind, mussten diese nachträglich skaliert werden. Die Skalierung erfolgte auf Basis der Heiz- und Kühlgradtage des Standardwetters und des Zukunftsszenarios.

In Tabelle 2 sind die jährlichen Bedarfswerte für Wärme und Kälte sowie die Netzleistungen für beide Szenarien dargestellt. Der Wärmebedarf wurde dabei in Raumwärme und Warmwasser unterteilt. Nur der Raumwärmebedarf ist direkt wetterabhängig. Im Zukunftsszenario reduziert sich der Raumwärmebedarf auf etwas unter 91 % des aktuellen Wertes, während der Kältebedarf auf 186 % ansteigt.

Die entsprechenden Jahresverläufe der Bedarfsprofile sind in Abbildung 5 visualisiert.

Zonen		Aktuell			Zukunft		
		Raumwärme	Warmwasser	Total	Raumwärme	Warmwasser	Total
Wärmeenergie	MWh/a	36'700	4'100	40'800	34'584	4'083	37'000
Wärmeleistung	kW	15'300	1'100	16'300	16'478	1'143	16'700
Kälteenergie	MWh/a			9'286			17'283
Kälteleistung	kW			8'050			14'845

Tabelle 2 Wärme- und Kältebedarf im Netz mit aktuellen Wetterdaten von nPro und Wetterdaten eines Zukunftsszenario (RCP8.5 2060 DRY), gerundet.

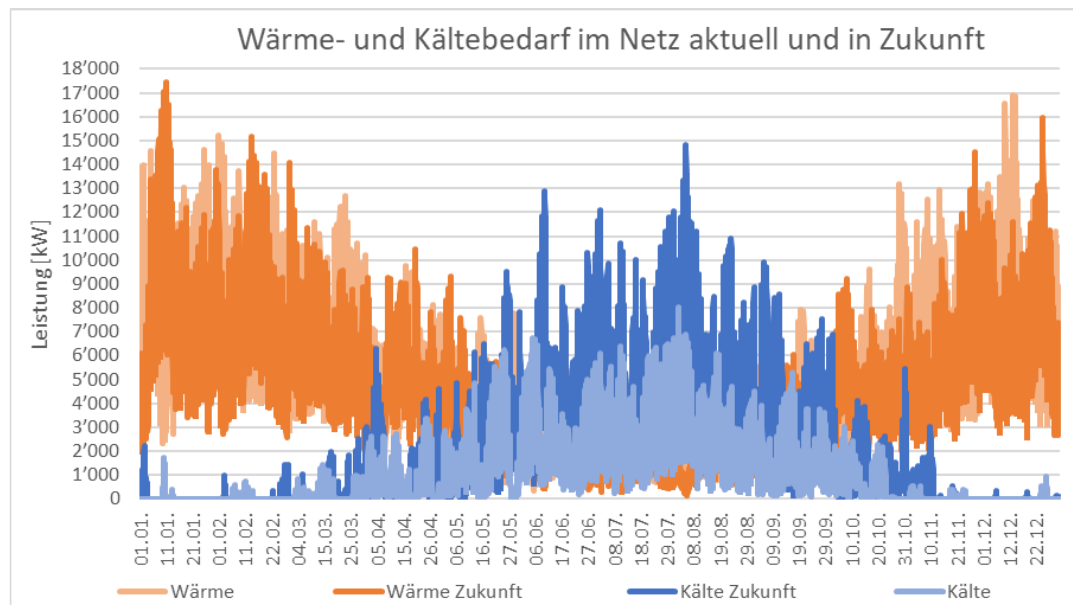


Abbildung 5 Wärme- und Kältebedarf im Netz über das Jahr mit aktuellen Wetterdaten von nPro (DRY) und Wetterdaten eines Zukunftsszenario (RCP8.5 2060 DRY).

3.3 Simulation mit pygfunction und verwendete Parameter

Zur Simulation des thermischen Verhaltens des EWSF wurde das Python-Paket pygfunction verwendet. Dieses Tool dient der Modellierung und Analyse thermischer Interaktionen in Erdsondenfeldern, insbesondere im Zusammenhang mit Sole/Wasser-Wärmepumpensystemen. Das Paket stellt Funktionen zur Verfügung, um die thermische Reaktion des Bodens auf Wärmeentnahme oder -rückführung (Regeneration) über die Zeit mithilfe sogenannter g-Funktionen zu berechnen. Die g-Funktion beschreibt die Temperaturantwort des Erdreichs auf einen konstanten Wärmeentzug. Zur Berechnung des dynamischen Temperaturverlaufs in einem EWSF müssen viele g-Funktionen zusammengezählt bzw. aggregiert werden. Diese Aggregation von dynamischen Sondenbelastungen wird ebenfalls im pygfunction Packet zur Verfügung gestellt. Zur realitätsnahen Abbildung des EWSF-Verhaltens wurde zusätzlich die thermische Regeneration in das Modell integriert. Dadurch kann das Verhalten des Erdsondenfeldes im definierten Szenario differenzierter und genauer dargestellt werden. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Parameter	Wert	Kommentar
Simulationsdauer	20 Jahre	Normalerweise nach 5 Jahren stabiles Verhalten
Regenerationslimit	8 MW	Um Rohrdurchmesser zu limitieren
Sondenlänge	240 m	
Sondenradius	0.075 m	
Tiefe Sondeneingrabung	4 m	

Tabelle 3 Festgelegte Parameter der Simulation.

Die Parameter der EWS wurden Anhand einer lokalen Bohrung in der Umgebung bestimmt. Das Versorgungsgebiet Wallisellen ist in Abbildung 6 zu sehen. Im hellblauen und grünen Gebiet gibt es Schotter-Grundwasservorkommen, welches für Trinkwassergewinnung ungeeignet ist und EWS grundsätzlich zulässig sind. Im blauen Gebiet könnte das Grundwasser für thermische Zwecke genutzt werden, jedoch ist das Potenzial für ein thermisches Netz im geplanten Umfang zu gering.

Zum Schutz der Felsgrundwasserleiter in der Obere Meeresmolasse und Malm ist eine Tiefenbeschränkung in Wallisellen in Kraft. Diese beträgt je nach Standort 200-256 Meter und in gewissen Gebieten sind EWS-Bohrungen nicht erlaubt [1].

Der Standort des verwendeten Bohrprofils ist in Abbildung 6 dargestellt. In Tabelle 4 sind in Polysun³ die zugeordneten Schichten des Bohrprofils mit der jeweiligen Schichtdicke sowie den dazugehörigen Parametern wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität aufgeführt. Da das Bohrprofil nur bis 153 m reicht, wurde die unterste Schicht auf die verwendeten 240 m verlängert.

³ Simulations- und Planungssoftware für Energiesysteme [3].

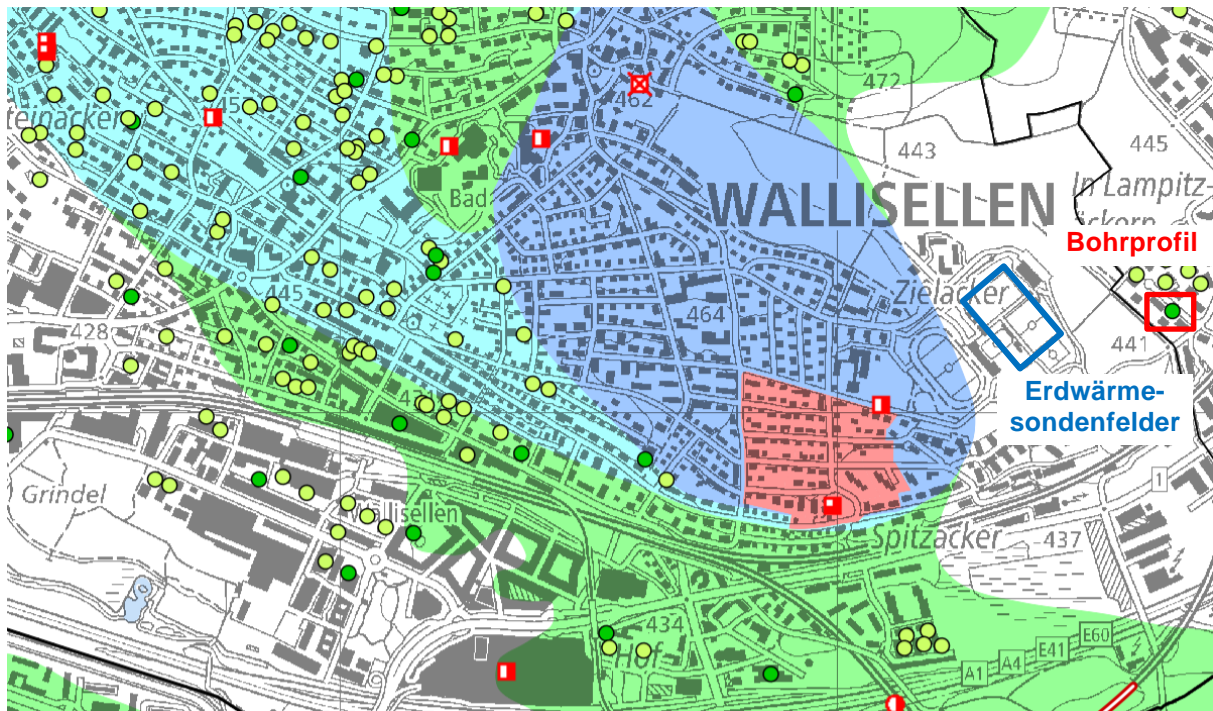


Abbildung 6 Wärmennutzungspotenzial aus dem Untergrund für das Versorgungsgebiet Wallisellen und Darstellung der bestehenden EWS. Das rote Rechteck markiert das verwendete Bohrprofil für die Simulationen und das blaue zeigt den möglichen Standort für die Erdwärmesondenfelder (Quelle: GIS ZH [2]).

Schichtdicke [m]	Beschreibung	Dichte [kg/m ³]	Spez. Wärmekapazität [J/kg/K]	Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]
22	Moräne	2200	900	1.6
10	Siltstein OSM	2550	825	2.3
62	Feinsandstein OSM	2550	825	2.3
22	Mergelstein	2450	898	2.1
32	Tonstein- Siltstein OSM	2550	825	2.3
92	Tonstein	2500	880	1.9
Mittel		2490	860	2.06

Tabelle 4 In Polysun zugeordnete Schichten des verwendeten Bohrprofil mit den jeweiligen Parametern.

3.4 Simulierte Szenarien

Zur Analyse des EWSF-Verhaltens wurden verschiedene Szenarien simuliert, in denen Parameter wie Regenerationstemperatur, Regenerationsdauer und Anzahl der Erdsonden variiert wurden. Die Leistung der Wärmepumpe war in diesen Szenarien konstant auf 8 MW festgelegt. Zusätzlich wurden unterschiedliche Wärmepumpenkonfigurationen hinsichtlich der genutzten Energiequelle untersucht. Die Wahl der Quelle basiert auf einem definierten Temperaturlimit: Unterschreitet die Aussentemperatur diesen Grenzwert, wird das EWSF als Wärmequelle verwendet. Liegt die Aussentemperatur darüber, erfolgt die Nutzung von Aussenluft als Quelle. Die verschiedenen Parameterkonfigurationen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Während der Regeneration des EWSF durch Abwärme wird gleichzeitig auch der Wärmebedarf des ganzen Versorgungsgebietes gedeckt. Der Wärmebezug aus dem EWSF erfolgt nur in den kalten Monaten ausserhalb der Regenerationsphase (siehe Abbildung 7).

Parameter	Varierte Werte
Regenerationstemperatur	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 °C
Regenerationszeit	6, 7 Monate
Anzahl Sonden auf 70°C	12 x 16 mit 6 m Abständen (1 Fussballfeld, 192 Sonden)
	14 x 19 mit 5 m Abständen (1 Fussballfeld, 266 Sonden)
	12 Mal 4 x 4 mit 6 m Abstände (mehrere kleine Felder, 192 Sonden)
Temperaturlimit für Wechsel von Luft-Wärmepumpe	-1, 1, 3, 5 °C
Limit Spitzendeckung	Abhängig von den oben gewählten Parametern
Lastskalierung	Abhängig von den oben gewählten Parametern

Tabelle 5 Parameterwahl und verwendete Werte zur Modellierung verschiedener Szenarien.

Bei einem Sondenabstand von 6 m lassen sich auf der Fläche (90x65 m) des untersuchten Fussballfeldes 12 x 16 Sonden (insgesamt 192 Sonden) platzieren. Mit dieser Konfiguration, einer Regenerationstemperatur von 70 °C und einer Wärmepumpenleistung von 8 MW kann ein Wärmebedarf von 15.85 GWh pro Jahr gedeckt werden⁴. Die zeitliche Aufteilung der Wärmeentnahme und Regeneration erfolgt wie folgt:

- Regeneration: April bis September (inkl. Deckung des Wärmebedarfs)
- Wärmeentnahme: Oktober bis März

Basierend auf dieser zeitlichen Verteilung und einem konstant angenommenen Wärmepotenzial des EWSF von 15.85 GWh wurden weitere Simulationen durchgeführt, bei denen die Regenerationstemperatur zwischen 20 °C und 80 °C variiert wurde. Um das Wärmepotenzial (15.85 GWh) konstant zu halten, muss die erforderliche Grösse des EWSF in Abhängigkeit von der gewählten Regenerationstemperatur angepasst werden.

⁴ Einhaltung der SIA 348/6:2021

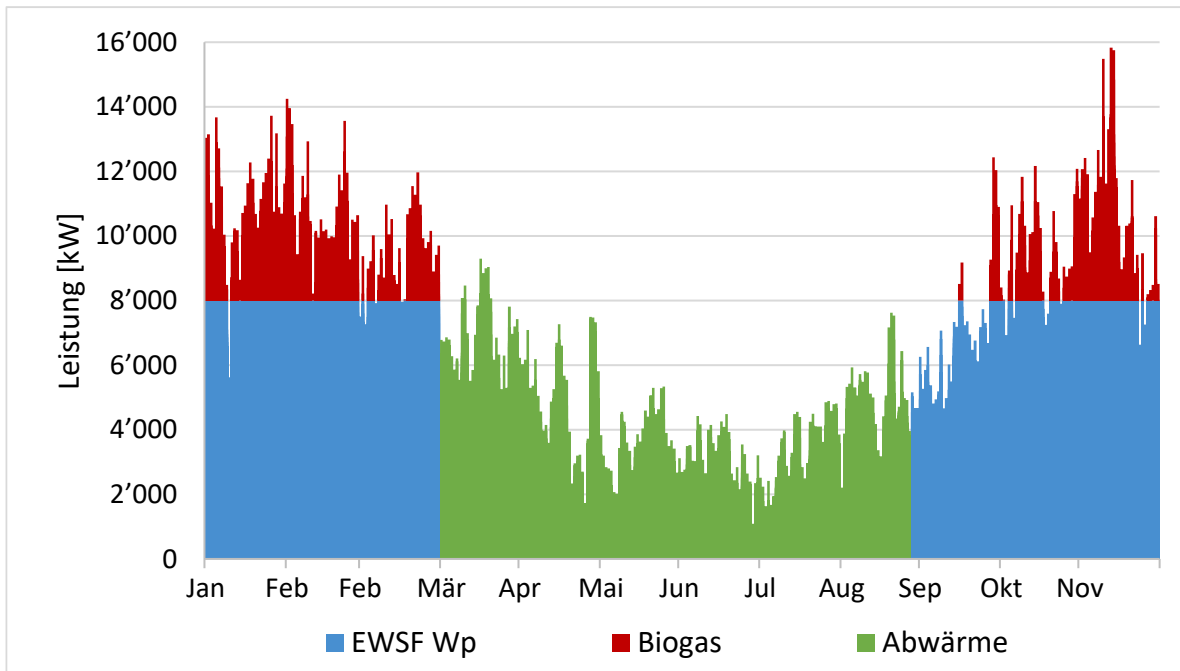


Abbildung 7 Beispiel der Aufteilung des Wärmebedarfs auf die verschiedenen Quellen.

Unter den oben beschriebenen Rahmenbedingungen und einer Spitzenlastdeckung durch Biogas (2 GWh) kann das EWSF in Kombination mit einer Wärmepumpe 15.85 GWh rund 59 % des Winterwärmebedarfs (Oktober–März) abdecken. Um den Gesamtwinterbedarf zu decken, sind entweder ein grösseres EWSF oder zusätzliche Energiequellen erforderlich. Daher wird in den Simulationen, je nach betrachtendem Szenario auch Aussenluft als Wärmequelle berücksichtigt. Die verwendete Strategie in den Simulationen umfasst folgende Punkte:

- Spitzenlastdeckung durch einen Gaskessel (Biogas).
- Wärmeversorgung im Sommer (April–September) durch KVA-Abwärme.
- Aussenluftnutzung im Winter, wenn die Aussentemperatur das festgelegte Limit überschreitet.
- EWSF-Nutzung in der übrigen Zeit, mit einer minimalen Temperatur von -1.5 °C und einer Regenerationstemperatur von 70 °C .

Zusätzlich wurde im Projekt der Unterschied zwischen einem grossen EWSF (12×16 Sonden) und zwölf kleineren Feldern (je 4×4 Sonden) untersucht.

4 Ergebnisse

4.1 Unterschiedliche Regenerationstemperaturen

Um den Einfluss unterschiedlicher Regenerationstemperaturen zu ermitteln, wurden diese von 20 °C bis 80 °C variiert. Zusätzlich wurden zwei Fälle unterschieden:

1. Konstante Feldgrösse (192 Sonden): Die Wärmeabdeckung variiert mit der Regenerationstemperatur.
2. Konstante Wärmeabdeckung (15.85 GWh/a): Die Feldgrösse passt sich der Regenerationstemperatur an.

Als Referenz dient das Szenario mit 70 °C Regenerationstemperatur, Sommerwärmeversorgung durch KVA-Abwärme und Spitzenlastdeckung durch Biogas. Der verbleibende Bedarf im Winter wird als Winterwärmebedarf bezeichnet. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Abbildung 8 zeigt die erforderliche Feldgrösse in Abhängigkeit von der Regenerationstemperatur (bei 6 Monaten Regeneration). Der Zusammenhang ist nicht linear, da eine Erhöhung von 20 °C auf 40 °C die benötigte Fläche deutlich stärker reduziert als eine Erhöhung von 60 °C auf 80 °C.

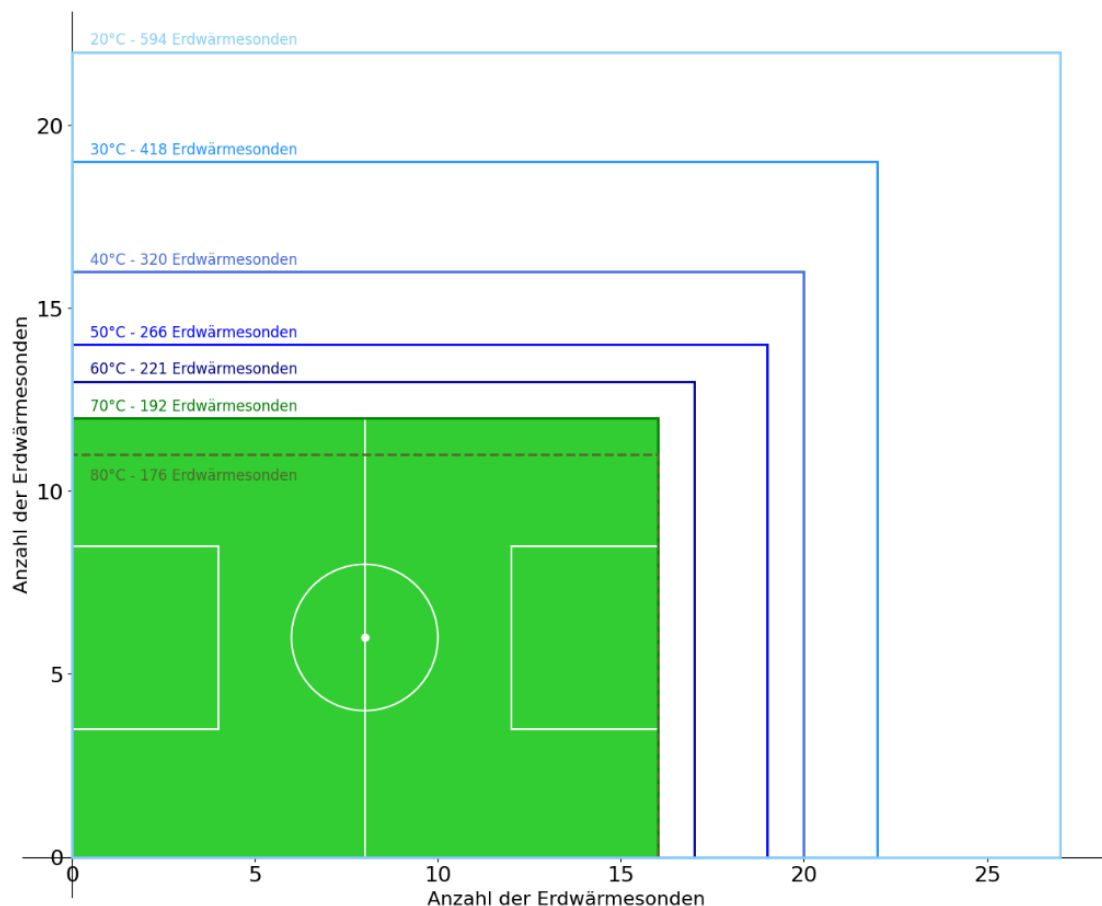


Abbildung 8 Resultierende EWS-Feldgrösse und Regenerationstemperatur bei einer Wärmeabdeckung von 15.85 GWh (äquivalent zu einem Fussballfeld auf 70 °C, siehe grüne Markierung) mit 6 Monaten Regeneration und 8 MW Wärmepumpenleistung. Die Fussballfeldgrösse beträgt 90x65 m)

Im Fall 1 mit konstanter Feldgrösse (192 Sonden) liegt der Winterdeckungsgrad bei einer Regenerationstemperatur von 70 °C bei 59 %. Wird die Temperatur auf 80 °C erhöht, steigt der durch das EWSF gedeckte Wärmebedarf auf 17.99 GWh, was einem Deckungsgrad von 67 % entspricht (+13 % relativ).

Sinkt die Regenerationstemperatur hingegen auf 20 °C, fällt der Deckungsgrad deutlich auf 19 % (5.1 GWh), was einem Rückgang von -68 % gegenüber dem Referenzwert entspricht.

Im Fall 2 mit konstanter Wärmeabdeckung von 15.85 GWh/a verändert sich die benötigte Anzahl an Erdsonden deutlich in Abhängigkeit von der Regenerationstemperatur:

- Bei 70 °C werden 192 Sonden benötigt (Referenzfall, Deckungsgrad: 59 %)
- Bei 80 °C sinkt die Anzahl auf 176 Sonden (-8.3 %)
- Bei 40 °C steigt sie auf 320 Sonden (+60 %)
- Bei 20 °C sind sogar 594 Sonden erforderlich (+209 %)

Damit vervielfacht sich die Feldgrösse bei niedrigen Regenerationstemperaturen auf mehr als das Dreifache.

Regenerations-temperatur	Winter Wärme-bedarf [GWh]	Monate Bedarf	Monate Regene-ration	x	y	Sonden-abstand [m]	Sonden-anzahl	Bedarf gedeckt über EWSF [GWh]	DG [%]
Fall 1:									
80	26.86	Okt - Mär	6 Apr-Sep	16	12	6	192	17.99	67
70								15.85	59
60								13.70	51
50								11.55	43
40								9.40	35
30								7.25	27
20								5.10	19
Fall 2:									
80	26.86	Okt - Mär	6	16	11	6	176	15.85	59
70				16	12		192		
60				17	13		221		
50				19	14		266		
40				20	16		320		
30				22	19		418		
20				27	22		594		

Tabelle 6 Sondenanzahl und über EWSF abgedeckter Wärmebedarf bei unterschiedlichen Regenerationstemperaturen und einer Regenerationsdauer von 6 Monate. DG = Deckungsgrad.

4.2 Unterschiedliche Temperaturlimits zur Nutzung der Luft

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 aufgeführten Rahmenbedingungen und der unterschiedlichen Temperaturlimits für die Umstellung auf Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe, sowie der jeweiligen Wärmepumpenleistungen aus Tabelle 7, ergeben sich die in Abbildung 9 und Tabelle 8 dargestellten Anteile und Werte der genutzten Energiequellen. Durch die Nutzung der Luft als Wärmequelle kann das EWSF entlastet werden. Einerseits reduziert sich der Wärmebezug aus dem EWSF und somit auch der Regenerationsbedarf deutlich, andererseits kann die Entzugsleistung erhöht werden. Dadurch ist die Installation einer Wärmepumpe mit höherer Leistung möglich, sodass insgesamt weniger Biogas benötigt wird. Der Regenerationsbedarf reduziert sich bei einer Umschalttemperatur von minus 1 °C von 18.9 GWh auf 8.4 GWh (minus 55 %) im Vergleich zur Variante ohne Umschaltung.

	Kein Umschalten	5°C	3°C	1°C	-1°C
Leistung (MW)	4	5.7	6.4	7.9	10

Tabelle 7 Installierte Wärmepumpenleistungen bei den verschiedenen Temperaturlimits.

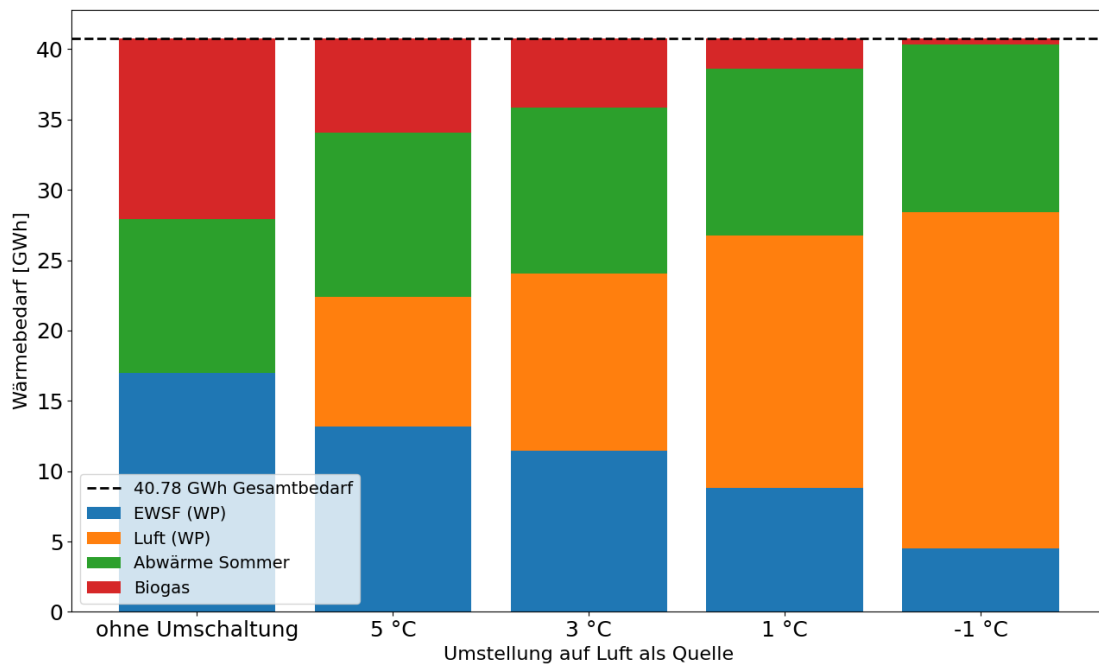


Abbildung 9 Resultierende Anteile der Wärmequellen bei unterschiedlichen Temperaturlimits für die Umstellung von EWSF zu Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe bei einem Sondenabstand von 6 m (Sondenanzahl: 192).

	Kein Umschalten	5°C	3°C	1°C	-1°C
Biogas (GWh)	12.82	6.69	4.93	2.19	0.46
Abwärme Sommer (GWh)	10.95	11.69	11.79	11.86	11.87
Luft (WP) (GWh)	0	12.61	12.61	17.94	23.95
EWSF (WP) (GWh)	17.00	11.45	11.45	8.79	4.49

Tabelle 8 Resultierende Abdeckung der Wärmequellen bei unterschiedlichen Temperaturgrenzen für die Umstellung von EWSF zu Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe bei einem Sondenabstand von 6 m (Sondenanzahl: 192). Der Gesamtbedarf beträgt 40.78 GWh.

In Abbildung 10 werden diese Anteile der Wärmequellen des Szenarios mit einem Temperaturlimit von 3 °C und einer Wärmepumpenleistung von 6.4 MW über das Jahr verteilt dargestellt.

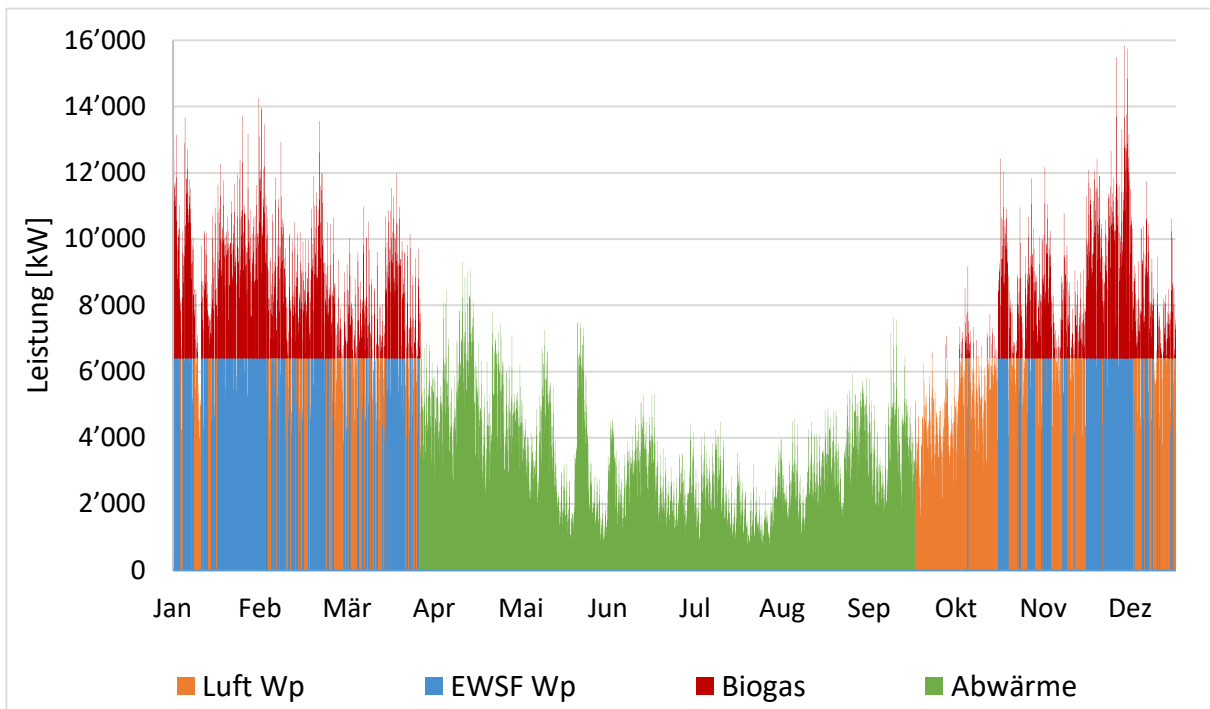


Abbildung 10 Jahresverlauf der Wärmeabdeckung durch verschiedene Quellen mit der Umschaltung bei 3 °C und einer Wärmepumpenleistung von 6.4 MW.

In Tabelle 9 ist die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe für verschiedene Zeiträume und Temperaturlimits zur Umschaltung auf Aussenluft als Wärmequelle dargestellt. Die Berechnung basiert auf stündlichen Werten, die für die saisonale JAZ entsprechend aufsummiert wurden. Da bei EWSF-Simulationen mehrere Jahre betrachtet werden müssen, wurde der Mittelwert aus den Jahren 6 bis 20 verwendet.

Die höchsten JAZ-Werte treten im Herbst auf, da das EWSF durch die Sommerregeneration hohe Quellentemperaturen aufweist (siehe Abbildung 11). In dieser Periode ist auch der Unterschied zwischen Varianten mit und ohne Aussenluft als Quelle am grössten, da die Lufttemperaturen deutlich niedriger sind als die des regenerierten EWSF.

Im Winter verringert sich dieser Unterschied, da das EWSF häufiger genutzt wird und seine Temperatur entsprechend sinkt. Im Frühling liegt die JAZ auf ähnlichem Niveau wie im Winter, sofern die Aussenluft als Quelle verwendet wird. Ohne Nutzung der Luft fällt die JAZ im Frühling deutlich ab, da das EWSF zu diesem Zeitpunkt stark ausgekühlt ist (siehe Abbildung 11).

	Herbst JAZ Okt., Nov.		Winter JAZ Dez., Jan., Feb.		Frühling JAZ März	
Kein Umschalten	3.73		3.06		2.83	
Umschalten bei 5°C	3.25	-13%	3.02	-1.3%	3.05	+7.7%
Umschalten bei 3°C	3.19	-14%	3.01	-1.6%	3.08	+8.8%
Umschalten bei 1°C	3.11	-17%	2.97	-2.9%	3.05	+7.7%
Umschalten bei -1°C	3.01	-19%	2.92	-4.5%	2.95	+4.2%

Tabelle 9 JAZ und relativer Vergleich zur Variante ohne Umschalten der EWS-WP und Luft-WP in den Jahreszeiten mit verschiedenen Temperaturlimits, bei denen die Luft-WP umschaltet.

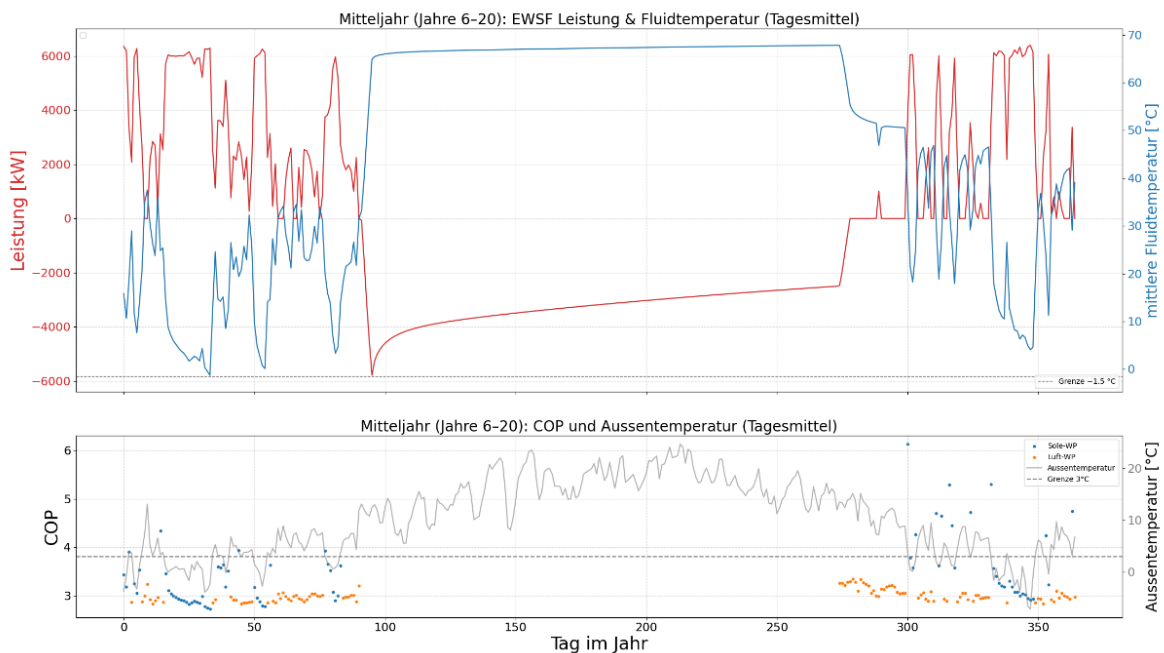


Abbildung 11 Tageswerte eines durchschnittlichen Jahres (Mittelwert aus den Jahren 6 – 20) für die Erdwärmesondenleistung, die Fluidtemperatur und den COP der Wärmepumpe.

Abbildung 12 bis Abbildung 14 zeigen die stündlichen Lasten, Temperaturen der Erdwärmesonden und COP-Werte für den Fall, dass die Umschaltung auf Luft als Wärmequelle bei einer Aussentemperatur von 3 °C erfolgt. Die blauen COP-Werte zeigen die Betriebsphase über das EWSF (niedrige Aussentemperatur) und die roten COP-Werte die Betriebsphase mit Aussenluft als Quelle (höhere Aussentemperaturen).

In den Simulationen beginnt die Nutzung des EWSF im Januar mit voller Auslastung. Dadurch treten in den ersten Jahren unrealistisch tiefe Temperaturen bis -40 °C auf. In der Praxis würde die Regeneration bereits im Sommer starten, und das Feld würde nicht sofort mit voller Kapazität betrieben, da der Netzausbau schrittweise erfolgt.

Nach etwa fünf Jahren stabilisieren sich die Temperaturen im EWSF, weshalb für die Auswertung die Jahre 6 bis 20 verwendet wurden. Die Temperaturgrenze ist so definiert, dass die durchschnittliche Sondentemperatur nicht unter -1.5 °C fällt. Einzelne Eintrittstemperaturen können jedoch kurzfristig darunter liegen. Weitere Grafiken sind im Anhang Kapitel 10.1 zu finden.

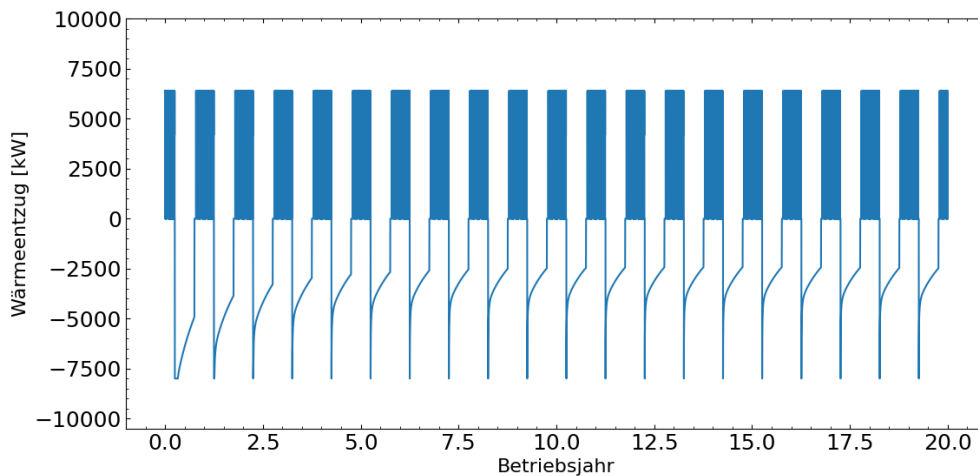


Abbildung 12 Umschalten bei 3°C; Wärmeentzug/-eintrag des EWSF in den 20 Betriebsjahren.

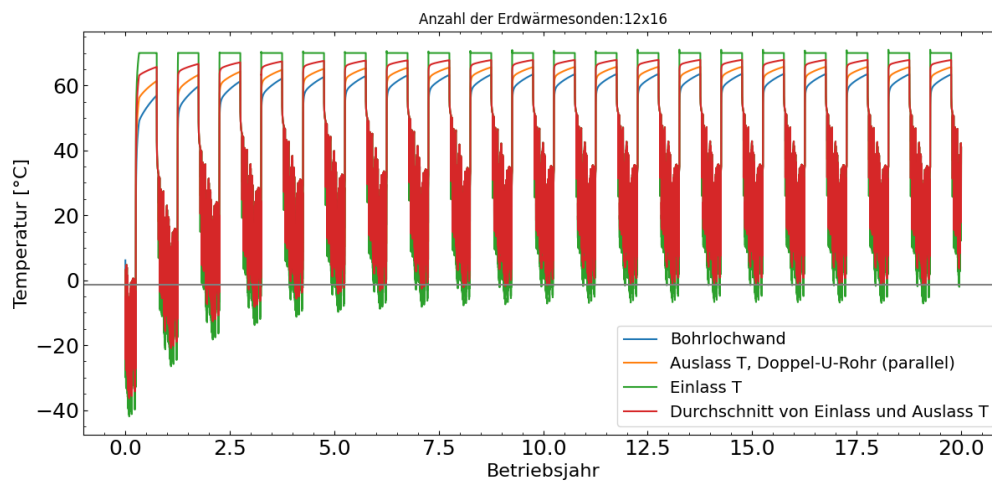


Abbildung 13 Umschalten bei 3°C; Verschiedene Temperaturen im EWSF in den 20 Betriebsjahren.

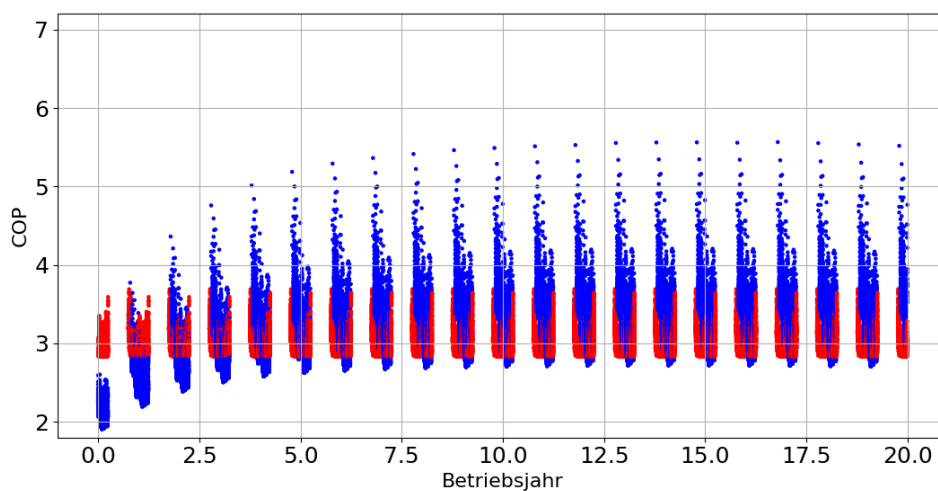


Abbildung 14 Umschalten bei 3°C; COP der Erdwärmesonden-Wärmepumpe (blau) und der Luft-Wärmepumpe (rot) in den 20 Betriebsjahren.

4.3 Weitere Szenarien

Zusätzlich zu den zuvor untersuchten Szenarien wurde analysiert, welchen Einfluss die Regenerationsdauer, die Sondenabstände sowie unterschiedliche Klimaszenarien auf das Verhalten und die Leistungsfähigkeit des EWSF haben.

4.3.1 Regenerationsdauer und Sondenabstände

Die Regenerationsdauer wurde zwischen 6 und 7 Monaten variiert (April–September bzw. April–Oktober). Eine längere Regenerationszeit bedeutet, dass mehr Wärmebedarf durch die KVA-Abwärme gedeckt wird, wodurch der Winterwärmebedarf sinkt. Der durch das EWSF gedeckte Anteil bleibt nahezu gleich (15.85 GWh → 15.98 GWh), wodurch der Deckungsgrad bei 70 °C von 59 % auf 68 % steigt.

Der Sondenabstand beeinflusst direkt die Anzahl der Sonden, die auf einer definierten Fläche installiert werden können. Eine Verringerung des Abstands von 6 m auf 5 m ermöglicht es, zusätzlich 64 Sonden mehr auf der Fläche des Fussballfeldes zu erstellen. Dadurch könnten 81 % des Winterbedarfes durch das Sondenfeld gedeckt werden und bei einer Verlängerung der Regenerationsperiode gar 92 % des Winterbedarfs. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Regene- rations- temperatur	Winter Wärme- bedarf [GWh]	Monate Bedarf	Monate Regene- ration	x	y	Sonden- abstand [m]	Sonden- anzahl	Last gedeckt über EWSF [GWh] ⁵	Last in [%]
70	26.86	Okt - Mär	6 Apr-Sep	16	12	6	192	15.85	59
				19	14	5	266	21.62	81
	23.51	Nov - Mär	7 Apr-Okt	16	12	6	192	15.98	68
				19	14	5	266	21.63	92

Tabelle 10 Über EWSF abgedeckter Wärmebedarf mit 5 m und 6 m Sondenabstände und 6 und 7 Monaten Regeneration.

Abbildung 25 zeigt, dass bei einem Sondenabstand von 5 m und somit 266 Sonden ein Betrieb ohne Luft-Wärmeübertrager mit einem Biogasanteil von lediglich 16% des Gesamtenergiebedarfs möglich wäre. Mit der Einbindung von Aussenluft könnte dieser Anteil weiter auf 4 % resp. 1 % gesenkt werden (für die Einschaltgrenzen 5 °C resp. 3 °C).

⁵ Die Differenz zwischen den beiden Regenerationszeitfenstern bei gleicher Sondenanzahl entsteht aufgrund leicht unterschiedlicher Simulationsrandbedingungen. Eine längere Regenerationsdauer führt in der Praxis nicht zu einer geringeren absoluten Wärmeabdeckung.

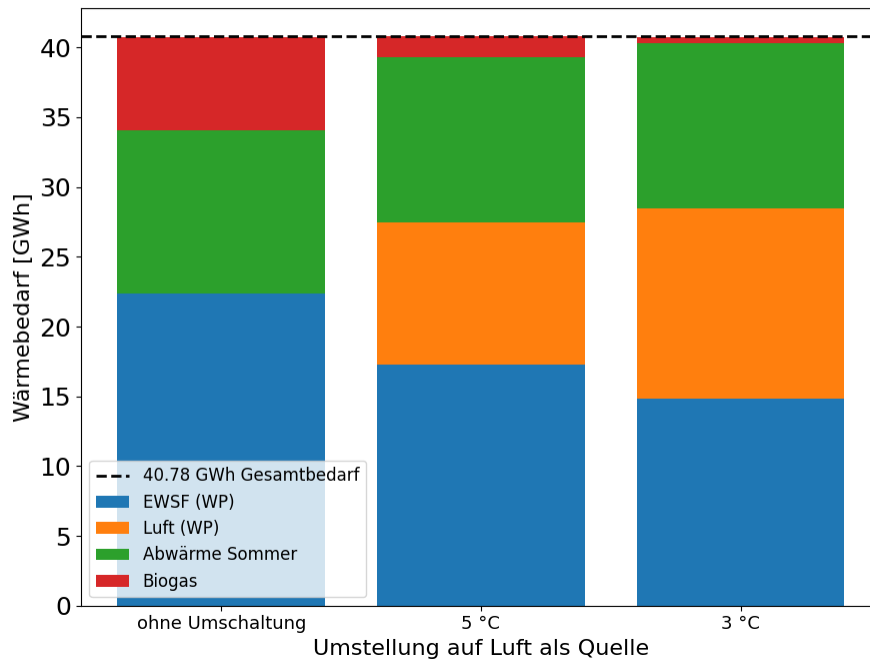


Abbildung 15 Resultierende Anteile der Wärmequellen bei unterschiedlichen Temperaturlimits für die Umschaltung von EWSF zu Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe bei einem Sondenabstand von 5 m (Sondenanzahl: 266).

	Kein Umschalten	5°C	3°C
Leistung (MW)	5.7	8.5	10
Biogas (GWh)	6.69	1.48	0.46
Abwärme Sommer (GWh)	11.69	11.87	11.87
Luft (WP) (GWh)	0	10.12	13.57
EWSF (WP) (GWh)	22.39	17.31	14.87

Tabelle 11 Installierte Wärmepumpenleistungen und resultierende Abdeckung der Wärmequellen bei unterschiedlichen Temperaturgrenzen für die Umstellung von EWSF zu Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe bei einem Sondenabstand von 5 m (Sondenanzahl: 266).

4.3.2 Vergleich von zentralen und dezentralen EWSF

Zur Bewertung unterschiedlicher Feldkonfigurationen wurde eine zusätzliche Simulation mit zehn kleineren Feldern à 4x4 Sonden durchgeführt. Obwohl die Gesamtanzahl der Sonden gleich bleibt (192 Sonden), kann diese Variante nur 13.8 GWh des Winterwärmebedarfs decken, was 13 % weniger ist im Vergleich zu einem grossen EWSF (15.85 GWh, siehe Tabelle 12). Auf den Gesamtwärmebedarf bezogen sind das 7 % weniger. Die Ursache dafür sind die höheren thermischen Verluste bei kleineren Feldern. Diese sind bedingt durch die grösseren Randzonen und das geringere nutzbare Volumen pro Feld.

Regenerations-temperatur	Winter Wärme-bedarf [GWh]	Monate Bedarf	Monate Regene-ration	x	y	Sonden-abstand [m]	Sonden-anzahl	Anzahl Felder	Last gedeckt über EWSF [GWh]	Last in [%]
70	26.86	Okt-Mär	6 Apr-Sep	4	4	6	16	12	13.8	52
				16	12		192	1	15.85	59

Tabelle 12 Vom EWSF abgedeckter Wärmebedarf mit einem grossen und zehn kleineren Feldern.

4.3.3 Zukünftiges Klimaszenario

Für eine Abschätzung unter zukünftigen Bedingungen wurden die Standard-Wetterdaten durch das Szenario RCP8.5 2060 DRY ersetzt. Dadurch sinkt der Gesamtbedarf um etwas weniger als 10 % und der Bedarf, der über das EWSF gedeckt werden sollte (Oktober–März) um rund 9 %, da das Klima insgesamt milder wird. Die Spitzenlasten bleiben jedoch nahezu unverändert, da die Kälteperioden mit tiefen Aussentemperaturen über längere Zeit bestehen bleiben. Unter den gegebenen Randbedingungen kann das EWSF weiterhin 15.9 GWh/a liefern, wie beim Standardklima. Aufgrund des gesunkenen Winterbedarfs steigt der Deckungsgrad von 59 % auf 64 %. Die Resultate sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Klima	Regene-ration-temperatur	Winter Wärme-bedarf [GWh]	Monate Bedarf	Monate Regene-ration	x	y	Sonden-abstand [m]	Sonden-anzahl	Last gedeckt über EWSF [GWh]	Last in [%]
Heute	70	26.86	Okt - Mär	6 Apr-Sep	16	12	6	192	15.85	59
Zukunfts-szenario		24.89							15.8	64

Tabelle 13 Resultate der Vergleichssimulationen für zwei verschiedene Klimadaten. Standard-Klimadaten («heute») und Klimadaten mit Berücksichtigung der Klimaerwärmung (RCP8.5 2060 DRY).

5 Wirtschaftlichkeit

Neben den technischen Aspekten wurde im Rahmen des Projekts untersucht, welchen Einfluss die Regenerations- bzw. Beladungstemperatur des EWSF auf die Wärmegestehungskosten (WGK) hat. Zusätzlich wurde analysiert, wie sich der Einsatz eines Rückkühlers (Luftwärmetauscher) sowie die Energiekosten für Biogas auf die WGK auswirken.

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten wurden Investitions-, Betriebs- und Energiekosten berücksichtigt. In die Analyse flossen ausschliesslich variable Parameter ein, da im Projekt der relative Vergleich zwischen den Varianten im Vordergrund stand – nicht die absoluten Kostenwerte. Konstant bleibende Grössen wurden bewusst ausgeklammert, was zur Folge hat, dass die ausgewiesenen WGK unter den realen Kosten einer tatsächlichen Umsetzung liegen. Die ausgewiesenen Kosten umfassen: Investitionskosten (Transportleitung inkl. Tiefbau, Wärmepumpe, Luft-WT, EWS, Gaskessel), Energie- und Leistungskosten (Elektrizität, Biogas, Abwärme), Betriebskosten und Kapitalkosten (Annuitätsrechnung). Nicht berücksichtigt sind Kosten für die Energiezentrale, Planung, Netzausbau, Wärmeübergabestationen und Anschlusskosten Gas.

Die verwendeten Berechnungsparameter sind im Anhang Kapitel 10.3 zusammengefasst.

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der WGK in Abhängigkeit von der maximalen Beladungstemperatur. Mit steigender Beladungstemperatur reduziert sich die Grösse des EWSF, was zu geringeren Kapitalkosten (CAPEX) führt. Eine Erhöhung der Regenerationstemperatur von 20 °C auf 40 °C senkt die Wärmegestehungskosten (WGK) um rund 8 %. Eine weitere Erhöhung von 40 °C auf 70 °C reduziert die WGK um zusätzliche vier Prozentpunkte. Die Kurve zeigt, dass die Kostenreduktion anfangs deutlich stärker ausfällt und ab etwa 40 °C nahezu linear verläuft. Bei hohen Regenerationstemperaturen ist zu beachten, dass die Temperaturdifferenz zum Vorlauf sinkt, wodurch weniger Leistung übertragen werden kann. Dies erfordert grössere Rohrdurchmesser.

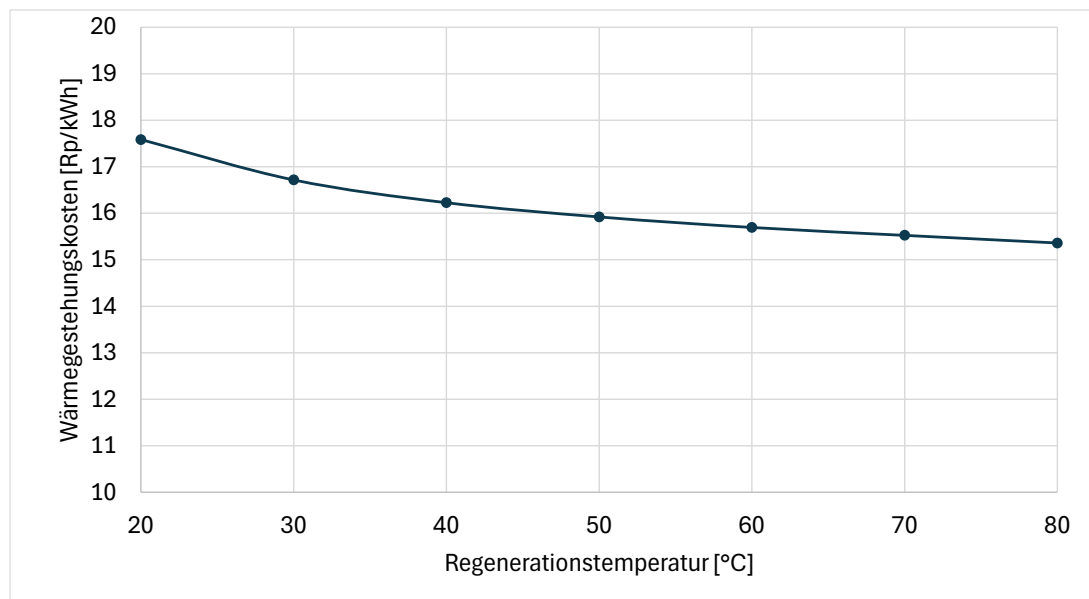


Abbildung 16 Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Beladungstemperatur des EWSF (konstante Wärmeabdeckung, variable Sondenanzahl).

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2 zeigen, dass durch die Nutzung von Luft als Wärmequelle über Rückkühler der Biogasanteil deutlich reduziert und gleichzeitig der Versorgungsgrad über die Wärmepumpe erhöht werden kann. Der Einfluss verschiedener Varianten zur Umschaltung zwischen EWSF und Luft-Rückkühler auf die Wärmegestehungskosten (WGK) ist in Abbildung 17 dargestellt. Zur Untersuchung der Sensitivität wurden die Energiekosten für Biogas (links) und Elektrizität (rechts) variiert.

Die Auswertung in Abbildung 17 verdeutlicht, dass die WGK bei Variante 1 (ohne Luft-Rückkühler) stark vom Biogaspreis abhängt, da der Deckungsanteil von Biogas mit 31 % entsprechend hoch ist (vgl. Abbildung 9). Im Gegensatz dazu weist Variante 5 einen sehr geringen Biogasanteil von nur 1 % auf und ist daher stärker von den Elektrizitätspreisen beeinflusst. Variante 1 stellt bis zu einer Biogaspreissteigerung von etwa 30 % die kostengünstigste Lösung dar. Dies liegt daran, dass eine kleinere Wärmepumpenleistung mit geringeren Kosten ausreicht, da hohe Leistungen durch den Gaskessel gedeckt werden.

Die Analyse zeigt zudem, dass die Substitution von Gas durch ein vergrössertes EWSF (Variante 6) zu hohen Kosten führt und somit keine wirtschaftlich sinnvolle Alternative darstellt. Steigende Biogaspreise begünstigen hingegen die Varianten mit Luft-Rückkühler. Änderungen des Strompreises haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Varianten, da insbesondere sehr niedrige Strompreise im Winter in absehbarer Zeit als unwahrscheinlich gelten (vgl. -60 % Punkt, Darstellung rechts).

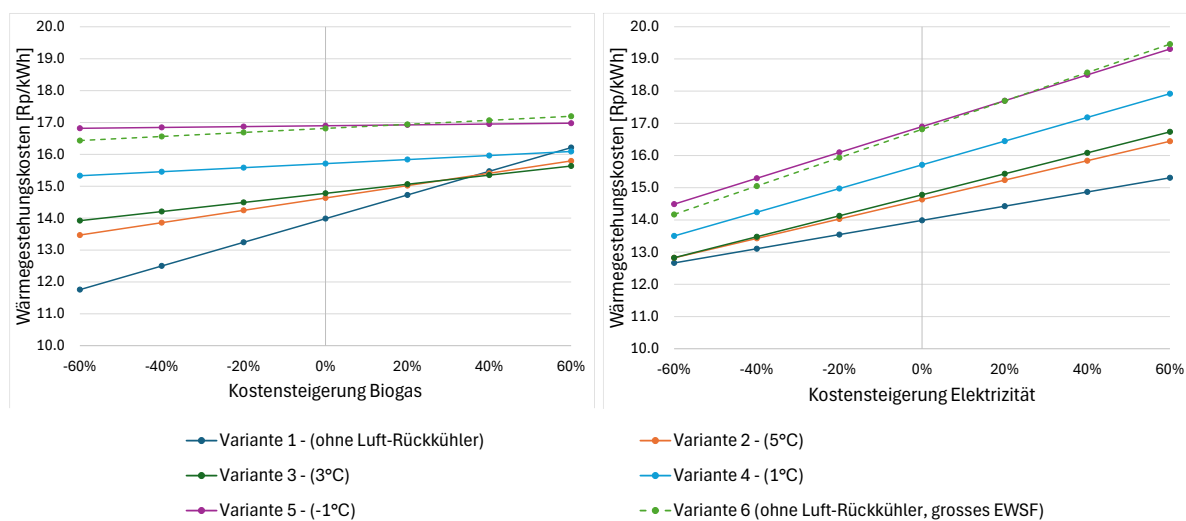


Abbildung 17 Wärmegestehungskosten für die verschiedenen Varianten in Abhängigkeit der relativen Energiekosten für Biogas (links) und Elektrizität (rechts).

Die Analyse der in Abbildung 18 dargestellten relativen Mehrkosten der Varianten im Vergleich zur Referenzvariante 1 zeigt, dass eine Umschaltungstemperatur im Bereich von 3 °C bis 5 °C ein wirtschaftlich sinnvolles Betriebsoptimum darstellt. Bei Umschaltungstemperaturen unterhalb dieses Bereichs entstehen zusätzliche Kosten infolge vermehrter Enteisungsvorgänge am Rückkühler, was sich in einem signifikanten Kostensprung zwischen Variante 3 und Variante 4 widerspiegelt.

Die Varianten 2 und 3, welche den Einsatz eines Luft-Rückkühlers integrieren, erweisen sich als ökonomisch attraktive Alternativen zur Referenzlösung mit hohem Biogasanteil. Nur bei sehr niedrigen Biogaspreisen weisen dies beiden Varianten deutlich Mehrkosten auf – ein Szenario, das unter aktuellen und prognostizierten Marktbedingungen als wenig wahrscheinlich einzustufen ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Sensitivität gegenüber Elektrizitätspreisveränderungen im Vergleich geringer ausfällt, was die relative Preisstabilität dieser Varianten unterstreicht.

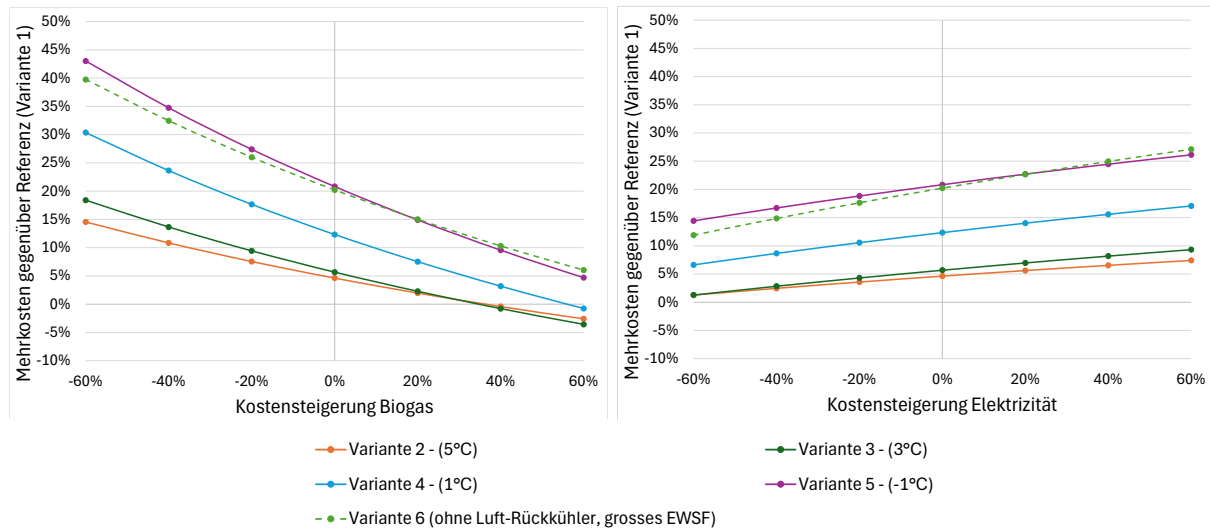


Abbildung 18 Relativer Kostenvergleich der verschiedenen Varianten gegenüber der Referenz (Variante 1 – ohne Luft-Rückkühler) in Abhängigkeit der relativen Energiekosten für Biogas (links) und Elektrizität (rechts).

6 Weitere Abklärungen

6.1 Zonen- und Nutzungsplan

Um die technische Machbarkeit in Wallisellen nachzuweisen, wurden die möglichen EWSF im Sportzentrum angeordnet. Hier bietet sich die Möglichkeit die EWSF unter Kunstrasenflächen von Fussballfeldern zu realisieren und so auf hohe Temperaturen zu regenerieren. In der Zonenplanung sind diese in der Zone für öffentliche Bauten wie in Abbildung 19 dargestellt. Das Erstellen von EWSF ist daher Zonenkonform.

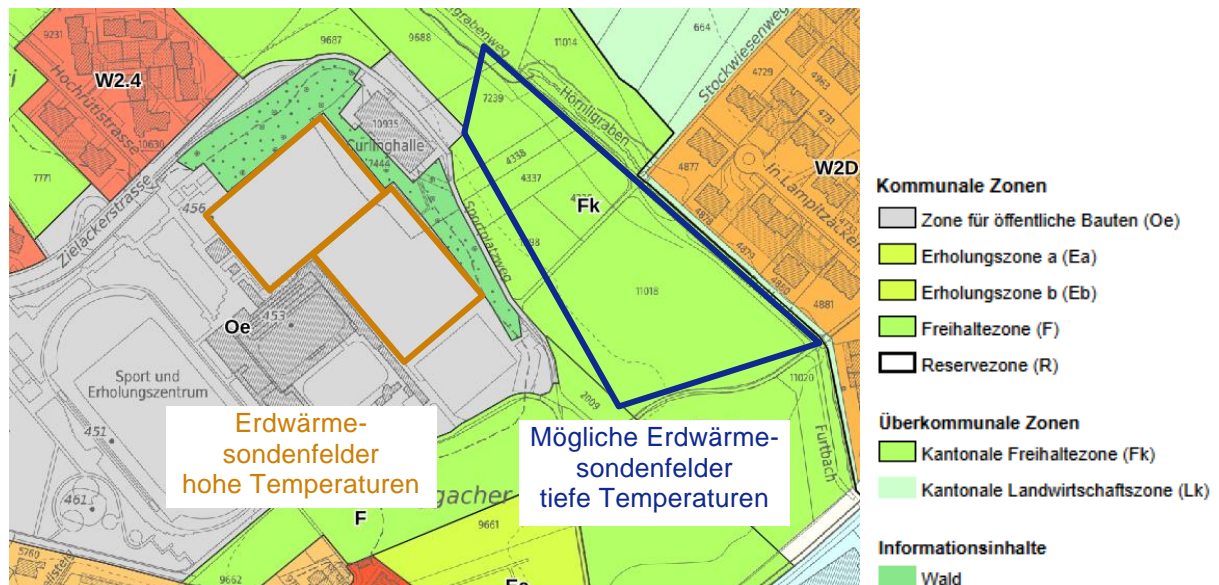


Abbildung 19 Grundnutzung der Zonen bei den Erdwärmesondenfeldern (Quelle: GIS ZH [2]).

Eine mögliche Kapazitätserhöhung durch das Erstellen von EWSF im blau eingezeichneten Gebiet (ohne Regeneration auf hohe Temperaturen), würde zu einem Teil Ackerfläche und zum anderen Teil Kunstwiesen betreffen. Diese landwirtschaftlichen Nutzungen werden in Abbildung 20 dargestellt. Die thermische Nutzung dieser Flächen ist mit vielen Unsicherheiten behaftet und wäre nach aktuellem Stand nicht Zonenkonform. Eine Bewilligungsfähigkeit wäre bei Bedarf vertieft zu prüfen.

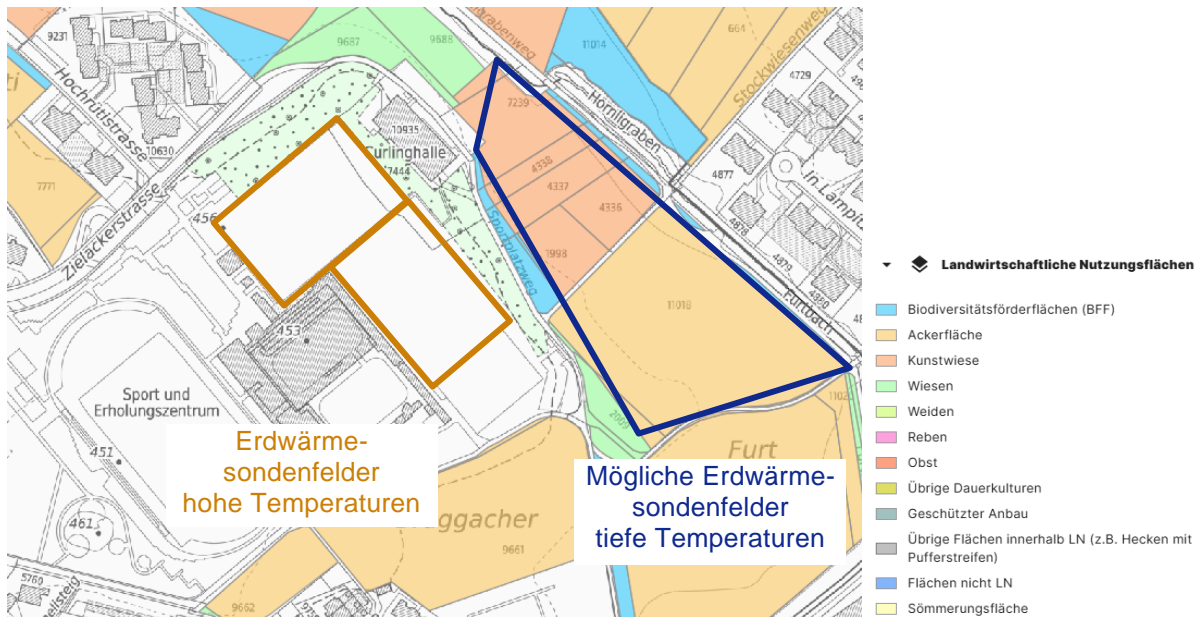


Abbildung 20 Landwirtschaftliche Nutzungsflächen bei den Erdwärmesondenfelder (Quelle: GIS ZH [2]).

6.2 Einfluss auf Grundwasserschutzzone

Bei der Bewilligung durch den Kanton hat die Beeinflussung (z. B. Erwärmung) von Grundwasser durch den Einbau von Erdwärmesonden einen hohen Stellenwert. Für Untergrund ohne Grundwasservorkommen gelten keine Beschränkungen. In der Nähe des möglichen EWSF, das auf relativ hohe Temperaturen bis ca. 70 °C erhitzt werden soll, befindet sich ein Grundwasserleiter. Die Situation ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Schutzzone (S) ist etwa 245 m entfernt, die blaue Zone mit Grundwasservorkommen (Au) 115 m. Das zweite, für weitere Ausbauschritte ev. verfügbare Fussballfeld wäre nur 55 m vom Grundwasserleiter entfernt.

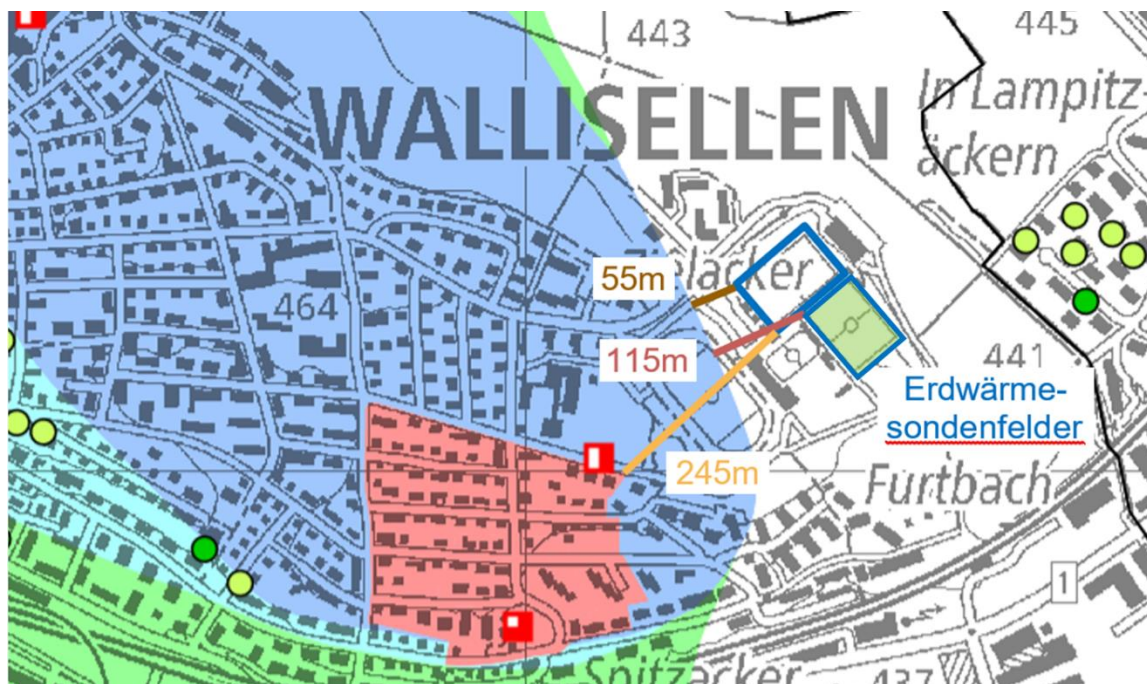


Abbildung 21 Abstand des Erdwärmesondenfeldes zu den eingeschränkten Zone (Quelle: GIS ZH [2]).

In der Wegleitung zum aktuellen Grundwasserschutz in der Schweiz steht folgendes (Stand 10.10.2025); «Die Wärmenutzung darf insgesamt, das heisst unter Berücksichtigung aller im betrachteten Grundwassergebiet installierten Anlagen, die natürliche saisonale Temperatur des Grundwassers um nicht mehr als 3 °C verändern. In der unmittelbaren Nachbarschaft des Versickerungsbauwerkes, d.h. in einem Umkreis von max. 100 m darf die Veränderung mehr als 3 °C betragen.» [4] Für Untergrund ohne Grundwasser bestehen keine Temperaturbeschränkungen. Weil das Grundwasservorkommen mehr als 100 m vom vorgesehenen EWSF entfernt ist, bestehen in der Umgebung vom EWSF keine Einschränkungen zu Untergrundtemperatur. Es bleibt also nachzuweisen, dass die Erwärmung des Grundwasserleiters mit 115 m Abstand höchstens 3 °C beträgt. Falls in Zukunft das zweite potenzielle EWSF gebaut werden soll, würde sich der Abstand zum Grundwasserleiter auf ca. 55 m verringern.

Für die genauere Analyse der Beeinflussung des EWSF auf das Grundwasser ist die Höhe und Mächtigkeit des Grundwasserleiters einbezogen worden. Der nächste Punkt mit Grundwasservorkommen ist auf 454 m.ü.M. und die Abbildung 22 zeigt, dass das Grundwasservorkommen dort zwischen 440 und 435 m.ü.M. liegt, also ungefähr 14 bis 19 Meter unter der Erde. Zudem ist die Grundwassermächtigkeit 2 bis 10 Meter.

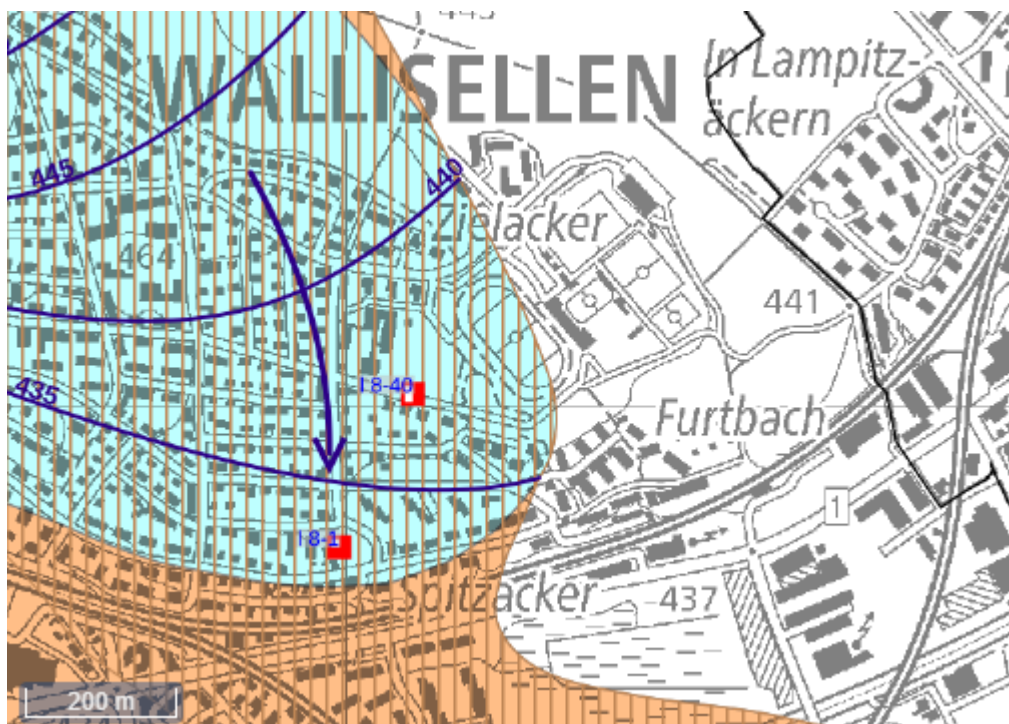


Abbildung 22 Grundwassertiefe und -mächtigkeit nahe dem EWSF (Quelle: GIS ZH [2]).

Um den langfristigen thermischen Einfluss des EWSF in geringer Tiefe zu analysieren, wurde die Finite-Line-Source-Superpositionsmethode (FLS) angewendet. Bei diesem Ansatz wird jede Erdwärmesonde als lineare Wärmequelle dargestellt, und es wurden 10 m lange virtuelle Beobachtungsbohrlöcher in 15 m Tiefe in unterschiedlichen Abständen vom Feldrand platziert (Abbildung 23 und Abbildung 24). Die Grundwasserschicht wurde anhand der Daten in Abbildung 22 abgeschätzt und die Höhe der Beobachtungsbohrlöcher daran angepasst.

Das FLS-Modell liefert die Sprungantwort der Bodentemperatur an diesen Beobachtungspunkten, welche es mittels eines Wärmeimpulses, und durch das Kombinieren der tatsächlichen Lastinkremente mit diesen Sprungantworten, die zeitliche Entwicklung der Bodentemperatur rekonstruieren kann. Durch Summierung der Beiträge aller Erdwärmesonden ergibt sich die absolute Temperaturentwicklung bei jedem Abstand. Diese Methode ist analytisch und physikalisch fundiert. Sie geht zwar von einem homogenen, durch Wärmeleitung dominierten Untergrund ohne

Grundwasserströmung oder Oberflächengrenzeneffekte aus, liefert jedoch eine robuste Schätzung der Entwicklung der oberflächennahen Bodentemperatur rund um das Feld.

Für die Simulation der Erdreichtemperaturen beim Grundwasserleiter wurde dieselben Parameter, wie bei der oben beschriebenen Modellierung, z.B. Wärmeleitfähigkeit = 2.06 W/m/K (siehe auch Tabelle 4) und die Sondenbelastung der Variante mit 196 Sonden, einer Aussenluftnutzung ab 3 °C und Biogasspitzen (siehe Kapitel 4.2) verwendet.

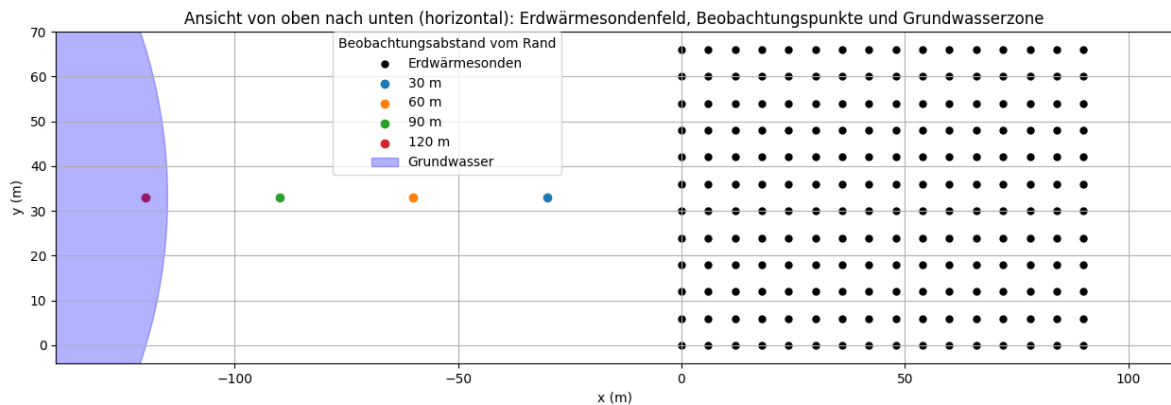


Abbildung 23 Konfiguration für die Abschätzung der Wärmeeinwirkungen auf die umliegenden Flächen von oben.

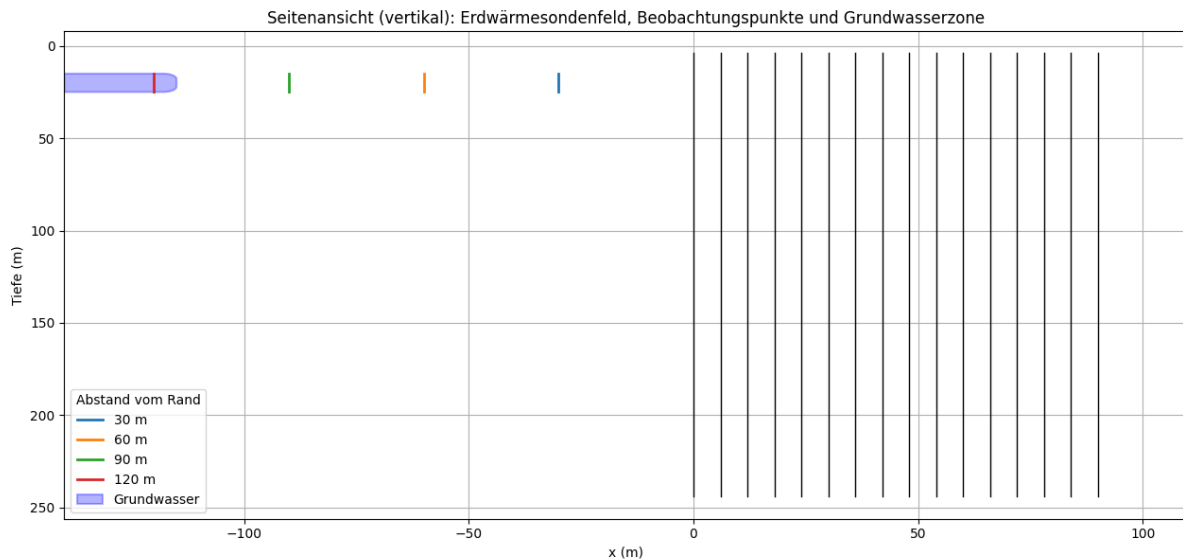


Abbildung 24 Konfiguration für die Abschätzung der Wärmeeinwirkungen auf die umliegenden Flächen von der Seite.

Die Ergebnisse der Simulation für geringe Tiefen in Abbildung 25 zeigen, dass der thermische Einfluss des EWSF mit zunehmender Entfernung vom Feldrand rapide abnimmt. An der Feldgrenze (0 m) schwankt die Bodentemperatur aufgrund saisonaler Regeneration stark, mit Amplituden von bis zu ± 15 K und Langzeitwerten, die sich zwischen 30 und 40 °C stabilisieren. Bereits in 30 m Entfernung glätten sich die jährlichen Schwankungen und der mittlere Anstieg der Bodentemperatur bleibt nach 50 Jahren unter 10 K. In 60 m Entfernung ist der Anstieg auf etwa 3 K begrenzt, während er in 90 m Entfernung und darüber hinaus fast vernachlässigbar ist (< 1 K nach 50 Jahren). Da sich das nächste Grundwasservorkommen 115 m vom Feld entfernt befindet, bleibt der berechnete Einflussradius deutlich innerhalb sicherer Grenzen: Es wird erwartet, dass sich das Grundwasser über den gesamten Simulationszeitraum um weniger als 1 K erwärmt. Dies deutet

darauf hin, dass unter den angenommenen Bedarfs- und Regenerationsbedingungen die langfristigen thermischen Auswirkungen der Anlage auf das umgebende Grundwassersystem gering bleiben und den Richtwert von 3 K innerhalb der Lebensdauer des EWSF deutlich unterschreitet. Sollte das EWSF deutlich über die Lebensdauer von 50 Jahre hinaus weiterbetrieben werden, wird die Beeinflussung weiter ansteigen.

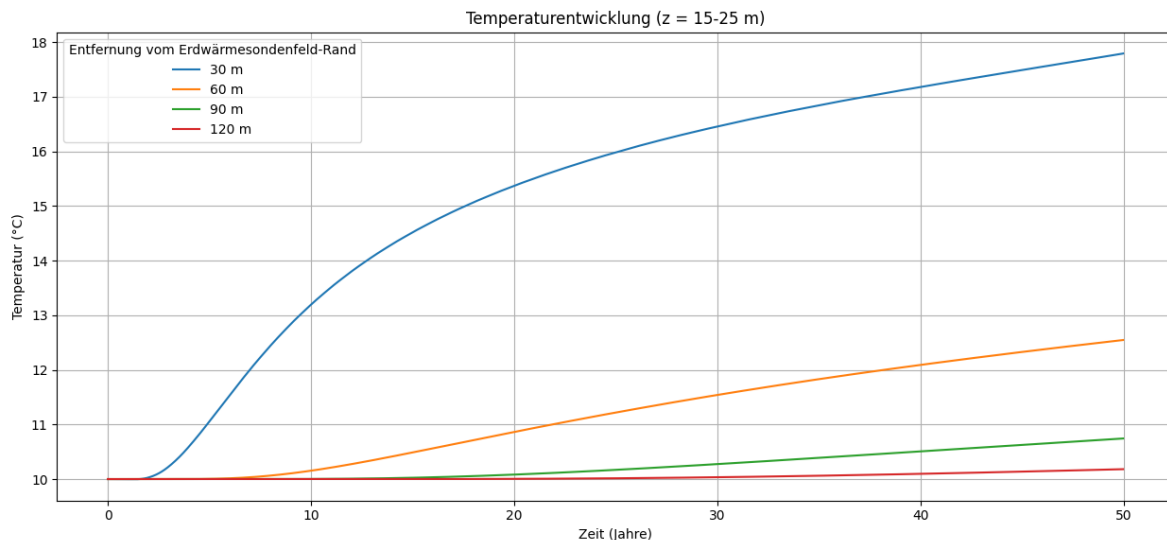


Abbildung 25 Temperatureinfluss über 50 Jahre auf die verschiedenen Entfernungen.

6.3 Minimaler Abstand der Erdwärmesonden

Ein wichtiger Aspekt um auf beschränkten Oberflächen viele Sonden realisieren zu können ist der Abstand zwischen den EWS. Aufgrund folgender Recherchen wurde in diesem Projekt ein Sondenabstand von 6 m gewählt:

Die SIA 384/6 gibt zu dem Thema folgende Regelung; «Aus bohrtechnischen Gründen ist bei vertikalen Bohrungen zwischen einzelnen Erdwärmesonden ein minimaler Abstand von 5 m einzuhalten. Kleinere Abstände bedürfen einer Risikoabwägung und einer expliziten Absprache.» [5] Darauf stützen sich auch Bohrfirmen, welche zu diesem Thema kontaktiert wurden. Bohren mit weniger Abstand ist möglich, das Risiko einer Anbohrung von bereits gebohrten Sonden steigt aber an und muss in Absprache mit dem Bauherren von diesem getragen werden. Unter dem Forschungscampus der EMPA, liegt das erste Schweizer Hochtemperatur-Erdwärmesondenfeld. Die 144 Sonden dort sind 100 Meter tief, in sechseckiger Geometrie angeordnet und haben einen Abstand von 4.5 m zueinander [6]. Wie viel Abstand die Sonden haben sollten hängt auch von der Tiefe der Sonden ab. Die VDI 4640 macht folgende Angaben zu den Bohrlochabständen; «zwischen 50-100 m langen Sonden: 6 m, zwischen 40-50 m langen Sonden: 5 m». Der Abstand für EWS von mehr als 100 m wird nicht angegeben, die Formulierung lässt aber die Interpretation zu, dass ab 100 m noch grössere Abstände gefordert werden. Die deutschen Vorgaben der VDI verlangen somit bei langen Sonden grössere Abstände als die Schweizer SIA.

Die gewählten 6 m Sondenabstand stellen also einen Kompromiss zwischen den Empfehlungen der VDI und der SIA dar. Der Abstand liegt leicht über dem von der SIA angegebenen Minimalabstand. Auf der anderen Seite empfiehlt die VDI einen Sondenabstand von 6 m nur bis zu einer Tiefe von 100 m und hier wird von deutlich tieferen Sonden mit 240 m Länge ausgegangen.

Um den Vorgaben der Schweizer SIA Rechnung zu tragen, wurden die wichtigsten Berechnungen aber auch mit einem Sondenabstand von 5 m und entsprechend mehr Sonden auf derselben Fläche durchgeführt.

6.4 Wärmeauswirkungen auf die Rasenfläche

Während dem Projektverlauf hat sich gezeigt, dass die Wärmeversorgung grundsätzlich mit einem EWS-Feld unterhalb eines Fussballfeldes auskommen kann. Aus diesem Grund wurde die Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen nicht vertiefter betrachtet.

Eine Analyse zum Thema Erdsonden unter Sportrasen wurde kürzlich vom ecosense im Auftrag der Stadt Zürich publiziert [7], wobei laut Schlussfolgerung wenig konkrete Aussagen gemacht werden konnten: «Anhand der Literaturrecherche für diesen Bericht konnte nicht endgültig geklärt werden, ob und in welcher Weise sich das Rasenwachstum langfristig durch die Einwirkung eines EWSF verändert».

In Wallisellen ist vorgesehen, das EWS-Feld unterhalb eines Fussballfeldes zu erstellen, bei welchem der natürliche Rasen in den nächsten Jahren durch einen Kunstrasen ersetzt werden soll. Kunstrasen erwärmen sich im Sommer durch die Sonneneinstrahlung auf ca. 60 °C (Aussage von Hersteller Tisca), daher ist eine Erwärmung durch ein Sondenfeld im Untergrund als weniger kritisch anzusehen als bei natürlich begrünten Oberflächen. Anhand einfacher Berechnungen kann der Einfluss des Sondenfeldes mit natürlichen Einflüssen verglichen werden.

Laut DIN18035-7 (siehe Abbildung 26) ist bei Aufbau eines Kunstrasens unterhalb eines variablen Aufbaus von einigen cm mit einer Tragschicht ohne Bindemittel von 20 cm und einem Drainagesystem zu rechnen. Für die Tiefe des Drainagesystems werden keine Angaben gemacht, aufgrund des Drainagesystems kann aber gesamt mit mindestens 50 cm trockenem, ungebundenen Untergrund gerechnet werden. Der deutsche Bundesverband für Geothermie gibt für «Kies, Sand trocken» eine typische Wärmeleitfähigkeit von 0.3-0.8 W/(mK) an, wobei für erste Abschätzungen hier ein Wert von 0.5 W/(mK) angenommen wird. Für eine grobe Beurteilung kann der Wärmedurchgang durch diese Schicht für typische Bedingungen berechnet und mit typischen Werten der Solareinstrahlung verglichen werden. In Tabelle 14 sind die berechneten Resultate zusammengefasst. Ebenfalls wurde betrachtet welchen Effekt die Berücksichtigung einer Dämmschicht von 10 cm hat (Leitfähigkeit von 0.04 W/(mK) z.B. für Foamglas). Als mögliche Erdreichtemperaturen werden Extremwerte von 0 °C im Winter und 70 °C im Sommer angenommen. Die Auslegung auf -1.5 °C mittlere Soletemperatur nach SIA soll Minustemperaturen am Sondenrand ausschliessen. Weil hier mit höheren Entzugsleistungen gerechnet wird, ist von einer grösseren Temperaturdifferenz zwischen Sole und Erdreich als im SIA Auslegungsfall auszugehen. Daher ist im Winter mit einer Erdreichtemperatur leicht über 0 °C und aus demselben Grund im Sommer leicht unter 70 °C auszugehen.

Für den Betrieb kritische Situationen sind zum einen eine sehr hohe Rasentemperatur im Sommer. Es zeigt sich aber, dass selbst bei konservativen Annahmen ohne zusätzliche Dämmung, der Wärmeeintrag durch das EWSF lediglich 3 % der Solarstrahlung ausmacht. Somit ist gegenüber der Solarstrahlung von einem untergeordneten bis vernachlässigbaren Effekt auszugehen.

Zum anderen könnte eine Auskühlung und vermehrtes Gefrieren der Oberfläche im Winter kritisch sein. Weil aber im Erdreich keine Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erwartet werden, ist auch dieser Effekt gering. An warmen Wintertagen ist zwar von einer Auskühlung der Oberfläche auszugehen, bei sehr tiefen Temperaturen eher von einer leichten Erwärmung.

Selbst ohne Wärmedämmung ist von einem gegenüber der Solareinstrahlung geringen Effekt auszugehen, der durch das Einbringen einer Dämmschicht weiter verringert werden könnte.

	EWS	Rasen- oberfläche	Sonnen- einstrahlung typisch	Verlust aus Erdspeicher mit Dämmung		Verlust aus Erdspeicher ohne Dämmung	
	[°C]	[C°]	[W/m ²]	[W/m ²]		[W/m ²]	
Sommer sonnig	70	50	800	5.7	1%	20	3%
Sommer bewölkt	70	20	200	14.3	7%	50	25%
Sommer Nacht	70	10	-100	17.1	-17%	60	-60%
Winter sonnig	0	20	400	-5.7	-1%	-20	-5%
Winter bewölkt	0	5	100	-1.4	-1%	-5	-5%
Winter Nacht	0	-10	-100	2.9	-3%	10	-10%

Tabella 14 Wärmeverluste (und -gewinne) über die Kunstrasenoberfläche für unterschiedliche Situationen im Vergleich zu typischen Werten für den Strahlungsaustausch.

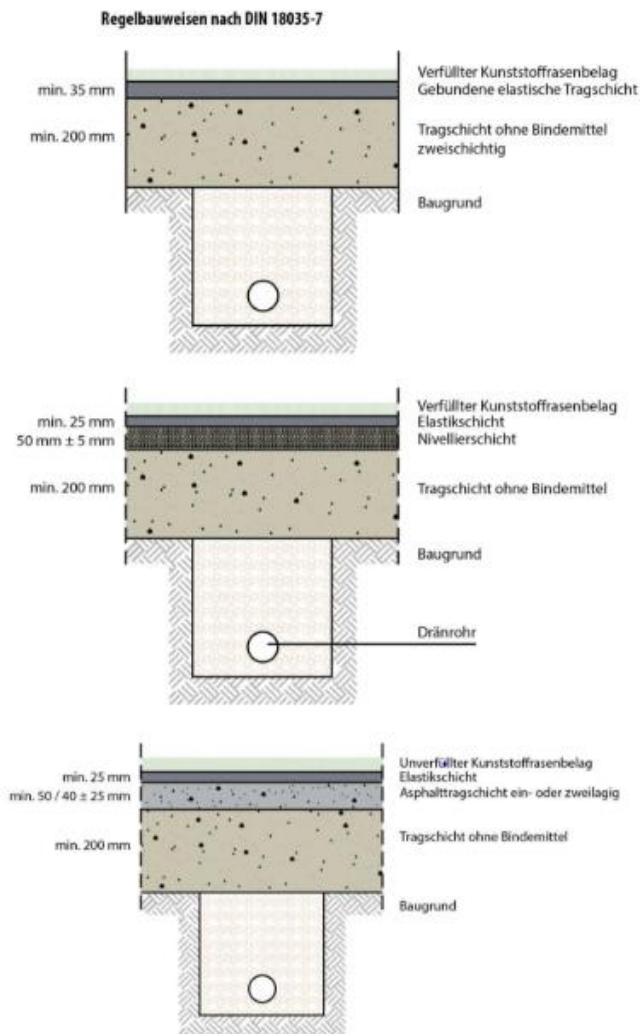


Abbildung 26 Unterschiedliche Aufbauten für die Erstellung eines Kunstrasens nach DIN (Quelle: <https://www.sportplatzwelt.de/fachwissen/20160/kunstrasen-normen-systemaufbau-und-technische-kriterien>).

7 Schlussfolgerungen und weitere Schritte

Die Machbarkeitsstudien für ein thermisches Netz in Wallisellen gingen ursprünglich von über 1'000 Erdwärmesonden (EWS) aus, was entsprechend hohe Kosten und einen grossen Platzbedarf bedeutet hätte. Die Studie zeigt jedoch, dass sich die Anzahl der Sonden durch die Einbindung von Sommerabwärme und eine Regeneration mit hohen Temperaturen drastisch reduzieren lässt. Das vorgeschlagene Konzept kommt mit 192 Sonden unter einem Kunstrasen-Fussballfeld aus.

Einbindung der KVA zur direkten Wärmenutzung

Die Nutzung der Abwärme aus der KVA-Hagenholz deckt rund 25 % des Gesamtwärmebedarfs im Sommer und in der Übergangszeit direkt. Damit wird die Belastung des EWSF reduziert, was wiederum zu einem höheren Deckungsgrad in den Wintermonaten führt.

Regeneration mit hohen Temperaturen

Durch die Regeneration des EWSF auf 70 °C statt 20 °C kann die Anzahl der Sonden um etwa den Faktor drei verringert werden. Dies wird durch eine erhebliche Steigerung der Wärmekapazität und der Spitzenentzugsleistung des EWSF erreicht. Im Gegensatz zu bekannten Beispielen von Erdsondenspeichern wird hier jedoch keine Hochtemperaturnutzung angestrebt. Stattdessen werden die Sonden im Winter vollständig bis zur von der SIA 384/6 definierten Durchschnittstemperatur von –1,5 °C ausgekühlt. Durch diese starke Auskühlung im Winter halten sich die Wärmeverluste in Grenzen und pendeln sich nach einer Aufwärmphase im langjährigen Betrieb bei ca. 20 % ein. Mit 192 Sonden können 59 % des Wärmebedarfs im Winter gedeckt werden. Der verbleibende Spitzenbedarf muss anderweitig, beispielsweise durch Biogas, gedeckt werden. Bei einem Sondenabstand von lediglich 5 m können 266 Sonden auf dem untersuchten Fussballfeld platziert werden, wodurch sich die Abdeckung des Winter-Wärmebedarfs auf 81 % erhöht.

Entlastung durch Luft/Wasser-Rückkühler

Zur Entlastung des EWSF und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit wurde die Integration von Luft/Wasser-Rückkühlern als zusätzliche Wärmequelle und Redundanz untersucht. Diese Rückkühler kommen zum Einsatz, wenn die Aussentemperatur eine definierte Grenztemperatur überschreitet. Je niedriger diese Grenztemperatur gewählt wird, desto grösser ist der Anteil der Aussenluft an der Wärmebereitstellung und desto stärker wird das EWSF entlastet. Diese Entlastung ermöglicht höhere Entzugsleistungen aus dem EWSF und reduziert den Bedarf an Biogas für die Spitzenlastdeckung.

Ab einer Aussentemperatur von etwa 3 °C kann die Aussenluft ohne Massnahmen zur Enteisung am Wärmeübertrager genutzt werden. Bei dieser Betriebsweise lässt sich der Biogasanteil auf 12 % des gesamten Wärmebedarfes senken.

Die Einbindung von Aussenluft als Wärmequelle würde das Energiesystem flexibler und resilienter machen. Sie könnte beispielsweise auch für die Kühlung eingesetzt werden. Zudem eröffnen sich dadurch zusätzliche Optionen bezüglich der Sektorkopplung. So könnte beispielsweise die aktive Regeneration der Erdwärmesonden und die Nutzung der Luft als Quelle bei tiefen Strompreisen oder als Regelleistung in Betracht gezogen werden.

Wirtschaftlichkeit

Die Wärmegestehungskosten zeigen, dass ein hoher Biogasanteil trotz hoher Brennstoffkosten aktuell die wirtschaftlichste Lösung ist, da die Kapitalkosten niedrig sind. Langfristig ist die Verfügbarkeit von Biogas oder anderen erneuerbaren Gasen jedoch unsicher. Eine Kombination aus EWSF und Luft-Rückkühlern bei einer Grenztemperatur von etwa 3 °C stellt eine technisch und ökonomisch robuste Lösung dar. Bei Bedarf lässt sich der Biogasanteil noch weiter reduzieren, was jedoch erst bei sehr hohen Preisen für erneuerbare Gase wirtschaftlich wird. Die Regeneration mit hohen Temperaturen verbessert die Wirtschaftlichkeit zusätzlich; der Hauptnutzen liegt jedoch in der markanten Flächenreduktion.

Machbarkeit

Die Umsetzung des Konzepts hängt nicht nur von wirtschaftlichen und energietechnischen Faktoren ab, sondern auch von der praktischen Realisierbarkeit. Ein zentraler Punkt ist die hohe Wärmekapazität des saisonalen Speichers, die nur durch eine grosse Anzahl von Erdwärmesonden erreicht werden kann. Aufgrund der Sondenlängen über 200 m wurde ein Sondenabstand von 6 m gewählt, der etwas über dem von der SIA angegebenen Minimalabstand von 5 m liegt. Somit besteht eine gewisse Sicherheitsmarge.

Weitere kritische Aspekte betreffen die thermische Beeinflussung der Oberfläche (Kunstrasen-Fussballfeld) sowie des Grundwassers in grösserer Entfernung. Die Untersuchungen zeigen, dass weder die Spielfläche noch das Grundwasser in einem Mass beeinflusst werden, das eine Realisierung verhindern würde. Beim Grundwasser ist jedoch eine projektspezifische Prüfung zwingend erforderlich, da die geologischen Bedingungen stark variieren können.

Zusätzliche Massnahmen wie eine Oberflächendämmung sind nach aktuellem Wissensstand nicht notwendig. Die Simulationen bestätigen zudem, dass die Wärmeverluste des saisonalen Speichers gering bleiben, sofern grosse und kompakte EWSF realisiert werden. Werden hingegen mehrere kleine Speicher dezentral angeordnet, steigen die Verluste deutlich, was die nutzbare Wärmemenge reduziert. Aus diesem Grund wird empfohlen, möglichst grosse, zusammenhängende Speicherflächen zu wählen.

Nächste Schritte

Der im Projekt entwickelte Ansatz ermöglicht den Ausbau thermischer Netze, die KVA-Abwärme nutzen und deren Kapazitätsgrenze im Winter erreicht ist. Damit kann der Rohstoff Abfall besser verwertet werden. Das Konzept kann aber auch auf andere sommerliche Abwärmequellen übertragen werden. Zusätzlich können in Regionen, in denen klassische Energiequellen wie Grund-, See- und Flusswasser nicht verfügbar sind, neue Versorgungsmöglichkeiten geschaffen werden. Aufgrund der positiven Ergebnisse hat die werke ein Vorprojekt für den Energieverbund SaisonLink ausgeschrieben und verfolgt das Konzept damit weiter. Zusätzlich findet in Zusammenarbeit mit der Stadt Wallisellen eine Standortevaluation statt, um den optimalen Standort für die technische Infrastruktur zu ermitteln.

Parallel dazu werden in den vom Bundesamt für Energie geförderten Forschungsprojekten PeaknCool4District und DeCarbCH die Integration von Kühlung und deren Einfluss auf das Konzept untersucht.

8 Bibliographie

- [1] Gander B. Tiefenbeschränkung von Erdwärmesonden zum Schutz der Felsaquifere Obere Meeressmolasse und Malm 2015.
- [2] GIS-Browser n.d.
<https://maps.zh.ch/?offlayers=bezirkslabels&scale=320000&srid=2056&topic=AwelGSWaermewwwZH&x=2692500&y=1252500> (accessed March 25, 2025).
- [3] Polysun – Simulations- und Planungssoftware für Energiesysteme. POLYSUN n.d.
<https://www.velasolaris.com/> (accessed October 13, 2025).
- [4] Brühlmann F, Conrad R, Haldimann P, Kempf T, Nöthiger-Koch U. Wegleitung Grundwasserschutz 2004.
- [5] SIA 384/6:2021: Erdwärmesonden 2021.
- [6] Schmid S. Mit dem Erdreich Energie gewinnen 2022.
- [7] Laubis S, Bringolf A. Hilfsmittel Erdwärmesondenfeldbau unter Sportrasenflächen. 2025.

9 Abkürzungsverzeichnis

CAPEX	Capital Expenditure (Investitionskosten)
COP	Coefficient of Performance
DRY	Design Reference Year
EWS	Erdwärmesonden
EWSF	Erdwärmesondenfeld
FLS	Finite-Linie-Source-Superpositionsmethode
JAZ	Jahresarbeitszahl
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
OSM	Obere Süsswassermolasse
RCP	Repräsentativer Konzentrationspfad
WGK	Wärmegestehungskosten

10 Anhang

10.1 Wärmeentzug, Sondentemperatur und COP bei verschiedenen Temperaturlimiten

Fall 1: keine Umschaltung

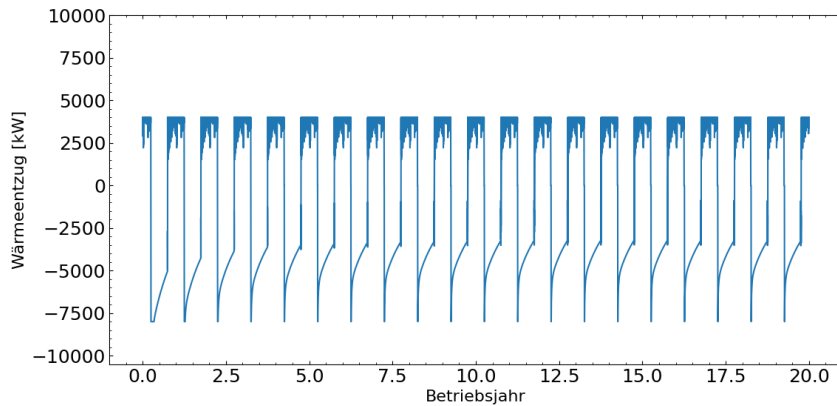


Abbildung 27 Kein Umschalten; Wärmeentzug/-eintrag des EWSF in den 20 Betriebsjahren.

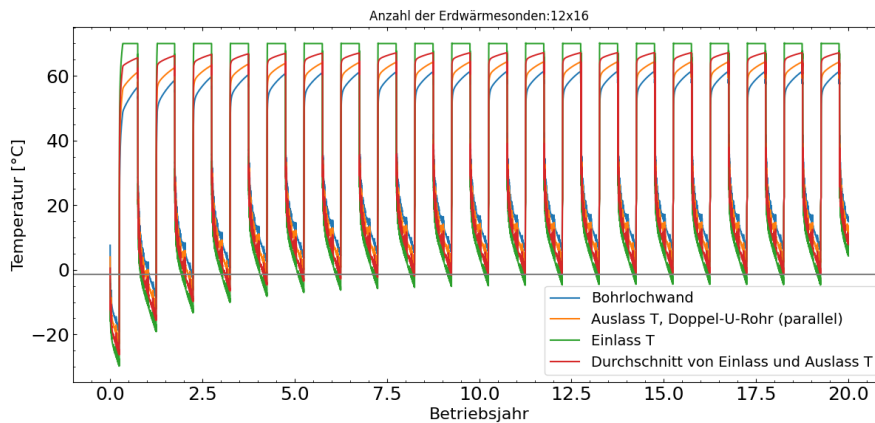


Abbildung 28 Kein Umschalten; Verschiedene Temperaturen im EWSF in den 20 Betriebsjahren.

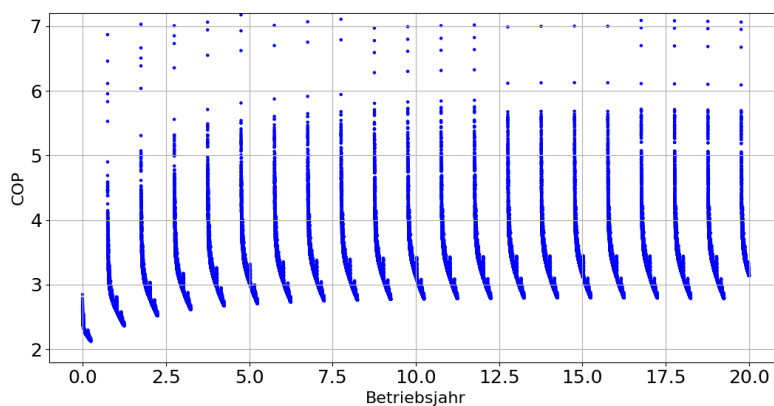


Abbildung 29 Kein Umschalten; COP der Erdwärmesonden-Wärmepumpe in den 20 Betriebsjahren.

Fall 2: Umschaltung bei 5 °C

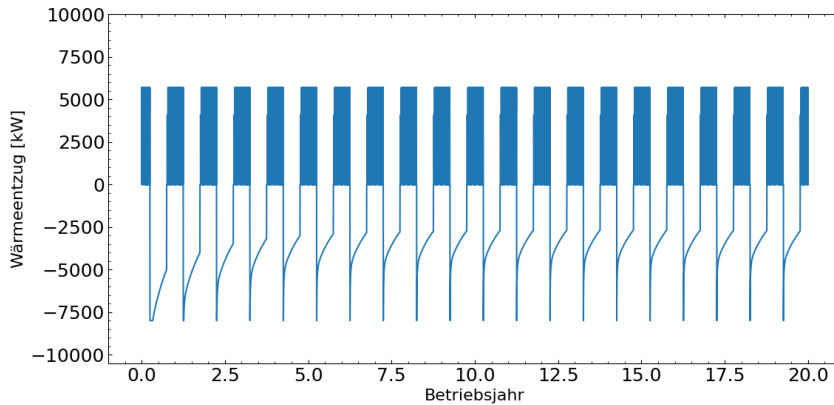


Abbildung 30 Umschalten bei 5°C; Wärmeentzug/-eintrag des EWSF in den 20 Betriebsjahren.

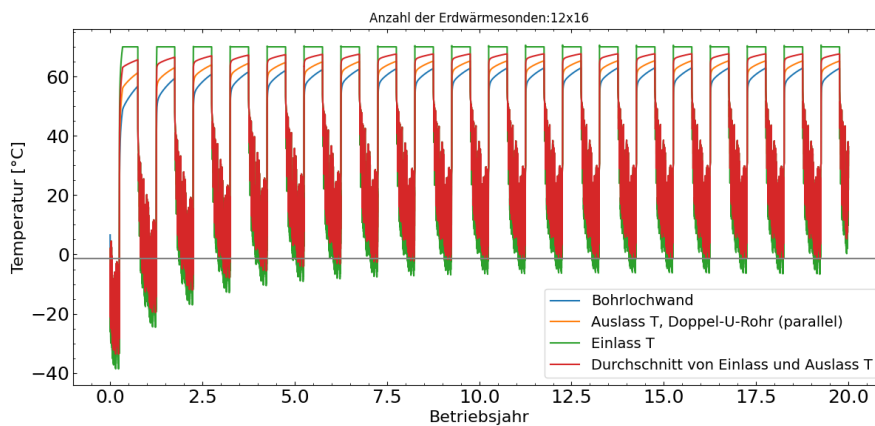


Abbildung 31 Umschalten bei 5°C; Verschiedene Temperaturen im EWSF in den 20 Betriebsjahren.

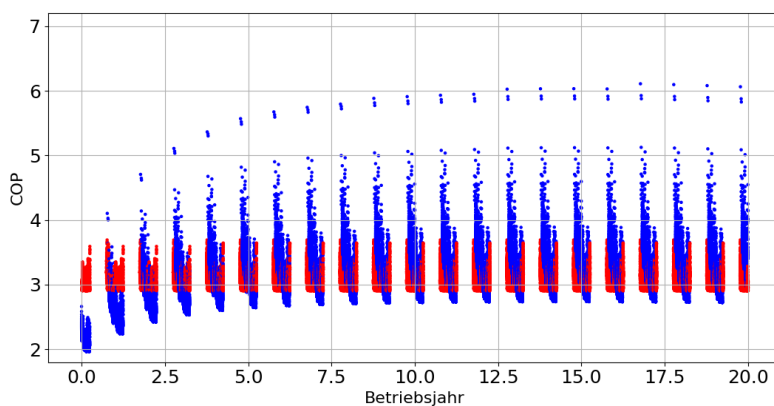


Abbildung 32 Umschalten bei 5°C; COP der Erdwärmesonden-Wärmepumpe (blau) und der Luft-Wärmepumpe (rot) in den 20 Betriebsjahren.

Fall 3: Umschaltung bei 3 °C

Siehe Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 im Haupttext.

Fall 4: Umschaltung bei 1 °C

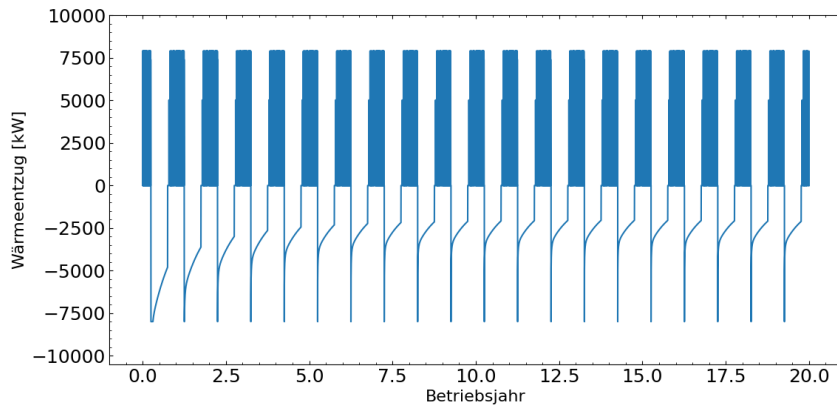


Abbildung 33 Umschalten bei 1°C; Wärmeentzug/-eintrag des EWSF in den 20 Betriebsjahren.

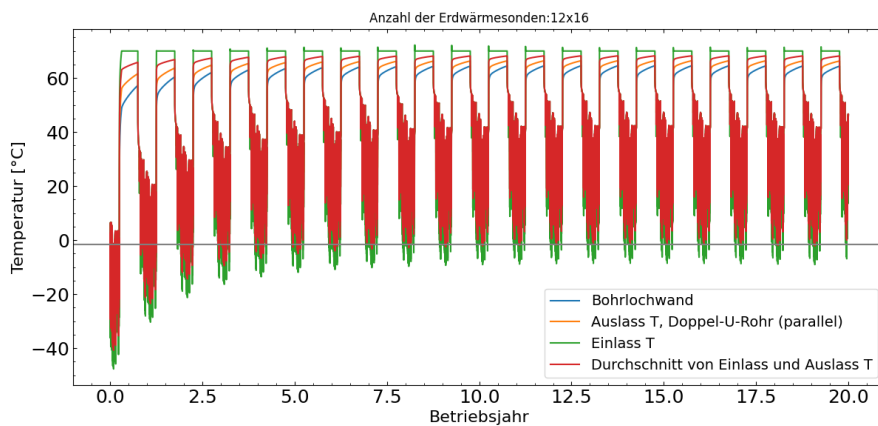


Abbildung 34 Umschalten bei 1°C; Verschiedene Temperaturen im EWSF in den 20 Betriebsjahren.

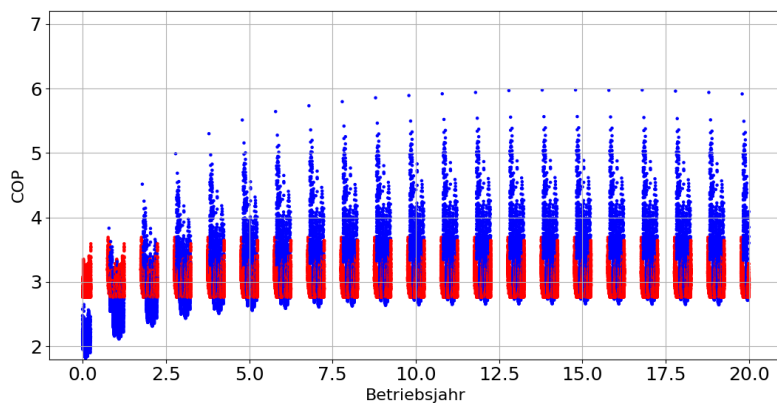


Abbildung 35 Umschalten bei 1°C; COP der Erdwärmesonden-Wärmepumpe (blau) und der Luft-Wärmepumpe (rot) in den 20 Betriebsjahren.

Fall 5: Umschaltung bei -1 °C

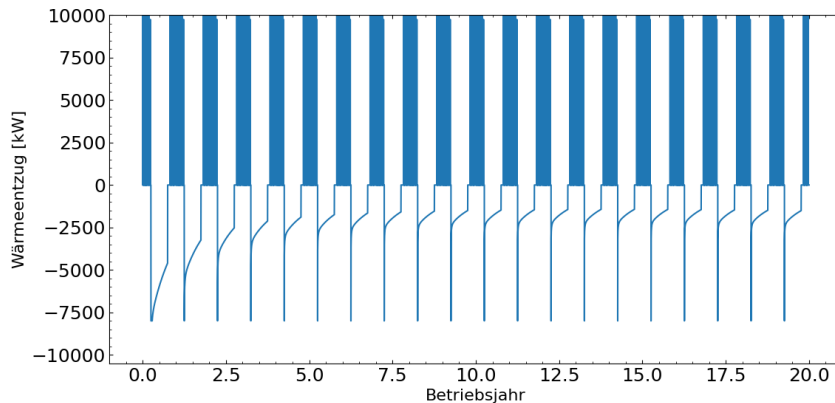


Abbildung 36 Umschalten bei -1°C; Wärmeentzug/-eintrag des EWSF in den 20 Betriebsjahren.

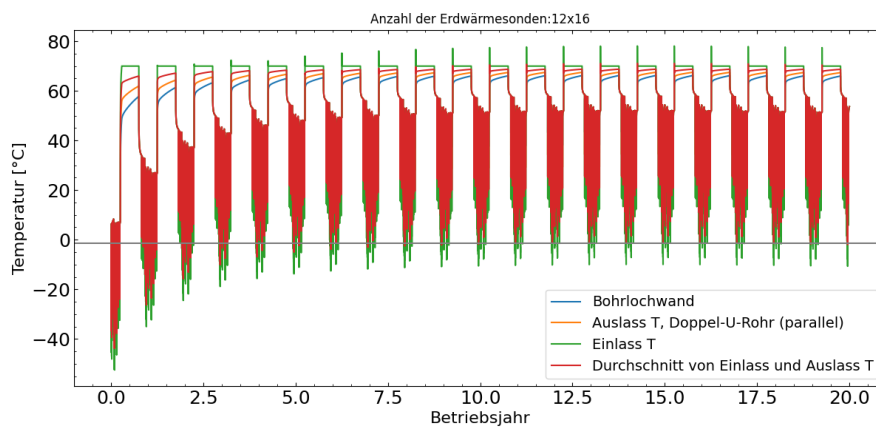


Abbildung 37 Umschalten bei -1°C; Verschiedene Temperaturen im EWSF in den 20 Betriebsjahren.

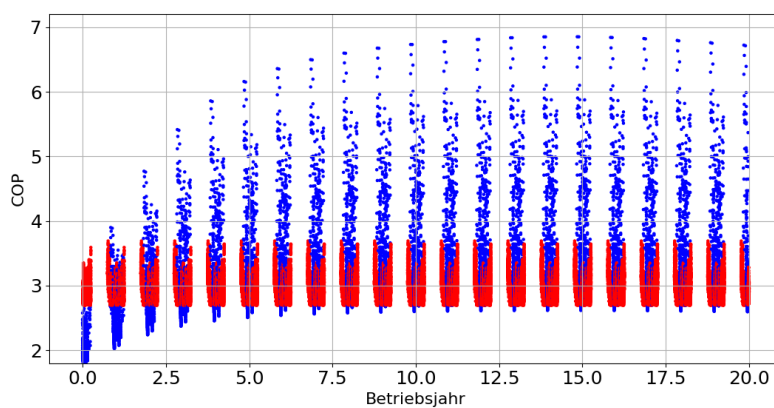


Abbildung 38 Umschalten bei -1°C; COP der Erdwärmesonden-Wärmepumpe (blau) und der Luft-Wärmepumpe (rot) in den 20 Betriebsjahren.

10.2 Auswertung von EWS-Leistung, Fluidtemperatur und COP auf Stundenbasis

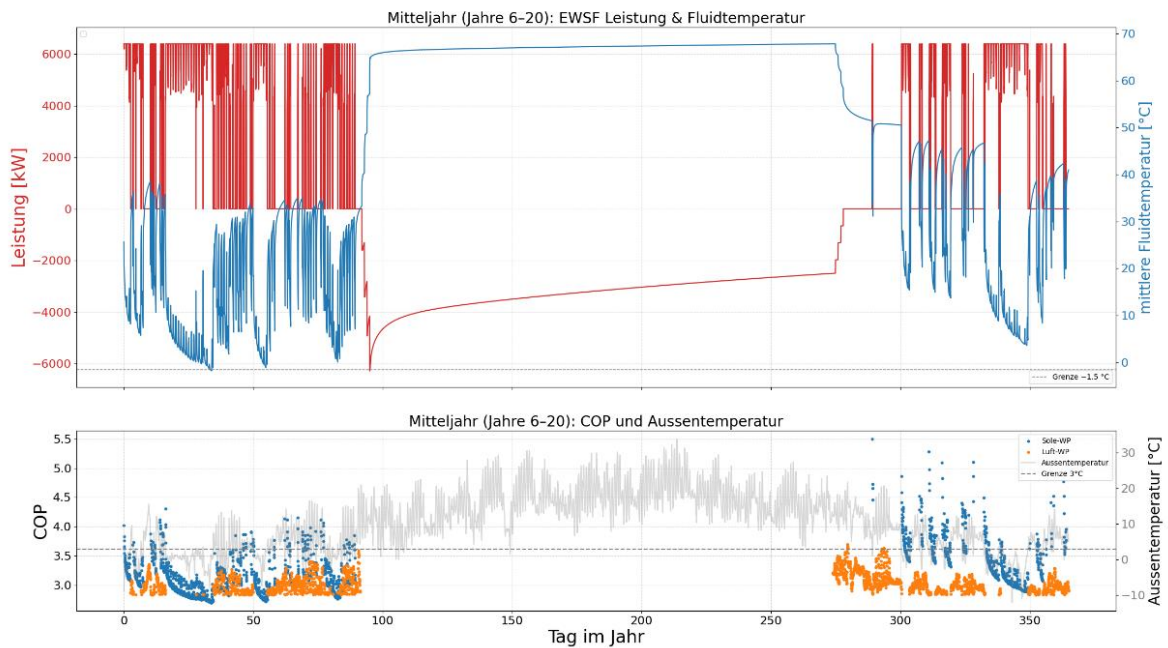


Abbildung 39 Stundenwerte eines durchschnittlichen Jahres (Mittelwert aus den Jahren 6 – 20) für die Erdwärmesondenleistung, die Fluidtemperatur und den COP der Wärmepumpe.

10.3 Verwendete Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen

In der Wirtschaftlichkeitsanalyse lag der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Varianten. Daher wurden Kostenbestandteile, die in allen Varianten annähernd gleich sind (z. B. Energiezentrale, Anschlusskosten Gas, Planungskosten), bei den Wärmegestehungskosten nicht berücksichtigt. Die relevanten Werte sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

	Wert	Einheit
WACC	5	%
Nutzungsdauer Leitungen	50	Jahre
Nutzungsdauer Anlagen (WP etc.)	20	Jahre
Stromkosten Energie	17	Rp/kWh
Stromkosten Leistung	32'400	CHF/kWth/a
Energiekosten Biogas	11.8	Rp/kWh
Leistungskosten Biogas	13'800	CHF/kWth/a
Energiekosten Abwärme	3	Rp/kWh
Leistungskosten Abwärme	20	CHF/kWth/a
Kosten EWS	110	CHF/m
Anschlusskosten Strom	2.5 Mio.	CHF
OPEX Anlagen	2	% der Investitionskosten
Kosten Rückkühler ohne Abtauung	550	CHF/kW
Kosten Rückkühler mit Abtauung	750	CHF/kW
Investitionskosten WP	1'500	CHF/kW
Investitionskosten Transportleitung	3'285	CHF/Tm

Tabelle 15 Zusammenfassung der wichtigsten Kennwerte zur Wirtschaftlichkeitsberechnung.