



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

05 | 2014

Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich

Schlussbericht

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Bearbeitung:

Dr. Roland Wagner
Thomas Weisskopf
Weisskopf Partner GmbH
Albisriederstrasse 184 b
8047 Zürich
thomas.weisskopf@weisskopf-partner.ch

Projektteam:

Franz Sprecher (Stadt Zürich, AHB)
Felix Schmid (Stadt Zürich, Stv. EB)
Toni W. Püntener (Stadt Zürich, UGZ)

Begleitgruppe:

Bruno Bébié (EB)
Reto Burkhard (ewz, Zürich)
Christian Erb (Halter AG)
Dr. Heinrich Gugerli (AHB)
Fritz Herzog (Stadt Zürich, IMMO)
Peter Hubacher (fws)
Marc Kallen (Erdgas Zürich)
Marc Kamber (Stadt Zürich, IMMO)
Thomas Kessler (Stadt Zürich, AHB)
Dr. Rudolf Minder (BFE)
Jürg Müller (LVZ)
Radmila Vukelic (Stadt Zürich, UGZ)

Download als pdf von
www.stadt-zuerich.ch/eqt -> Projekte realisiert

Zürich, Mai 2014

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	4
1	Schlussfolgerung aus Sicht des Auftraggebers	6
1.1	Schlussfolgerungen betreffend der städtischen Energiestrategie	6
1.2	Schlussfolgerungen betreffend die rechtlichen Rahmenbedingungen und Planungsgrundlagen	6
1.3	Schlussfolgerungen betreffend die kommunale Energieplanung	7
1.4	Schlussfolgerungen betreffend städtischer Bauprojekte	7
1.5	Schlussfolgerungen betreffend Bauvorhaben Dritter	7
1.6	Offene Fragen	8
2	Einleitung	9
2.1	Ausgangslage Konzept Energieversorgung 2050	9
2.2	Projektziele, Aufgabenstellung	10
2.3	Vorgehensweise	10
3	Grundlagen	12
3.1	Normen und Richtlinien	12
3.2	Dimensionierungsgrundlagen für EWS	12
3.3	Vorerkundung, Messverfahren	15
3.4	Qualitätssicherung	15
3.5	Dimensionierungs-Werkzeuge	16
3.6	Geothermische Kennwerte im Stadtgebiet Zürich	16
4	Auswirkungen des Wärmeentzugs über EWS	17
4.1	Wärmebilanz im Boden	17
4.2	Unterer Grenzwert für das nachhaltige geothermische Potenzial	18
4.3	Fazit für die Stadt Zürich	19
5	Aktive Regeneration	21
5.1	Speicherpotenzial von EWS-Feldern	21
5.2	Speicherpotenzial in der Stadt Zürich	22
5.3	Regeneration von Einzelsonden	22
5.4	"Tiefe" Erdwärmesonden	23
6	Niedertemperatur-Netze	24
6.1	Netztypen	24
6.2	Potenzielle Wärmequellen zur Regeneration des Erdspeichers	25
7	Machbarkeitsstudien	28
7.1	Überprüfung der Aufgabenstellung anhand des Testareals Altstetten	28
7.2	Pilotareal OIZ (Albisrieden)	31
7.3	Pilotareal ABZ Entlisberg (Wollishofen)	37
7.4	Pilotareal Isengrind/Wolfswinkel (Affoltern)	45
8	Diskussion	50
8.1	Fazit zu den Pilotarealen	50
8.2	Fazit betreffend geothermisches Potenzial	50
8.3	Wirtschaftlichkeit	51
8.4	Transformationspfad	52
9	Anhang	53
9.1	Simulationsergebnisse	53
9.2	Literatur	56
9.3	Normen und Richtlinien	57
	Begriffe und Abkürzungen	58

Zusammenfassung

Geothermie im Energieversorgungskonzept 2050

Die Stimmberechtigten der Stadt Zürich bekannten sich 2008 mit grosser Mehrheit zur Reduktion des Energieverbrauchs auf 2000 Watt pro Person. Das im Kontext dieser energiepolitischen Vorgabe in der Gemeindeordnung von der Stadt Zürich erarbeitete Konzept Energieversorgung 2050 (EK 2050, Bébié und Jakob, 2012) geht im Effizienzscenario davon aus, dass ab 2050 die Wärmenachfrage nur noch zu 5% bis 10% mit Öl und Erdgas gedeckt wird, während Wärmepumpen (Strom und Umweltwärme) sowie Fernwärme den höchsten Anteil des Wärmebedarfs bereitstellen. Als Wärmequellen für Wärmepumpen dienen Erdwärme, Oberflächengewässer, Aussenluft und nicht genutzte Abwärme. Die vorliegende Studie stellt eine Folgearbeit zum EK 2050 dar. Unter besonderem Fokus auf die hohe Wärmenachfragedichte im urbanen Kontext wurde das Potenzial von Erdwärmesonden (EWS) für die Wärme- und Kälteversorgung genauer untersucht.

Das natürliche geothermische Potenzial ist sehr gering

Der aktuelle Stand betreffend Dimensionierung von Erdwärmesonden-gebundenen Wärmeversorgungsanlagen wurde recherchiert (SIA-Empfehlung 384/6) und die wesentlichen theoretischen Grundlagen zusammengefasst. Diese Grundlagen wurden verglichen mit der heutigen Situation der Erdwärmennutzung in der Stadt Zürich und mit den im Rahmen der städtischen Energiepolitik formulierten Erwartungen an die zukünftige Nutzung von Energiesystemen mit Erdwärmesonden (EWS).

Eine konservative Berechnung ergibt, dass ein nachhaltiger Wärmeentzug aus dem Untergrund nur für Ausnützungsziffern bis etwa 0.06 möglich ist. Die Ausnützungsziffer in der Stadt Zürich beträgt jedoch mehr als 0.4. Eine bedeutende und nachhaltige Nutzung untiefer Geothermie ist daher ohne weiteres nicht möglich. Gründe sind einerseits die in der Stadt Zürich feststellbare zunehmende Nutzung von Erdwärme, die zu immer engeren EWS-Abständen und damit zu gegenseitiger Beeinflussung führt, andererseits die auf 50 Jahre beschränkte Betrachtungsweise für die Auslegung der EWS gemäss SIA.

Das effektive natürliche Potenzial reicht also nicht aus, um die Energiemenge nachhaltig bereit zu stellen, welche im EK 2050 der Erdwärmennutzung zugeordnet ist.

Nachhaltige Nutzung der Erdwärme durch aktive Regeneration

Die zunehmende gegenseitige Beeinflussung von EWS verursacht eine wachsende Abkühlung des Untergrundes, die jedoch durch eine aktive Regeneration des Untergrundes mit Wärme z.B. aus Solarkollektoren, Gebäuden oder aus der Umgebungsluft vermindert oder sogar kompensiert werden kann. Die aktive Regeneration des Untergrundes ist für einzelne Objekte bereits erprobt und bei grösseren EWS-Feldern mit geringen EWS-Abständen zwingend erforderlich und daher Stand der Technik.

In der Stadt Zürich findet Wärmeeintrag in den Untergrund durch aktive Regeneration jedoch nur bei 15% der installierten Anlagen statt. Die übrigen Anlagen besitzen meist nur wenige EWS, die auf Wärmeentzug ausgelegt sind. Eine aktive Regeneration ist grundsätzlich aber auch bei kleinen Anlagen oder bei Einzelsonden möglich. Da die Abstände zwischen unabhängigen EWS-Anlagen und Einzelsonden im Vergleich zu den EWS-Abständen in EWS-Feldern viel grösser sind, ist der Nutzen der Regeneration aber erst langfristig spürbar.

Der städtische Untergrund als saisonaler Speicher

Für eine quantitativ bedeutende Wärmeversorgung über aktiv regenerierte EWS-Felder sind Niedertemperatur-Netze (NT-Netze) eine geeignete Technologie, da hiermit unterschiedliche Wärmequellen (d.h. Wärmequellen zur aktiven Regeneration von EWS-Feldern oder zur direkten

Wärmenutzung) und Wärmeverbraucher miteinander vernetzt werden können. EWS übernehmen in solchen Netzen die Rolle eines saisonalen Speichers.

Anhand von drei Pilotarealen im Stadtgebiet Zürich wurde untersucht, ob unter den lokalen Bedingungen (Wärmebedarf auf Stufe Einzelobjekt und Platzangebot für EWS-Bohrungen) genügend grosse EWS-Felder als saisonale Wärmespeicher realisiert werden können. Die hier untersuchten Areale besitzen reinen Modellcharakter und sind nicht im Zusammenhang mit einer Energieplanung oder einem konkreten Bauvorhaben zu sehen. Es wird gezeigt, dass in den drei untersuchten Arealen die im Jahr 2050 erwartete Wärmenachfrage über aktiv regenerierte EWS-Felder bereitgestellt werden kann. Im Ergebnis zeigt sich, dass unter den eng gesetzten gegebenen Rahmenbedingungen und Annahmen, langfristige Wärmegestehungspreise von etwa 23 bis 26 Rp./kWh entstehen. Diese Preise kommen nicht in erster Linie durch die Technologie der Erdwärmesonden und deren Regeneration, sondern vor allem durch hohe Investitionen in die grundstückübergreifenden Wärmenetze zu Stande. Es kann erwähnt werden, dass ein signifikantes Potenzial für eine weitere Optimierung der Investitionskosten vorhanden ist, insbesondere bei bivalenten Systemen und Lösungen, bei denen die erdgebundenen Leitungen nicht parzellenübergreifend geführt werden.

Chancen der Geothermie

Die drei Pilotareale sind repräsentativ für viele städtische Gebiete und bieten ausreichend Platz für regenerierbare EWS-Felder. Im gesamtstädtischen Kontext spielen aber auch kleine und unabhängige EWS-Anlagen eine Rolle, da diese aus technischer Sicht ebenfalls regeneriert werden können. Die Studie kommt daher zum Schluss, dass EWS gebundene Niedertemperatur-Netze unter der prognostizierten Wärmenachfrage-Entwicklung für das Jahr 2050 einen bedeutenden Beitrag zur langfristigen Wärmeversorgung leisten können.

1 Schlussfolgerung aus Sicht des Auftraggebers

Toni Püntener (UGZ), Felix Schmid (Stv. EB), Franz Sprecher (AHB)

Für das Projektteam ergeben sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie folgende Schlussfolgerungen:

1.1 Schlussfolgerungen betreffend der städtischen Energiestrategie

Die Grundlagenanalyse in der vorliegenden Studie (Kap. 4.3) kommt in einer konservativen Betrachtung bezüglich des nutzbaren Potenzials an untiefer Geothermie zu deutlich tieferen Werten als die entsprechende Analyse im Konzept Energieversorgung 2050 (ca. 100 GWh/a anstelle von 355 GWh/a). Der Grund liegt darin, dass die Potenzialanalyse im EK 2050 von den in der SIA-Empfehlung 384/6 aufgeführten Kennwerten zur Gewinnung von Erdwärme ausgeht (Betrachtungszeitraum 50 Jahre), während in der vorliegenden Studie das Potenzial ausgehend vom Grundsatz der nachhaltigen Nutzung von Energiequellen beurteilt wird. Auch wenn Äusserungen von Fachpersonen aus der Begleitgruppe darauf hindeuten, dass eine dynamische Betrachtung, die insbesondere auch die Erhöhung der Wärmestromdichte von der Erdoberfläche ins Erdreich infolge der Verdichtung der Stadt und tendenziell steigender Temperaturen des Stadtklimas berücksichtigt, zu einem höheren Potenzial führen könnte, so sind die Resultate aus der vorliegenden Studie doch als Indiz zu nehmen, dass das im EK 2050 angenommenen Potenzial zu optimistisch sein könnte.

Wie die vorliegende Studie zeigt, bieten Erdsonden zusätzlich zur (beschränkten) Möglichkeit Geothermie zu nutzen, die Option in einem beachtlichen Ausmass überschüssige Wärme aus dem Sommer (Abwärme, Solarthermie usw.) für die Nutzung im Winter zu speichern (Regeneration). Diese aus energiepolitischer Sicht interessante Option, die in der Praxis ihre technische Tauglichkeit bewiesen hat, wurde bisher noch nicht bezüglich Primärenergiefaktor und Treibhausgasemissionskoeffizient nach der Ecoinvent-Methodik bewertet (siehe Frischknecht et al., 2012).

1.2 Schlussfolgerungen betreffend die rechtlichen Rahmenbedingungen und Planungsgrundlagen

Die Resultate aus der vorliegenden Studie führen auch zur Frage, ob Anpassungen an den rechtlichen Voraussetzungen für Erdsonden-Wärmepumpen, an der Bewilligungspraxis beim Kanton und an den Planungsgrundlagen angezeigt sind. Folgende Ideen könnte die Stadt Zürich bei der zuständigen Stelle des Kantons (AWEL) zur Diskussion stellen:

- Generelle Regenerationspflicht bei Erdwärmesondenanlagen auf Parzellen mit einer Ausnutzungsziffer grösser 0.5 (Zonen W3 und höher)
- Konzept für die nachträgliche Nachrüstung einer Anlage mit aktiver Regeneration als Bedingung für die Bewilligung von Anlagen ohne aktive Regeneration
- Konzept für eine alternativ gleichwertige Energieversorgung des Gebäudes als Bedingung für die Bewilligung von Anlagen, bei denen die Erdwärmesonden unterhalb der Bodenplatten von Gebäuden angeordnet werden
- Nachweis, dass benachbarte Erdwärmesondenanlagen (in einem definierten Abstand) bei der Dimensionierung berücksichtigt wurden
- Nachweis der Information benachbarter Grundeigentümer über das Erdwärmesondenprojekt und Nachweis von deren Einverständnis

- Zur Verfügung stellen der Kenndaten und der genauen Position von bestehenden Erdwärmesondenanlagen auf dem kantonalen GIS-Browser als Hilfsmittel für PlanerInnen

1.3 Schlussfolgerungen betreffend die kommunale Energieplanung

Die Problematik von Anlagenclustern mit geringem Erdwärmesondenabstand wird in denjenigen Stadtgebieten verstärkt auftreten, in denen die Vielfalt an weiteren Möglichkeiten zur Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien oder Abwärme eingeschränkt sind. Es stellt sich daher die Frage, ob diese Gebiete (die auf hoher Flughöhe schon im EK 2050 ausgewiesen sind) nicht im Rahmen der Energieplanung zu präzisieren sind - dies als Grundlage für eine Regenerationspflicht von Erdwärmesonden im Rahmen des Bewilligungsverfahrens bzw. der Förderung durch den Stromsparfonds.

1.4 Schlussfolgerungen betreffend städtischer Bauprojekte

Es stellt sich die Frage, ob die Erkenntnisse, dass eine Energienutzung aus Erdwärmesonden in der Stadt Zürich ohne Regeneration erstens nicht als nachhaltig bezeichnet werden kann und zweitens zu einer Beeinträchtigung benachbarter Erdwärmesonnennutzungen führen kann, Konsequenzen auf den Einsatz von Erdwärmesonden-Wärmepumpen in städtischen Bauten haben muss.

Das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich vertritt diesbezüglich folgende Haltung: Mit der Überarbeitung der städtischen Richtlinien Gebäudetechnik im Jahr 2013 wurden als Lehren aus dem vorliegenden Projekt folgende Punkte angepasst:

- Neu muss das Planungsteam im Sinne des Vorsorgeprinzips darlegen, ob eine aktive Regeneration von Erdwärmesonden notwendig ist und ob dank der Regeneration und einer günstigen Anordnung die Anzahl der Erdsonden reduziert werden kann. Falls sich eine aktive Regeneration aus heutiger Sicht als nicht notwendig erweist, muss aufgezeigt werden, wie eine solche Möglichkeit später einfach nachgerüstet werden kann.
- Die Kosten für die aktive Regeneration müssen im Rahmen des Variantenvergleichs aufgezeigt werden.
- Der bereits vorhandene Wärmeentzug in der Umgebung des Bauprojektes muss in diese Überlegungen einbezogen werden.

1.5 Schlussfolgerungen betreffend Bauvorhaben Dritter

Verschiedene Kantone und Gemeinden fördern Erdwärmesonden-basierte Wärmepumpensysteme. Die Resultate aus der vorliegenden Studie führen zu der Frage, ob Änderungen an der Förderpraxis und bei der Beratungstätigkeit angezeigt sein könnten. Folgende Regelungen bei der finanziellen Förderung von Wärmepumpen kommen in Frage:

- Förderbeiträge werden nur noch für Anlagen mit aktiver Regeneration entrichtet.
- Förderbeiträge werden nur entrichtet, wenn ein Konzept für eine nachträgliche Nachrüstung mit einer aktiven Regeneration vorliegt.
- Für Anlagen mit aktiver Regeneration werden bei der Berechnung der Förderbeiträge andere Referenzinvestitionen bzw. JAZ angenommen als bei Anlagen ohne aktive Regeneration.
- Förderbeiträge werden davon abhängig gemacht, dass bestehende nachbarschaftliche Erdwärmesonden-Anlagen in die Dimensionierung einbezogen wurden.
- Förderbeiträge werden von einer Information an die Nachbarschaften und deren Einverständnis für eine Erdwärmenutzung ohne aktive Regeneration abhängig gemacht.
- Förderbeiträge werden nur für Anlagen entrichtet, bei denen Erdwärmesonden nicht unterhalb von Gebäuden installiert sind, es sei denn, es werde ein Konzept vorgelegt, wie die Energieversorgung des Gebäudes ökologisch gleichwertig aufrecht erhalten werden kann, sollten die Erdwärmesonden unter dem Gebäude einmal nicht mehr genutzt werden können.

1.6 Offene Fragen

Während den Projektteamsitzungen wurden viele technische Fragestellungen diskutiert und einige Antworten blieben offen. So z.B.

- ab welchem spezifischen Wärmeentzug regeneriert werden muss,
- wie Erdwärmesonden nach dem Erreichen der technischen Lebensdauer zurückgebaut oder ersetzt werden können,
- welches je nach baulicher Situation die günstigste Form von Regeneration ist,
- wie viel Energie über die Erdoberfläche auf natürlichem Weg nachfließt,
- welchen Einfluss die Klimaerwärmung hat,
- wie sich die Regeneration von tiefen Erdwärmesonden verhält und
- ob es bereits "übernutzte" Regionen gibt.

2 Einleitung

Die Stadt Zürich hat sich per Volksentscheid zur 2000-Watt-Gesellschaft verpflichtet. Aus Sicht der Energie- und Gebäudetechnik heisst dies, dass Wärmepumpen für die Bereitstellung von Prozess- und Raumwärme eine bedeutende Rolle spielen werden. Als geeignete Wärmequellen kommen Erdwärme, Oberflächengewässer oder nicht anderweitig nutzbare Abwärme in Frage, die nachhaltig genutzt werden können.

Das Projekt "Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich" soll vor dem Hintergrund des Konzeptes "Energieversorgung 2050" (EK 2050, Bébié und Jakob, 2012) das Potenzial von Erdwärmesonden als Energiequelle für Wärmepumpen untersuchen. Dabei sollen das lokale geothermische Potenzial, die erwartete Nachfrage und die Vorgaben der 2000-Watt-Gesellschaft berücksichtigt werden.

2.1 Ausgangslage Konzept Energieversorgung 2050

Die Stadt Zürich hat ein "Konzept Energieversorgung 2050" (EK 2050, Bébié und Jakob, 2012) für das Jahr 2050 erarbeitet. Es stellt für jedes Quartier in verschiedenen Szenarien die Entwicklung des Energiebedarfs der Gebäude dem Angebot an erneuerbaren Energien gegenüber und zeigt, dass die 2000-Watt-Ziele im Gebäudebereich mit forcierten Gebäudeerneuerungen und weitestmöglicher Nutzung erneuerbarer Energien erreichbar sind.

In der Studie EK 2050 wurde das Stadtgebiet Zürich in 17 Gebiete (sog. "Angebotszonen", siehe Figur 1) aufgeteilt, die hinsichtlich Nachfrageentwicklung, Potenzial an erneuerbaren Energien und bestehender Wärmeinfrastruktur homogene Eigenschaften ausweisen. Die gesamte Fläche, auf der Erdwärmesonden-Bohrungen zulässig sind, beträgt 3'309 ha.

Die Studie "Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich" versteht sich als eine Folgearbeit zum EK 2050 und soll unter anderem testen, ob die im EK 2050 auf der Basis von Richtwerten quantifizierten Erdwärme-Potenziale für einzelne Stadtgebiete auf Stufe Einzelobjekt umsetzbar sind. Ein Fokus liegt dabei auf der Frage, ob lokal genügend Erdwärme für Wärmepumpen vorhanden ist, um Energie für Prozess- und Raumwärme in den Gebieten mit hoher baulicher Dichte bereitzustellen.

In Zürich sind gemäss Angaben des kantonalen Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) heute bereits 4'076 EWS mit einer durchschnittlichen Länge von 210 m in insgesamt 924 EWS-Anlagen in Betrieb. Die über diese Anlagen erzeugte Nutzenergie beträgt etwa 45 GWh pro Jahr. Gemäss Effizienzscenario im EK 2050 würden Erdwärmesonden-basierte Systeme im Jahr 2050 rund 450 GWh/a zur Wärmeversorgung beitragen, was einem Wärmeentzug von etwa 355 MWh/a entspricht (Jakob et al., 2012). Das ist rund zehnmal mehr als heute.

Bei nur 141 der heute installierten EWS-Anlagen werden die EWS auch zur Kühlung genutzt (teilweise aktive Regeneration, siehe Kapitel 5). In der Gesamtbilanz ist der Wärmeentzug aus dem Untergrund also bedeutend grösser als der Wärmeeintrag. Deshalb stellt sich die Frage, ob der Netto-Wärmeentzug zu einer fortschreitenden Abnahme der Bodentemperatur führt, oder ob sich durch natürliche Regeneration (Wärmestrom über die Erdoberfläche und durch geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinnern) sich ein (quasi-) stationäres Temperatur-Feld einstellen kann.

2.2 Projektziele, Aufgabenstellung

Der Fokus der Studie ist auf die Anwendungsformen der oberflächennahen Geothermie gerichtet, insbesondere auf Erdwärmesonden. Tiefe Erdwärmesonden und Energiepfähle werden, obwohl die hier getroffenen Schlussfolgerungen grundsätzlich auch für diese Anwendungen gelten, nicht behandelt.

Anhand der Erarbeitung von drei Machbarkeitsstudien soll gezeigt werden, unter welchen Bedingungen der Energiebedarf des jeweils untersuchten Areals nachhaltig und monovalent über EWS gedeckt werden kann. Anhand der Ergebnisse sollen wirtschaftliche Grenzen aufgezeigt werden, die aus einer konsequenten Wärmeversorgung über EWS folgen.

2.3 Vorgehensweise

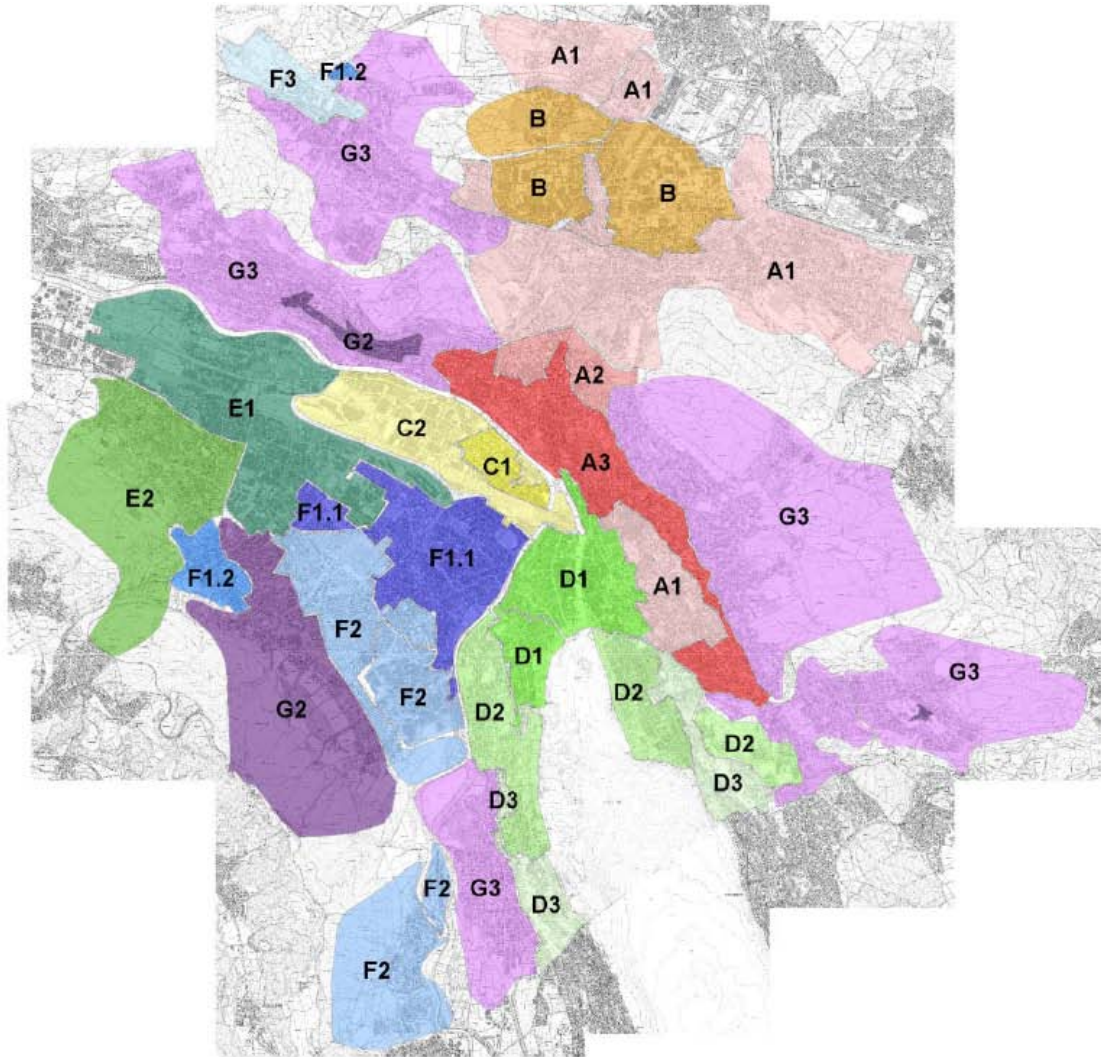
In der ersten Projektphase wurden der Stand der Technik sowie Erfahrungen mit der Planung und Realisierung von Erdwärmesonden-basierten Arealen recherchiert. Anhand der recherchierten Grundlagen wurde entschieden, dass für eine nachhaltige Wärmeversorgung in erster Linie vollständig aktiv-regenerierte EWS-Felder (Speicher) in Frage kommen.

Für die Bearbeitung der Machbarkeitsstudien wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt, wobei in einer ersten Stufe Vorgehen und Methodik in einem Test-Areal geprüft wurden. Anhand der Ergebnisse der Test-Studie wurde eine Auswahl von drei Pilotarealen in der Stadt Zürich getroffen und je Areal eine spezifische Aufgabenstellung definiert.

Für jedes Pilotareal wurden technische und wirtschaftliche Grenzen diskutiert, die bei einer monovalenten Wärmeversorgung über Erdsonden gebundene Netze sichtbar werden. Bivalente Wärmeversorgungskonzepte wurden, mit Ausnahme solarer Direktnutzung, ausdrücklich nicht untersucht.

Die Ergebnisse dieser Studie werden hinsichtlich der gemäss EK 2050 im Jahr 2050 erwarteten Wärmenachfrage diskutiert.

Figur 1: "Angebotszonen" in der Stadt Zürich gemäss EK 2050 (Bébié und Jakob, 2012)



Legende

- A1 Fernwärme (FW) bestehend, Erdsonden teilw. zulässig
- A2 FW erweitert, Erdsonden teil. zulässig, mittlere Energiedichte (ED)
- A3 FW erweitert, Erdsonden zulässig, hohe ED
- B FW bestehend, Grundwasser (GW)-Angebot vorhanden, Erdsonden teilw. zulässig, mittlere ED
- C1 FW erweitert, GW-Angebot vorhanden, Erdsonden nicht zulässig, sehr hohe ED
- C2 FW bestehend, GW-Angebot vorhanden, Erdsonden nicht zulässig, mittlere ED
- D1 FW teilw. bestehend, GW-Angebot teilw. vorhanden, Erdsonden teilw. zulässig, Seewasserangebot vorhanden, sehr hohe ED
- D2 Erdsonden teilw. zulässig, Seewasserangebot vorhanden, hohe ED
- D3 Erdsonden teilw. zulässig, Seewasserangebot vorhanden, tiefe ED
- E1 Nähe zu ARA, Erdsonden v.a. nicht zulässig
- E2 Nähe zu ARA, Erdsonden v.a. zulässig
- F1.1 Grundwasserangebot vorhanden, Erdsonden nicht zulässig, sehr hohe ED
- F1.2 Erdsonden teilw. zulässig, tiefe ED
- F2 Grundwasserangebot teilw. vorhanden, Erdsonden teilw. zulässig, mittlere ED
- F3 Erdsonden teilweise zulässig, sehr tiefe ED
- G2 Erdsonden zulässig, mittlere ED
- G3 Erdsonden v.a. zulässig, tiefe ED

TEP

3 Grundlagen

Das Projekt "Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich " behandelt vorwiegend das Thema "oberflächennahe Geothermie", insbesondere Erdwärmesonden. In diesem Kapitel sind die allgemeinen Grundlagen für die Planung und Erstellung von Erdwärmesonden, unter Berücksichtigung der geologischen Situation im Stadtgebiet Zürich, zusammengefasst.

3.1 Normen und Richtlinien

Die Vollzugshilfe "Wärmenutzung aus Boden und Untergrund" (BAFU, 2009) und die SIA Norm 384/6 "Erdwärmesonden" definieren die Regel der Baukunst für die Planung und Installation von EWS-Anlagen. Die SIA Norm 384/6 ersetzt die bis dahin angewendete VDI-Richtlinie 4640 und legt Qualitätsstandards für Planung und Bauwerk-Installationen fest. Die BAFU-Richtlinie richtet sich primär an die kantonalen Behörden mit dem Ziel, eine einheitliche Vollzugspraxis zu fördern und die Einhaltung Gewässerschutz-rechtlicher Standards sicherzustellen.

3.2 Dimensionierungsgrundlagen für EWS

Erdwärmesonden müssen nach SIA 384/6 so ausgelegt werden, dass ein Einfrieren der EWS-Hinterfüllung während einer Betriebszeit von 50 Jahren ausgeschlossen ist. Unter diesen Bedingungen darf die mittlere Temperatur des Wärmeträgers in der Sonde -1.5°C nicht unterschreiten (z.B. -3°C am EWS-Eintritt und 0°C am EWS-Austritt). Werden diese Temperaturen dauerhaft unterschritten, können die EWS und Bauwerke im Bereich der EWS-Zuleitungen durch Eisbildung beschädigt werden (Bassetti et al., 2006).

Die Wärmeentzugsleistung einer EWS hängt von der geologischen Situation und dem Bedarfsprofil des Wärmebezügers ab. Mit zunehmender Betriebsdauer wird der Boden um die Sonde kontinuierlich kälter (Ausbildung eines "Temperatur-Trichters", siehe Kapitel 3). Eine EWS muss aber so ausgelegt werden, dass die gewünschte Entzugsleistung bis Ablauf der geplanten Betriebszeit gewährleistet ist, d.h. sie muss auf den Endzustand nach 50 Jahren Betriebszeit ausgelegt werden.

Die EWS-Temperatur hängt von der momentanen Wärmeentzugsleistung bzw. der Kälteleistung der Wärmepumpe (WP) ab, und diese wiederum von der momentanen EWS-Temperatur. Diese Kopplung zwischen Wärmequelle und Wärmerezeuger kann iterativ berechnet werden.

Einzelsonden

Nach Eskilson (1987) kann die Temperatur T_B an der Grenzschicht zwischen Sonde und Erdreich mit Hilfe von sog. "g-Funktionen" berechnet werden (Figur 2, 3 und 5). Die "g-Funktion"¹ beschreibt für eine gegebene, konstante spezifische Entzugsleistung q und eine vorgegebene Wärmeleitfähigkeit des Bodens, λ_{Erde} , die Abnahme der Temperatur ΔT am Rand r_B der EWS-Bohrung (Figur 4):

$$T_B = T_0 - \Delta T$$
$$\Delta T = q / (2 \pi \lambda_{Erde}) \cdot g(Es(t), r_B/H)$$

T_0 ist die ungestörte Temperatur des Bodens², q [W/m] der spezifische Wärmeentzug oder Wärmeeintrag, r_B [m] der Radius der EWS, λ_{Erde} die Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W m⁻¹ K⁻¹],

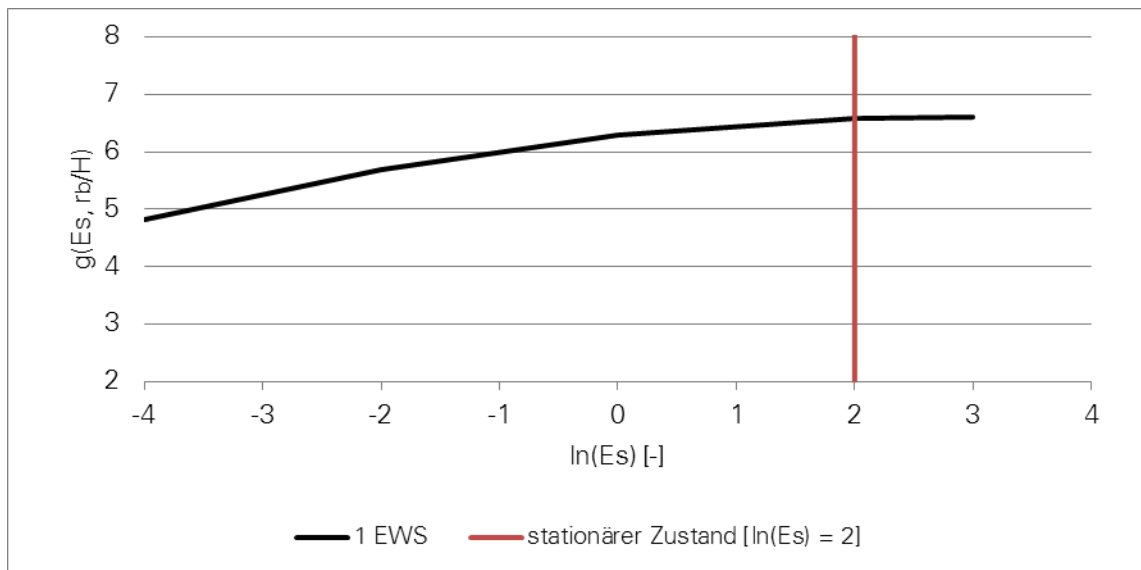
¹ Für eine ausführliche Analyse der Genauigkeit des Ansatzes mit g-Funktionen wird auf Eskilson (1987) verwiesen.

² Die ungestörte Bodentemperatur T_0 entspricht dem Mittelwert der Bodentemperatur über die gesamte EWS-Länge bzw. in ausreichender Näherung der Erdreichtemperatur in halber Sondentiefe $H/2$. T_0 kann aus der durchschnittlichen Bodenoberflächentemperatur T_{0F} und dem Temperaturgradienten $\delta T/\delta z$ berechnet werden: $T_0 = T_{0F} + \delta T/\delta z \times H/2$. Der Temperaturgradient entspricht dem Quotient aus vertikalem Wärmestrom q_{Erde} und Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} .

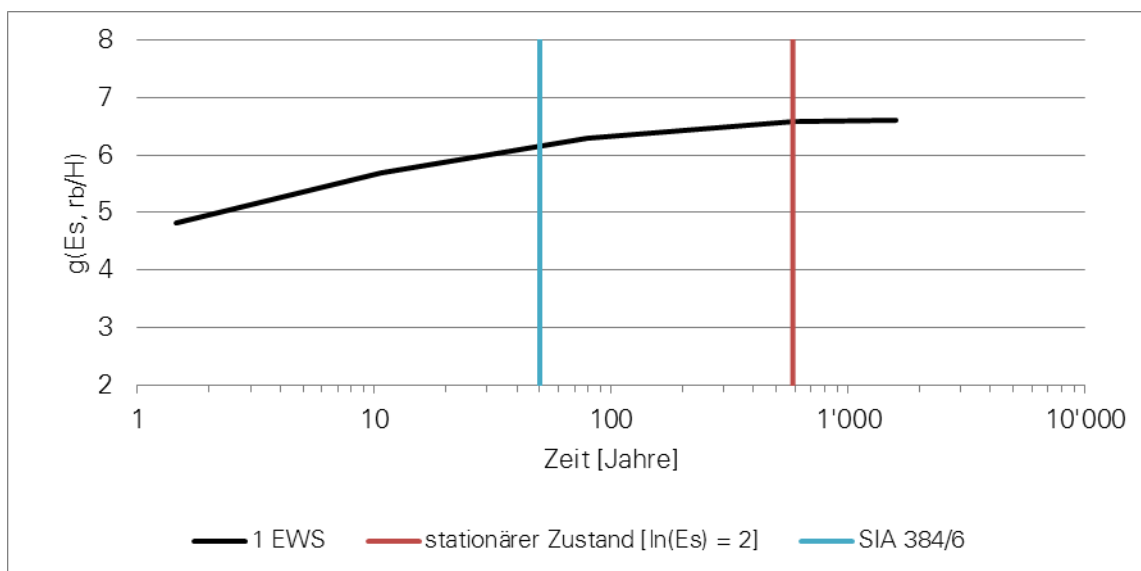
$Es = 9 a t / H^2$ die dimensionslose "Eskilson-Zahl", t [s] die Betriebszeit der EWS, a [m²/s] die Temperaturleitfähigkeit des Bodens und H [m] die EWS-Länge.

Figur 2 zeigt die g-Funktion für eine einzelne EWS als Funktion der dimensionslosen „Eskilson-Zahl“ Es . Nach Figur 2 ist für $\ln(Es = 9 a t / H^2) > 2$ bzw. für Zeiten $t > e^2 \times H^2 / (9 a)$ der Betrag der g-Funktion nahezu konstant, d.h. die genutzte Erdwärme wird durch nachfliessende Wärme aus dem Erdinnern und von der Erdoberfläche her vollständig kompensiert ("stationärer Zustand", siehe auch Kapitel 3.1)³. In grossen Erdwärmesonden-Feldern wird der Gleichgewichtszustand zu einem späteren Zeitpunkt erreicht (Eskilson, 1987; siehe auch Figur 5). Figur 3 zeigt die g-Funktion als Funktion der Zeit für eine 150 m tiefe EWS.

Figur 2: "g-Funktion" einer Erdwärmesonde (EWS) als Funktion von $\ln(Es)$. Der stationäre Zustand ist bei etwa $\ln(Es) = 2$ erreicht (mit $Es = 9 a t / H^2$, a = Temperaturleitfähigkeit [m²/s] = 10⁻⁶ m² s⁻¹ (s. Tabelle 1, Kapitel 2.6), t = Zeit [s]; (nach Eskilson, 1987).



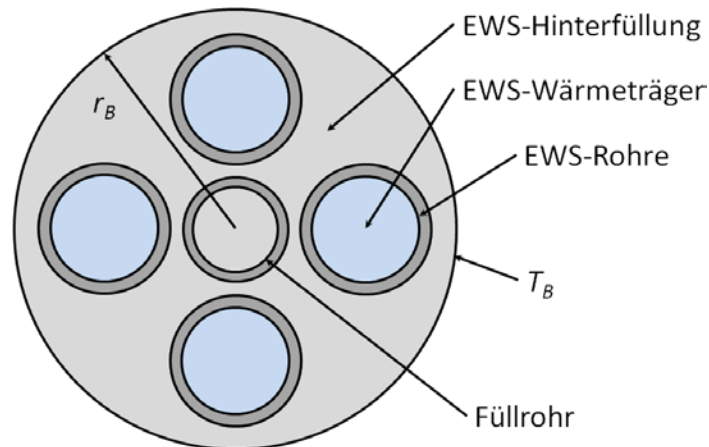
Figur 3: "g-Funktion" einer Erdwärmesonde der Länge $H = 150$ m als Funktion der Zeit t in Jahren. Der stationäre Zustand bei $\ln(Es) = 2$, s. Figur 2, entspricht bei $H = 150$ m einer Betriebszeit von etwa 550 Jahren. Bei einer Auslegung auf 50 Jahre Betriebszeit (gemäss SIA 384/6) ist der stationäre Zustand noch nicht erreicht.



³ Der Exponent 2 der *Eulerschen-Zahl* $e = 2.718$ folgt aus der Definition des Gleichgewichtszustandes für $\ln(Es) > 2$

Die Berechnung der Bodentemperatur T_B für zeitlich veränderliche Belastungsprofile $q(t)$ erfolgt durch Superposition der g-Funktion (Eskilson, 1987). Nach jedem berechneten Zeitschritt kann die Kälteleistung der Wärmepumpe über die temperaturabhängige Kennlinie aktualisiert werden.

Figur 4: Schnitt durch eine Duplex-Erdwärmesonde (r_B : Radius der Bohrung $\approx 13 - 15$ cm, T_B : Temperatur an der Grenze zwischen Boden und EWS-Hinterfüllung)



EWS-Felder

EWS-Felder nennt man eine grössere Anzahl von EWS, die parallel über einen Verteiler miteinander verbunden sind. Der minimale EWS-Abstand beträgt etwa 5 m für EWS-Längen bis 150 m. Bei tieferen EWS werden grössere Abstände gewählt, da die EWS-Bohrungen mit zunehmender Tiefe aus der vertikalen Richtung abweichen können.

Für die Auslegung von EWS-Feldern werden die gleichen Ansätze wie zur Berechnung von Einzelsonden verwendet. Falls die EWS eines EWS-Feldes an den gleichen Sondenverteiler angeschlossen sind, werden alle EWS mit der gleichen Rücklaufemperatur bedient. In diesem Fall kann eine g-Funktion für das gesamte EWS-Feld berechnet werden, indem die g-Funktionen der Einzelsonden überlagert werden (Huber, 2011a).

Figur 5 zeigt den Unterschied der g-Funktion grösserer EWS-Felder im Vergleich zu einer Einzelsonde für eine angenommene EWS-Länge von 150 m und EWS-Abstände von jeweils 30 m. Ab einer Betriebszeit von 10 Jahren ist die gegenseitige Beeinflussung bereits zu erkennen.

Thermischer Bohrlochwiderstand

Mit Hilfe des thermischen Bohrlochwiderstands R_B wird der Temperaturunterschied zwischen Boden und Wärmeträger der Erdwärmesonde berechnet. Für den Zusammenhang zwischen Bodentemperatur T_B und EWS-Temperatur T_{EWS} gilt⁴:

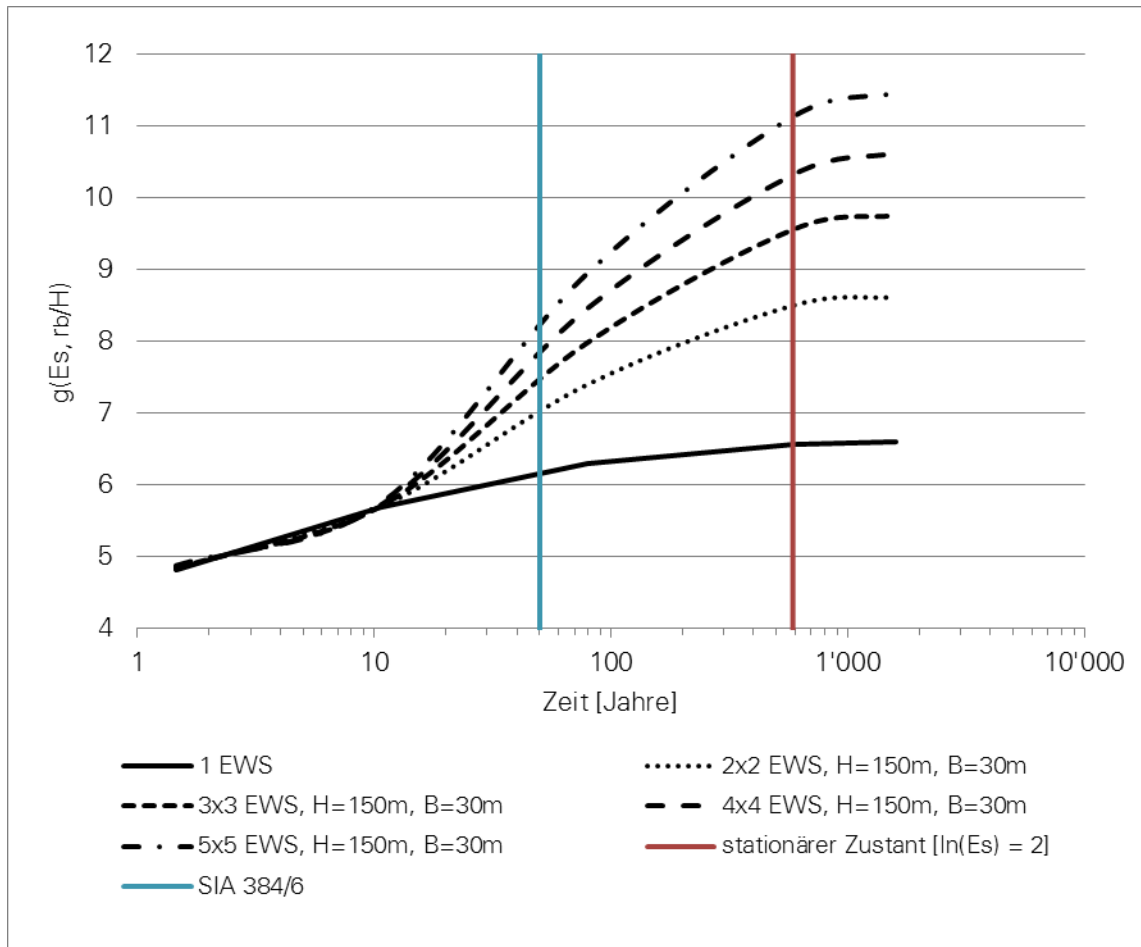
$$T_{EWS} = T_B - q R_B$$

R_B hängt vom Wärmeübergangskoeffizienten zwischen EWS-Rohr und Wärmeträger, von der EWS-Geometrie (d.h. Anordnung und Wandstärken der EWS-Rohre) und der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung und des Rohrmaterials ab. Ein geringer, d.h. optimaler, Bohrlochwiderstand kann durch Verwendung einer Hinterfüllung mit hoher Wärmeleitfähigkeit erreicht werden.

Die Wärmeleitfähigkeit üblicher EWS-Rohre aus HD PE 100 ist mit etwa $0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ein limitierender Faktor. Die derzeit auf dem Markt gut eingeführten Standard-EWS (PE-100 SDR11) stellen einen geeigneten Kompromiss zwischen vertretbarem Bohrlochwiderstand und ausreichender Druckfestigkeit für Tiefen bis etwa 250 m dar (energeia, 2012; Huber, 2012).

⁴ Die EWS-Temperatur T_{EWS} bezeichnet die über die gesamte EWS-Länge gemittelte Temperatur des Wärmeträgers. In einer ersten Näherung entspricht T_{EWS} dem Mittelwert aus EWS-Vorlauf und EWS-Rücklauf.

Figur 5: "g-Funktion" für unterschiedliche Anordnungen von Erdwärmesonden als Funktion der Zeit t in Jahren. Die EWS-Länge H beträgt jeweils 150 m, der Abstand B jeweils 30 m.



3.3 Vorerkundung, Messverfahren

Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ist, desto mehr Wärme kann bei gleicher Abkühlung des Bodens radial zur EWS hinströmen. Anhand der lokalen Geologie kann die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ungefähr geschätzt werden. In der SIA Norm 384/6 sind für verschiedene Gesteine jeweils konservative Bodenkennwerte angegeben, um das Risiko einer Unterdimensionierung zu minimieren.

Für die Planung grösserer EWS-Anlagen wird die Messung der lokalen thermischen Bodenkennwerte (Bodentemperatur und Wärmeleitfähigkeit) an einer vorab installierten Test-EWS empfohlen. Die planungsrelevanten Bodenkennwerte können mit Temperatur-Tiefenprofil-Messungen (Schärli et al., 2007) und mit sog. "thermischen Response-Tests" (TRT) bzw. "erweiterten thermischen Response-Tests" (eTRT) bestimmt werden (Poppei et al., 2008, Forrer et al., 2010). Beide Messverfahren sind etabliert und werden zur Messung der Bodenkennwerte, vor allem für die Auslegung grösserer EWS-Anlagen, durchgeführt.

3.4 Qualitätssicherung

Die Lebensdauer von Erdwärmesonden aus PE hängt von Druck und Temperatur ab und beträgt z.B. 100 Jahre, sofern die Betriebstemperatur 20°C nicht überschreitet (www.hakagerodur.ch). Je nach Anforderungen können EWS-Rohre aus Polyethylen mit erhöhter Temperaturbeständigkeit (PE-RT) verwendet werden, um die gewünschte Lebensdauer bei höheren Wärmeträgertemperaturen zu gewährleisten.

Mit dem Inkrafttreten der SIA Norm 384/6 im Jahr 2010 wurde erstmals eine umfassende Qualitätsprüfung für Erdwärmesonden vorgeschrieben. Die Prüfungen umfassen einen Drucktest

zur Dichtigkeitsprüfung sowie eine Druckverlustmessung zum Vergleich des gemessenen mit dem theoretisch zu erwartenden Wert.

3.5 Dimensionierungs-Werkzeuge

Der informative Anhang der SIA Norm 384/6 enthält Planungshilfen für die Auslegung von EWS-Anlagen unter Berücksichtigung der lokalen geologischen, meteorologischen und anlagentechnischen Bedingungen. Die Dimensionierungshilfen sind auf reinen Heizbetrieb und maximal vier EWS beschränkt.

Die SIA 384/6 empfiehlt für die Auslegung grösserer Anlagen Berechnungsprogramme, z.B.:

- „EWS“ von Huber Energietechnik AG (www.hetag.ch, Huber & Pahud, 1999a)
- „PILESIM2“ von D. Pahud (SUPSI, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana)

Diese Programme⁵ bauen auf das mathematische Modell von Eskilson auf und verwenden zur Berechnung der Bodentemperatur stündliche Heiz- und Kältebelastungsprofile. Die Schnittstelle zur Gebäudetechnik wird über die Definition von Wärme- und Kältemaschinen abgebildet. Das Programm „POLYSUN“ von Vela Solaris (www.velasolaris.com, Marti et al., 2009) bildet die Haustechnik sehr detailliert ab und bietet Möglichkeiten zur Simulation verschiedenster Wärme- und Kältequellen. Geowatt AG aus Zürich ("EWS-Planer", Rohner et al., 2012) und EQUA-Solutions aus Knonau ("IDA IDE", www.equa.ch) setzen eigene Softwarelösungen für die Auslegung komplex vernetzter EWS-Anlagen als Dienstleistung ein.

3.6 Geothermische Kennwerte im Stadtgebiet Zürich

Der Kanton Zürich hat im Jahr 2007 den Bericht „Geothermische Energie im Kanton Zürich“ (Kohl et al., 2007) veröffentlicht. Dieser Bericht liefert eine grobe Übersicht über die geothermischen Bodenkennwerte im Stadtgebiet Zürich. Eine überregionale Zusammenstellung ist in Leu et al. (2006) und Schärli et al. (2007) zu finden. Für eine genauere Schätzung kann das geologische Bohrprofil einer bereits installierten Erdwärmesonde in der Nähe des geplanten Standortes herangezogen werden. Die Bohrprofile können beim kantonalen Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) eingesehen werden.

Tabelle 1 stellt die im Stadtgebiet Zürich anstehenden Gesteine und ihre thermischen Gesteinseigenschaften zusammen. Werden diese Werte mit der jeweiligen Mächtigkeit der Schichten gewichtet, erhält man geeignete mittlere Bodenkennwerte für die Auslegung von EWS.

Die Bodentemperatur kann nach SIA 384/6 aus der Höhe des Standortes mit Hilfe eines thermischen Gradienten von z.B. 0.03 K/m berechnet werden. Bodenoberflächentemperatur und Temperatur-Gradient variieren innerhalb des Stadtgebietes als Folge der heterogenen geologischen Struktur und unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und durch Einfluss der "Stadt-wärme".

Tabelle 1: Bandbreite der thermischen Eigenschaften von Gesteinen, die im Stadtgebiet Zürich anstehen (empfohlene Werte nach SIA Norm 384/6).

Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmekapazität $\rho \cdot c$	Temperaturleitfähigkeit a
Moräne	$1.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.0 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	$0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Obere Süswassermolasse (OSM)	$2.3 - 2.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	$1.1 - 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Obere Meeresmolasse (OMM)	$2.7 - 2.9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	$1.3 - 1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

⁵ Weitere Simulationswerkzeuge sind: „Earth Energy Designer“ („EED“, Blocon, Lund), „Fyroapps“ (Fyrosol AG, Walzenhausen), TRNSYS (TESS, Wisconsin; TRANSSOLAR, Stuttgart)

Im stationären Zustand verlaufen die Isothermen stationär, d.h. der "Temperatur-Trichter" dehnt sich nicht weiter aus. In diesem Zustand verschwindet der Zustrom von Wärme Q_{rad} aus der Umgebung, d.h. der Wärmeentzug Q_{EWS} wird durch Q_{Erde} und $Q_{Sonne/Luft}$ vollständig ausgeglichen ($Q_{EWS} = Q_{Erde} + Q_{Sonne/Luft}$). Der Radius um eine EWS, bei welchem im stationären Zustand der radiale Wärmestrom aus dem Boden zur EWS hin verschwindet, definiert den minimalen EWS-Abstand, der eine gegenseitige Beeinflussung von EWS ausschliesst.

4.2 Unterer Grenzwert für das nachhaltige geothermische Potenzial

Eine nachhaltige Energieversorgung über EWS ist möglich, wenn:

1. die EWS so ausgelegt wird, dass mit der gewählten Entzugsleistung die tiefste zulässige EWS-Temperatur möglichst erst nach Eintreten des Gleichgewichtszustandes (d.h. nach Ablauf der Zeit t_B , siehe Kapitel 3.2) erreicht wird, und
2. der Abstand zwischen den EWS so gross ist, dass sich die "Temperatur-Trichter" im Gleichgewichtszustand nicht überschneiden.

Zu Bedingung 1: Der Gleichgewichtszustand einer Einzelsonde tritt nach Kapitel 3.2 bei $\ln(Es) = 2$ ein. Bei Einzelsonden ist dieser Zustand annähernd bereits bei $\ln(Es) > 1$ erreicht, d.h. nach Ablauf der Zeit

$$t > e^1 \times H^2 / (9 a).$$

Eine Sonde von 200 m Länge erreicht den Gleichgewichtszustand annähernd nach 200 Jahren. EWS werden heute nach SIA 384/6 unabhängig von ihrer Länge auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt. Um den Gleichgewichtszustand z.B. schon nach $t = 50$ Jahren zu erreichen, wäre nach obiger Gleichung eine EWS-Länge

$$H < (9 a t / e)^{1/2} \approx (9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 50 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ s} / 2.718)^{1/2} \approx 75 \text{ m}$$

erforderlich. Bei einer 200 m tiefen EWS wird die maximal zulässige Betriebszeit also lange vor Erreichen des Gleichgewichtszustandes erreicht. Würden EWS mit geringeren Leistung ausgelegt, als heute nach SIA 384/6 üblich ist, könnte der Gleichgewichtszustand grundsätzlich aber auch vor Eintreten der tiefsten zulässigen Grenztemperaturen erreicht und ein nachhaltiger Wärmeentzug ermöglicht werden.

Zu Bedingung 2: Als weitere Bedingung für einen nachhaltigen Wärmeentzug wurde gefordert, dass sich die "Temperatur-Trichter" einzelner EWS oder EWS-Anlagen nicht überschneiden dürfen. Nach Eskilson (1987) und Huber & Pahud (1999) ist die gegenseitige Beeinflussung von EWS mit der Länge H und Abstand B für $B > H$ vernachlässigbar, bzw. gering für $B > H/2$.

Aus den beiden oben beschriebenen Bedingungen ($H = 75 \text{ m}$, $B = H/2 = 38 \text{ m}$) folgt für einen angenommenen spezifischen Wärmeentzug von 50 kWh/a pro Meter EWS ein **unterer Grenzwert für das nachhaltig nutzbare geothermische Potenzial** von etwa

$$50 \text{ kWh/m} \times 75 \text{ m} / (38 \text{ m})^2 \approx 3 \text{ kWh/m}^2$$

oder 0.03 GWh pro Hektar Siedlungsfläche⁶. Nach Jakob et al. (2012) werden je nach Prognose-Modell im Jahr 2050 in den Stadtgebieten, wo EWS-Bohrungen zulässig sind, Wärmenachfragedichten von 0.2 - 1.1 GWh/ha erwartet. Der Wärmebedarf ist im Vergleich zum geothermischen Angebotspotenzial also etwa 10 - 30 mal höher. Diese Rechnung geht vereinfachend von einer EWS-Länge von 75 m aus, womit das Erreichen des stationären Zustandes nach 50 Jahren sichergestellt ist. Mit diesen EWS-Längen ist der Betrieb mit heute üblichen Entzugsleistungen nach SIA 384/6 auch über 50 Jahre Betriebszeit hinaus möglich, da nach Erreichen des Gleichgewichtszustands die minimale EWS-Temperatur nicht weiter absinken kann - sofern der durchschnittliche Wärmeentzug pro Jahr konstant bleibt. Wie oben im Text beschrieben, kann eine EWS mit einer Länge grösser als 75 m mit geringeren Entzugsleistungen so ausgelegt

⁶ Der Flächenbedarf pro EWS wird näherungsweise durch eine rechteckige Fläche mit Flächeninhalt $(H/2)^2$ beschrieben.

werden, dass die tiefste zulässige Wärmeträgertemperatur z.B. erst nach Eintreten des Gleichgewichtszustandes, d.h. nach 50 Jahren, erreicht wird.⁷

Geht man beispielsweise von einem spezifischen Wärmebedarf (abzüglich des elektrischen Energiebedarfs für die Wärmepumpe) von 50 kWh⁸ pro Quadratmeter Energiebezugsfläche EBF aus, beträgt das Verhältnis des geothermischen Potenzials zum spezifischen Wärmebedarf

$$3 \text{ kWh/m}^2 / 50 \text{ kWh/m}^2 = 1 / 17,$$

d.h. die Grundstücksfläche muss etwa 17-mal grösser sein als die Energiebezugsfläche auf dem Areal, um den Wärmebedarf nachhaltig über EWS decken zu können⁹. Durch die Berücksichtigung von angrenzenden Flächen des öffentlichen Raums (z.B. Strassenflächen) verbessert sich das Verhältnis geringfügig.

Das nachhaltig nutzbare geothermische Potenzial von 3 kWh/m² (entspricht einem Potenzial zur Erdwärmenutzung von rund 100 GWh/a in dem Teil des Siedlungsgebietes der Stadt Zürich, in dem der Einsatz von EWS zulässig ist) folgt aus einer konservativen und stationären Betrachtung und entspricht daher einem unteren Grenzwert. Eine quantitative Abschätzung des oberen Grenzwertes ist ohne dynamische Modelle aber nicht möglich. Allerdings: selbst wenn das Potenzial um einen Faktor 10 höher wäre, ergäbe sich eine maximal mögliche Grundstück-Ausnützungsziffer von 1/1.7, d.h. ca. 60%. Dies entspricht gerade der maximalen Ausnützungsziffer der Zone W2 gemäss BZO der Stadt Zürich (F. Schmid, Stadt Zürich). Für dichter genutzte Zonen wäre also selbst dann kein geothermisch nachhaltiger Betrieb von Erdsonden ohne Regeneration möglich.

4.3 Fazit für die Stadt Zürich

Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben wurde, sind im Stadtgebiet Zürich heute 4'076 EWS bzw. 924 EWS-Anlagen auf einer für EWS zulässigen Gesamtfläche von 3'309 ha in Betrieb (Figur 7). Dies entspricht einem mittleren EWS-Abstand von etwa 90 m bzw. einem mittleren Anlagenabstand von 190 m. Geht man gemäss Effizienzscenario des EK 2050 von einer 10 mal grösseren Anzahl von EWS-Anlagen im Jahr 2050 aus, folgt (bei angenommener gleicher Anzahl von EWS pro Anlage wie heute) ein mittlerer Anlagenabstand von 60 m, d.h. $B = H / 3.5$. Damit wäre selbst bei absolut idealer räumlicher Verteilung das Grenzkriterium von $B < H / 2$ deutlich überschritten.

Die EWS-Dichte ist in einigen Stadtgebieten heute bereits sehr hoch, sodass mit einer gegenseitigen Beeinflussung schon in naher Zukunft gerechnet werden muss. Eine zunehmende Verdichtung von EWS-Anlagen, wie sie gemäss EK 2050 erwartet wird, verschärft die Problematik. Die gegenseitige Beeinflussung von EWS kann zwar planerisch z.B. durch grössere EWS-Längen und durch aktive Regeneration berücksichtigt werden. Als Konsequenz finden aber neue EWS-Anlagen in einem Areal mit bereits vorhandenen EWS ein tieferes geothermisches Potenzial vor. Umgekehrt verringern die neu hinzukommenden Anlagen das nutzbare Potenzial der bereits bestehenden Anlagen. Damit Erdwärmesonden-Anlagen gemäss EK 2050 in Zukunft aber den gewünschten Beitrag zur Energieversorgung liefern können, müssen Massnahmen getroffen werden, um der zunehmenden gegenseitigen Beeinflussung von EWS-Anlagen angemessen zu begegnen.

Ohne aktive Regeneration ist eine nachhaltige Wärmeversorgung deshalb nur dort möglich, wo auf einem entsprechenden Grundstück der spezifische Nutzwärmebedarf (abzüglich Strombedarf für die Wärmepumpe) geringer ist als das geothermische Potenzial. Die absolute Grösse des nachhaltig nutzbaren geothermischen Potenzials wird gegenwärtig noch diskutiert. Es besteht

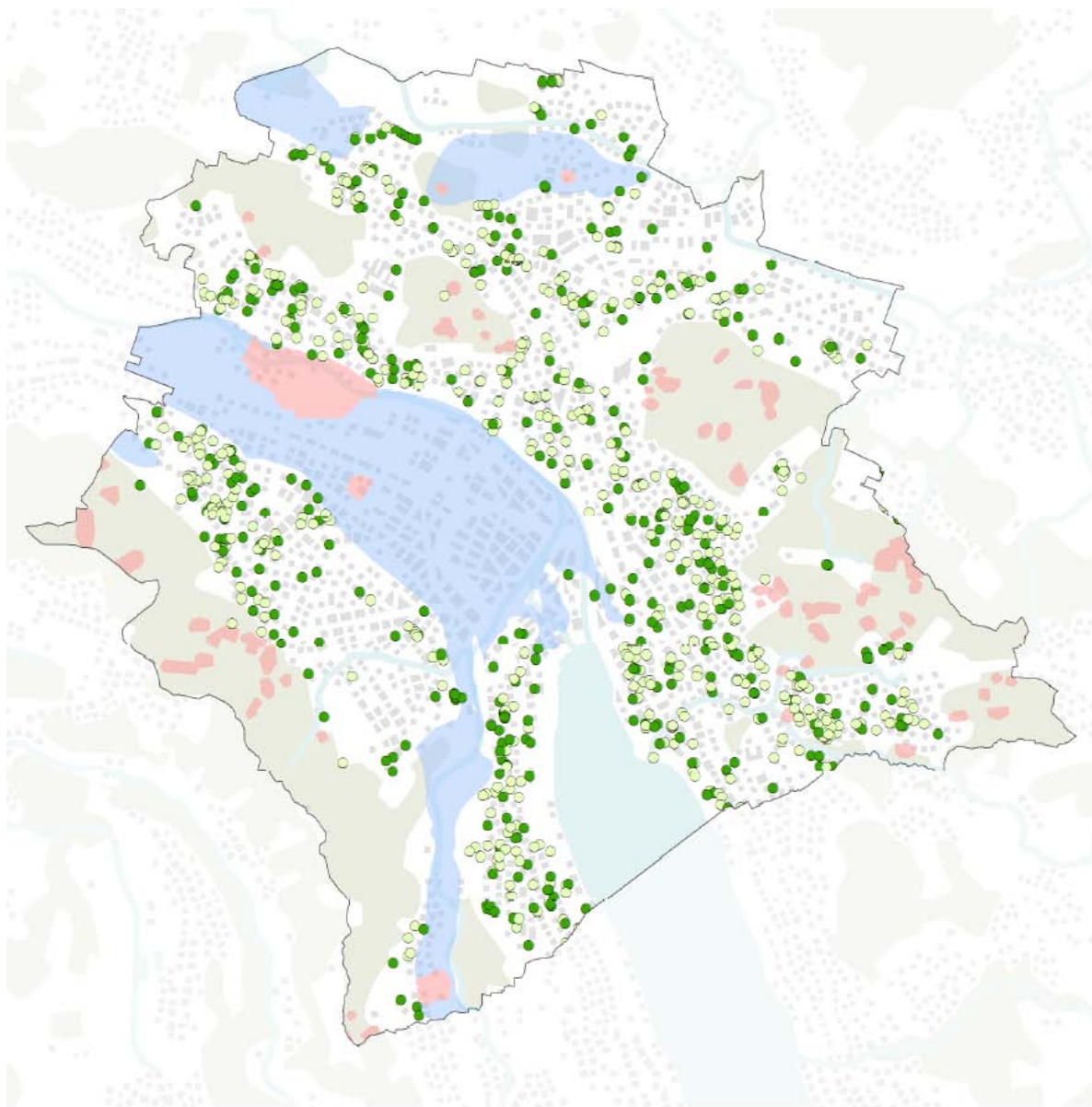
⁷ Der allgemeine Zusammenhang zwischen spezifischem Wärmeentzug und maximaler Betriebsdauer wird in SIA 384/6 nicht ausgeführt und kann nur mit Hilfe von Simulationsrechnungen hergeleitet werden. Daher werden hier die Überlegungen zum geothermischen Potenzial für grössere EWS-Längen als 75 m hier nicht weiter diskutiert.

⁸ Hier wird vereinfachend der Wärmeentzug mit der Wärmeproduktion über die Wärmepumpe gleichgesetzt. Der Strombedarf der Wärmepumpe wird in dieser stark vereinfachten Berechnung vernachlässigt.

⁹ Eine nachhaltige Wärmeversorgung wäre möglich, falls die Ausnützungsziffer diesem Quotienten von 1 / 17, d.h. 6%, entspricht. In dreigeschossigen Wohnzonen der Stadt Zürich (W3) beträgt die Ausnützungsziffer 90%.

jedoch kein Zweifel daran, dass ohne Regeneration in vereinzelt Stadtgebieten in Zukunft mit einer signifikanten gegenseitigen Beeinflussung von EWS und mit einer entsprechend kürzeren Nutzungsdauer gerechnet werden muss.

Figur 7: Erdwärmesondenanlagen in der Stadt Zürich (Manuela Baur, Amt für Städtebau der Stadt Zürich). Jeder Punkt stellt eine Einzelsonde oder ein Objekt mit mehreren EWS dar.



- Erdwärmesonden (mit Bohrprofil)
- Erdwärmesonden (ohne Bohrprofil)
- Zone A: Schutzzonen und Schutzareale
- Zone B: Schotter- Grundwasservorkommen, geeignet für Trinkwassergewinnung

5 Aktive Regeneration

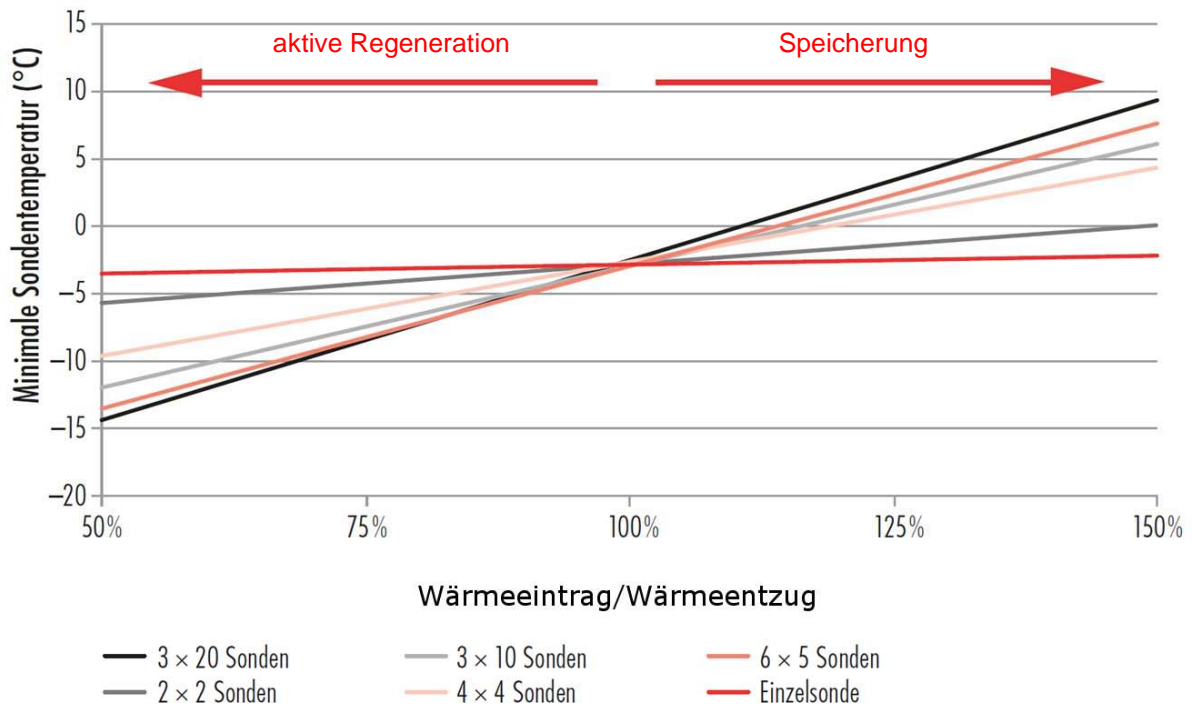
Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, ist der Wärmeentzug über Erdwärmesonden nachhaltig, wenn der Wärme-Entzug durch den Wärmestrom aus dem Erdinneren und über die Erdoberfläche kompensiert wird. Eine zusätzliche Bedingung ist, dass sich die „Temperatur-Trichter“ von EWS sich nicht überschneiden.

In EWS-Feldern beträgt der Abstand von Erdwärmesonden nur 5 bis 10 m. Wird der Wärme-Entzug durch saisonalen Wärmeeintrag, d.h. durch aktive Regeneration, über jede EWS vollständig kompensiert, ist die Summe der radial fließenden Wärmeströme zwischen den einzelnen EWS im Jahresmittel gleich Null. Unter diesen Bedingungen verhalten sich die Sonden in einem EWS-Feld langfristig ähnlich wie Einzelsonden im Gleichgewichtszustand.

5.1 Speicherpotenzial von EWS-Feldern

Huber (2012) zeigt den Unterschied zwischen Einzelsonden und EWS-Feldern anhand eines Fallbeispiels auf, in dem jede EWS mit dem gleichen Lastprofil bewirtschaftet wird. In dem in Figur 8 dargestellten Beispiel beträgt die tiefste Temperatur einer Einzelsonde von 200 m Länge nach 50 Jahren Betriebszeit -3°C . Zum Vergleich wird das gleiche Lastprofil auf jede EWS in unterschiedlich grossen EWS-Feldern angewendet. Wie in Figur 8 zu sehen ist, nimmt die Abkühlung mit zunehmender EWS-Anzahl wie zu erwarten deutlich zu und würde in einem EWS-Feld mit 3×20 EWS etwa -15°C betragen (schwarze Linie in Figur 8).

Figur 8: Auswirkung aktiver Regeneration auf die minimale EWS-Temperatur von Einzel-EWS und EWS in EWS-Feldern nach 50 Jahren Betriebszeit (EWS-Temperaturen für ein definiertes Lastprofil, mit EWS-Längen von jeweils 200 m und Abständen von 7 m, verändert nach Huber, 2012).



Die tiefste EWS-Temperatur ist bei einer ausgeglichenen Bewirtschaftung (100% aktive Regeneration) unabhängig von der Grösse des EWS-Feldes, d.h. die gegenseitige Beeinflussung wird vollständig kompensiert. Überwiegt der Wärmeeintrag, kann die gegenseitige Beeinflussung der EWS gezielt für eine Anhebung der Bodentemperatur genutzt werden und man spricht von "Wärmespeicherung".

5.2 Speicherpotenzial in der Stadt Zürich

Bei einem angenommenen Wärmeentzug von 50 kWh/a pro EWS-Meter beträgt das Speicherpotenzial eines 100% regenerierten EWS-Feldes mit 150 m EWS-Länge und 7 m EWS-Abstand ca. 150 kWh/a pro Quadratmeter Oberfläche, oder etwa 1.5 GWh pro Hektar und Jahr¹⁰. Das Speicherpotenzial ist also bedeutend grösser als das nachhaltig nutzbare geothermische Angebotspotenzial ohne aktive Regeneration und grösser als die Wärmenachfragedichte in den für Erdsonden zulässigen Gebieten in der Stadt Zürich (siehe Bébié und Jakob, 2012).

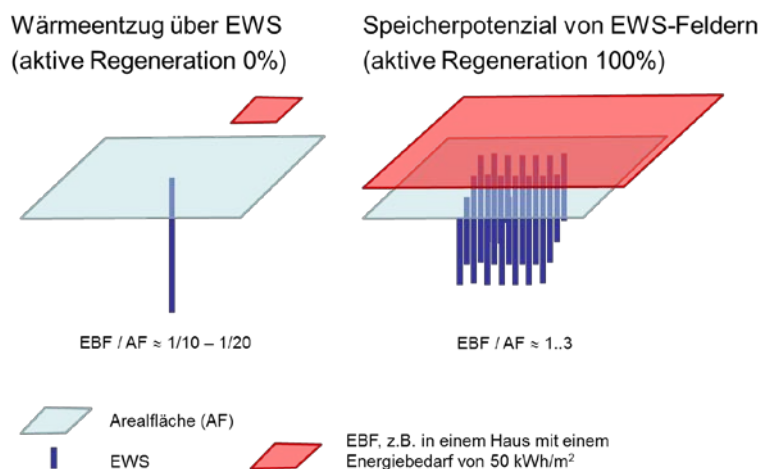
Eine flächendeckende Wärmeversorgung über als Speicher genutzte EWS-Felder ist jedoch mit grossen Herausforderungen verbunden. Einerseits müssen EWS-Felder als kompakte Einheit erstellt werden, wofür ausreichend grosse freie Flächen neben oder unter Gebäuden zur Verfügung stehen müssen, andererseits müssen geeignete und erneuerbare Wärmequellen verfügbar sein. Beispiele für geeignete Wärmequellen werden in Kapitel 6.2 genannt.

5.3 Regeneration von Einzelsonden

Die aktive Regeneration von Einzelsonden hat, wie in Figur 8 zu erkennen ist, kaum Auswirkungen auf den Auslegungspunkt. Das bedeutet, dass durch aktive Regeneration von Einzelsonden keine signifikante Anhebung der Bodentemperatur erzielt werden kann.

Der Begriff "Einzelsonde" bedeutet hier, dass der Abstand zu anderen EWS quasi unendlich gross ist. In der Praxis stellen Einzelsonden unabhängig voneinander bewirtschaftete EWS auf verschiedenen Grundstücken dar. Im urbanen Kontext kann man einzelne EWS auf verschiedenen Grundstücken als Teil eines stadtweiten EWS-Speichers verstehen (Figur 7). Deshalb ist die Regeneration über Einzelsonden im urbanen Gebiet sinnvoll. Wegen der grösseren Abstände im Vergleich zu den Abständen in zusammenhängenden EWS-Feldern ist der Nutzen der Regeneration für die einzelnen EWS aber erst langfristig spürbar.

Figur 9: Qualitativer Vergleich des Flächenbedarfs für eine nachhaltige Wärmeversorgung über EWS bei reinem Wärmeentzug (links) und aktiver Regeneration (rechts). Die Grafik auf der linken Seite geht vom unteren Grenzwert von 3 kWh/m² für das geothermische Potenzial aus.



¹⁰ Daraus kann eine über EWS nutzbare Speicherkapazität von etwa 1 kWh pro Kubikmeter Untergrund abgeleitet werden. Zum Vergleich: Die Latentwärme von Eis beträgt etwa 93 kWh pro Kubikmeter Eis, der Brennwert fossiler Energieträger etwa 100'000 kWh/m³. Die EWS-Speicherkapazität verhält sich zu einem Latentwärmespeicher und zu einem Speicher mit fossilem Energieträger mit jeweils gleichem Volumen daher wie 1:100:100'000.

5.4 "Tiefe" Erdwärmesonden

In Zürich wurden in jüngster Vergangenheit auch EWS bis in Tiefen von 550 m installiert ("tiefe Erdwärmesonden"). Die bisherigen Überlegungen sind grundsätzlich unabhängig von der EWS-Länge. Die Unterschiede betreffen in erster Linie technische und wirtschaftliche Aspekte. Deshalb sind tiefe EWS vor allem eine Alternative an Standorten, wo der Platzbedarf für EWS-Bohrungen sehr eingeschränkt ist. Ob tiefe EWS im urbanen Kontext ein bedeutsames Potenzial besitzen oder in absehbarer Zeit die bewährten Standard-EWS substituieren, ist derzeit noch unklar. Aus diesem Grund wurde das Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich ausschliesslich für übliche Sondenlängen von bis zu 250 m untersucht.

Folgende technischen Aspekte von tiefen EWS sind Gegenstand noch laufender Diskussionen:

- Da die Druckfestigkeit der handelsüblichen EWS-Rohre für Duplex-Sonden (PE 100 SDR 11 PN 16) bei Tiefen von z.B. 550 m nicht mehr ausreicht, müssen hierfür z.B. stahlarmierte Sondenrohre verwendet werden. Die spezifischen Kosten dieser Sondenrohre entsprechen heute etwa den Kosten einer komplett installierten Standard-EWS. Tiefe EWS sind heute also noch bedeutend teurer als Standard EWS.
- Tiefe Koaxialsonden haben im Vergleich zu Duplex-Sonden aufgrund der Dimension des Aussenrohres mit 9 bis 11 mm Wandstärken einen sehr viel höheren thermischen Widerstand. An der ETH Zürich wurde das Konzept einer koaxialen Erdwärmesonde mit isoliertem Zentralrohr und einer flexiblen Membran als Aussenrohr vorgestellt, die einen deutlich geringeren thermischen Widerstand als konventionelle Koaxial-EWS erwarten lässt. Dieses Konzept befindet sich jedoch noch im Versuchsstadium.
- Die Bodentemperatur und die spezifische Entzugsleistung von EWS nehmen generell mit der Tiefe zu. Daher nimmt mit der Sondenlänge auch der Wärmeentzug pro Bohrung zu. Zur aktiven Regeneration der Bodentemperatur über tiefe EWS sind jedoch tendenziell Regenerationsquellen mit höherer Temperatur im Vergleich zu Standard-EWS erforderlich.
- Im Stadtgebiet Zürich steht die Obere Meeresmolasse (OMM) je nach Standort bereits in etwa 200 m Tiefe an. Diese kann lokal stark wasserführend sein und daher ein Rotationsspülbohrverfahren mit geeignetem Spülmedium (Wasser und Spülmittelzusätze) erfordern, um die Kontrolle über zuströmendes Wasser sicherzustellen. Hierdurch entstehen höhere Bohrkosten bei gleichzeitiger Abnahme der Bohrgeschwindigkeit.
- Seit März 2015 gelten für den gesamten Kanton Zürich neue Auflagen betreffend Bewilligung von Erdwärmesonden-Bohrungen. Im Süden und Osten des Kantons, d.h. im Stadtgebiet Zürich, sind EWS nur noch bis auf das Niveau der OMM unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes zulässig. Diese neue Bewilligungspraxis führt in vielen Gebieten der Stadt zu Einschränkungen bei der Nutzung von Erdwärme. Aus diesem Grund ist vorerst davon auszugehen, dass tiefe EWS im Stadtgebiet Zürich keine Rolle spielen.

6 Niedertemperatur-Netze

Die Verbindung mehrerer EWS-Felder miteinander kann über Niedertemperatur-Netze (NT-Netze) erfolgen. Die Temperatur eines Erdwärmesonden gebundenen NT-Netzes liegt etwa im Bereich der mittleren Umgebungstemperatur, weshalb die Netzverluste sehr gering sind. Die Nutzwärmetemperatur kann je nach Differenz zur Quelltemperatur sehr effizient dezentral, d.h. direkt beim Verbraucher, über Wärmepumpen erzeugt werden.

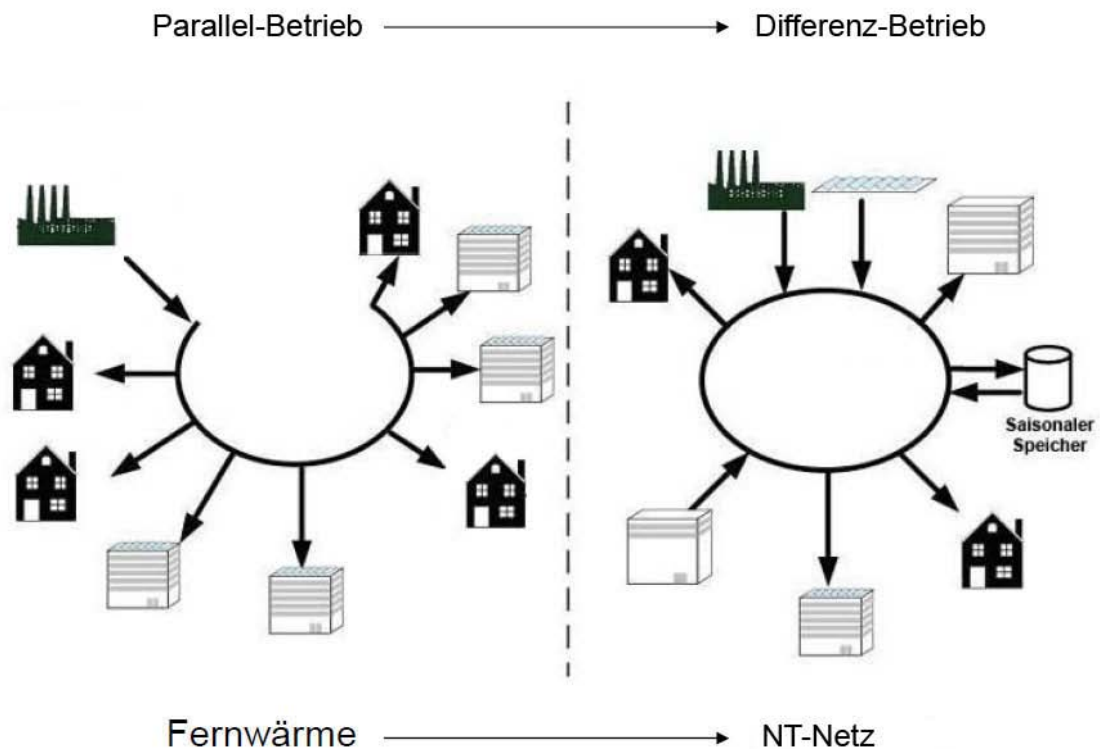
In diesem Kapitel werden hydraulische Konzepte diskutiert, die eine Vernetzung von Erdwärmesonden, Regenerationsquellen und Energiebezügern mit unterschiedlichsten Anforderungen ermöglichen können.

Der Begriff "Niedertemperatur-Netz" wird, da noch nicht abschliessend geklärt, vorläufig anstelle des gebräuchlichen, aber nicht ganz korrekten Begriffs "Anergie-Netz" verwendet. Ein weiterer üblicher Begriff ist "kaltes Fernwärmenetz".

6.1 Netztypen

Der Begriff Niedertemperatur-Netz (NT-Netz) oder Primärkreis wird für die Bezeichnung des gesamten Erdwärmesonden gebundenen Wärmeträger-Kreises verwendet, über den alle Wärmequellen und -senken hydraulisch miteinander verbunden sind. Bezüger und NT-Netz können durch Wärmetauscher hydraulisch entkoppelt sein, auch bei Verwendung des gleichen Wärmeträgermediums auf beiden Seiten des Tauschers.

Figur 10: Prinzipieller Unterschied zwischen Parallel- und Differenznetzen (verändert nach Amstein+Walthert AG).



Parallel-Betrieb

Die Bezüger können auf konventionelle Art und Weise über eine gerichtete, d.h. parallele, Vernetzung mit zentraler Pumpenstation versorgt werden, d.h. an jeder Systemgrenze muss eine ausreichende Druckdifferenz gewährleistet sein. Diese Art der Vernetzungen eignet sich, wenn der Verbund aus wenigen Bezüger mit vergleichbaren Bedarfsprofilen (z.B. Wohnareale) besteht, und die Vernetzung zwischen Wärmegewinnung und Bezüger kompakt geführt werden kann (Figur 10, links).

Differenz-Betrieb

Erfolgt der Transport des Wärmeträgers durch die dezentralen Umwälzpumpen der Bezüger, kann in bestimmten Betriebszuständen Wärme und Kälte bidirektional zwischen einzelnen Bezüger ausgetauscht werden (Figur 10, rechts). Die Fliessrichtung des Wärmeträgers ist nicht vorgegeben, sondern folgt aus den möglichen Betriebszuständen der Bezüger. Erdwärmesonden übernehmen in einem derart gesteuerten NT-Netz die Rolle eines Pufferspeichers, der diejenige Wärme oder Kälte liefert, die im Netz nicht direkt zwischen den Bezüger ausgetauscht werden kann. Da die Fliessrichtung des Wärmeträgermediums sich je nach den Betriebszuständen der einzelnen Bezüger einstellt, spricht man von einem Differenz-Netz. Deshalb ist der Druckverlust grundsätzlich geringer als im gerichteten Netz.

Innerstädtische Areale bieten wegen ihres oftmals hohen Bedarfs an Kühlenergie optimale Bedingungen für Differenz-Netze. Mit der dichten Bebauung geht auch ein mangelndes Platzangebot für die Erstellung von EWS-Feldern einher.

Parallel- und Differenz-Betrieb

Damit die Komplexität der Hydraulik handhabbar bleibt, kann es sich je nach Arealgrösse als vorteilhaft erweisen, eine bestimmte Anzahl von Objekten nicht direkt an das Haupt-Netz anzuschliessen, sondern über eine Zentrale zu versorgen. In diesem Fall besteht das Konzept aus einem kalten NT-Netz als Hauptverbund sowie aus einer oder mehreren Energiezentralen und daran angeschlossenen Nahwärmenetzen. Die Effizienz einer zentralen Wärmezeugung ist vor allem aufgrund von Wärmeverlusten bei der BWW-Bereitstellung im Sommer, meist schlechter als diejenige von dezentralen Wärmepumpen. Da der Schwerpunkt dieser Studie auf den erdgebundenen Anlagen liegt, werden technische Vorschläge, wie eine optimale Gesamtsystem-Effizienz erzielt werden kann, hier nicht weiter ausgeführt. Es wird diesbezüglich auf die BFE-Studien "Grosswärmepumpen - Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen: Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte" (Ehrbar und Hubacher, 2006) und "Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen" (Hubacher et al., 2010) verwiesen.

6.2 Potenzielle Wärmequellen zur Regeneration des Erdspeichers

NT-Netze eignen sich dazu, unterschiedliche Wärmequellen miteinander zu verbinden. Dabei ist zu beachten, dass Regenerationsquellen mit unterschiedlichen Temperatur-Niveaus sich in 2-Leiter-NT-Netzen nicht kombinieren lassen.

Direktkühlung ("Geocooling")

Direkte Gebäudekühlung über das NT-Netz mit Vorlauftemperaturen bis etwa 20°C ist eine effiziente Technologie zur Steigerung des Raumkomforts im Sommer. Die Energiemenge, die über Direktkühlung an das Netz abgegeben wird, kann den Wärmeentzug für Heizbedarf jedoch meist bei weitem nicht ausgleichen und daher nur in geringem Ausmass zur aktiven Regeneration des Untergrundes beitragen.

Je höher die Temperatur des Kühlsystems ist, umso grösser ist das Regenerationspotenzial über Direktkühlung. Kann die Wärmepumpe auch zur Kühlung eingesetzt werden, bietet sich eine Optimierung des Direktkühlpotenzials durch Auslegung der Direktkühlung auf die Rücklauftemperatur an.

Technische Kälte, Prozess-Kälte

Gebäude mit hohen internen Kühllasten (ICT-Anwendungen, z.B. Banken, Internet-Provider mit grossen Server-Anlagen, Call-Center, Produktions-Anlagen, etc.) benötigen oft über das ganze Jahr Kühlenergie mit tiefen Vor- und Rücklauftemperaturen, die über ein EWS gebundenes NT-Netz nicht dauerhaft geliefert werden können. Anstatt die Abwärme der Kältemaschine, wie meist üblich, über Rückkühler an die Umgebungsluft abzugeben, kann sie zur Regeneration der EWS-Felder verwendet werden.

Je nach Temperatur der anfallenden Abwärme muss geprüft werden, ob die Lebensdauer der EWS-Rohre nicht beeinträchtigt wird und der mit höheren Kosten verbundene Einsatz geeigneter Materialien (z.B. PE-RT, "Raised Temperature") sinnvoll ist.

Solarwärme

Das Produktionsprofil von Solarwärme ist gegenüber dem Heizbedarf saisonal verschoben. Solarwärme kann deswegen auch zur Regeneration von EWS verwendet werden. Solaranlagen sind deshalb zur Regeneration von EWS gut geeignet. Mit der Anzahl der Geschosse eines Objektes nimmt der Quotient aus Solarertrag und Wärmebedarf ab, d.h. in dicht bebauten Gebieten mit hoher Stockwerkzahl ist eine vollständige Regeneration von EWS-Feldern über Solaranlagen auf Dachflächen nicht ohne weiteres möglich.

Aus gewässerschutzrechtlichen Aspekten sind im Kanton Zürich EWS-Eintrittstemperaturen über 40°C nicht zulässig. Daher sind unabgedeckte Kollektoren für die Regeneration von EWS-Anlagen eher geeignet als verglaste Kollektoren oder Vakuum-Rohren-Kollektoren, welche aufgrund ihrer höheren Betriebstemperatur vor allem für die direkte Warmwassererwärmung eingesetzt werden.

Das lokale Solarpotenzial für unterschiedliche Objekte und Anwendungen in der Stadt Zürich kann nach Novak et. al (2007) mit Hilfe eines z.B. auf die Energiebezugsfläche bezogenen Potenzialindex geschätzt werden. Seit dem Juni 2013 ist auch ein GIS-basiertes Solar-Kataster für die Stadt Zürich online zugänglich (www.solarkataster.stadt-zuerich.ch). Mit Hilfe dieser Daten ist daher eine differenzierte Bewertung des lokalen Solarpotenzials möglich.

Das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich will Erfahrungen mit der solaren Regeneration von Erdsonden sammeln. Ein Pilotprojekt für ein Wärmepumpensystem mit solarer Regeneration über unabgedeckte Kollektoren wird mit der Erneuerung eines Quartier- und Gemeinschaftszentrums kombiniert (www.stadt-zuerich.ch/egt -> Fachartikel).

Umgebungsluft

Die Wärme der Umgebungsluft ist eine praktisch unerschöpfliche Wärmequelle, die über Luft-Wärmetauscher mit geringem Energieaufwand zur Regeneration von EWS genutzt werden kann. Die Systemtrennung zwischen Rückkühler und EWS-Netz sollte eine geringe Grädigkeit besitzen, damit die Jahresbetriebszeit des Rückkühlers so hoch wie möglich ist. Zur Vermeidung von Schallemissionen und für einen effizienten Betrieb sollte der Rückkühler auf tiefer Stufe betrieben werden (Nennleistung bei tiefster Ventilatoren-Drehzahl).

Fernwärme

Die Angebotszonen A1, B, C2 und D1 (siehe Figur 1) sind an das Netz der Fernwärme Zürich AG angeschlossen. Das Fernwärme-Netz soll ausgebaut werden und in Zukunft auch die Zonen A2, A3 (nördliches Teilgebiet) und C1 versorgen. Falls ausserhalb der Heizsaison nicht nutzbare Solarwärme verfügbar ist, könnte Fernwärme in den Gebieten A1, A2, A3 und B auch zur Regeneration von EWS-Feldern verwendet werden.

Das Fernwärme-Netz kann an einer oder an wenigen Stellen an ein NT-Netz angeschlossen werden. Ein paralleler Netzbetrieb (Fernwärme- und Niedertemperatur-Netz bis zum Verbraucher) ist nicht erforderlich. An der Einspeisestelle wird die Energie aus dem Fernwärme-Netz über Wärmetauscher an den EWS-Kreislauf übertragen. Hierfür ist der geringe Massendurchsatz des Fernwärmenetzes im Sommer von Vorteil.

Die Verfügbarkeit von Fernwärme stellt für EWS-basierte Arealversorgungen darum kein Ausschluss-Kriterium, sondern eine möglich Kombination dar. Der technische Vorteil eines EWS-Speichers bei einem sommerlichen Angebot überschüssiger (Fern-) Wärme wird anhand der Pilotstudie "OIZ" in Kapitel 7.2 gezeigt.

Wärme aus Abwasser

Abwasser-Wärme ist bei ausreichendem Massenstrom und hoher Wassertemperatur eine geeignete Regenerationsquelle. Die mittlere Wassertemperatur des Auslaufs des Klärwerks Werdhölzli liegt beispielsweise während mehr als sechs Monaten über 15°C, mit Maximalwerten von bis zu 25°C (F. Schmid, Stv. EB der Stadt Zürich). Bei Abwassermengen von mehr als 2 m³/s und einer angenommenen Abkühlung um 3 K in einem EWS-Feld entspricht dies einer durchschnittlichen Leistung von etwa 25 MW.

7 Machbarkeitsstudien

Ausgehend von einem Testareal wurden anhand von drei Pilotarealen technische und wirtschaftliche Fragestellungen zu Erdwärmesonden gebundenen Energie-Versorgungs-Anlagen untersucht. Die Auswahl der Areale wurde so getroffen, dass die Ergebnisse allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen für konkrete Projekte liefern sollen.

Die hier untersuchten Areale besitzen reinen Modellcharakter und sind nicht im Zusammenhang mit einer Energieplanung oder einem konkreten Bauvorhaben zu sehen.

7.1 Überprüfung der Aufgabenstellung anhand des Testareals Altstetten

Anhand eines bewusst klein gehaltenen Test-Areals wurde die vorgesehene Aufgabenstellung überprüft und die Auswahl geeigneter Pilotareale getroffen.

Als Test-Areal wurde ein Wohngebiet in Altstetten ausgewählt. Das Areal liegt in der Angebotszone E2 des EK 2050 und „ist ein Einfamilienhausgebiet, wo zentrale Lösungen nicht ideal sind. Der Anteil der Abwärmenutzung aus geklärtem Abwasser wird auf 35% festgelegt. Die mittlere Nachfragedichte und der grosse Anteil der Wohnnutzung bieten gute Voraussetzungen für die Wärmepumpen sowie die Solarenergie. Punktuell ist es auch möglich, Holz als Energieträger einzusetzen. Die Energieträgerstruktur der Angebotszone E2 gestaltet sich vielfältig.“ (Zitat Jakob et al., 2012)

Die Aussagen des EK 2050 betreffend Abwasser-Nutzung in der Angebotszone E2 sind nur dann auf einzelne Areale übertragbar, falls eine Infrastruktur für die Verteilung der Wärme über die gesamte Angebotszone vorhanden wäre.

Figur 11: Perimeter des Test-Areals in Altstetten.

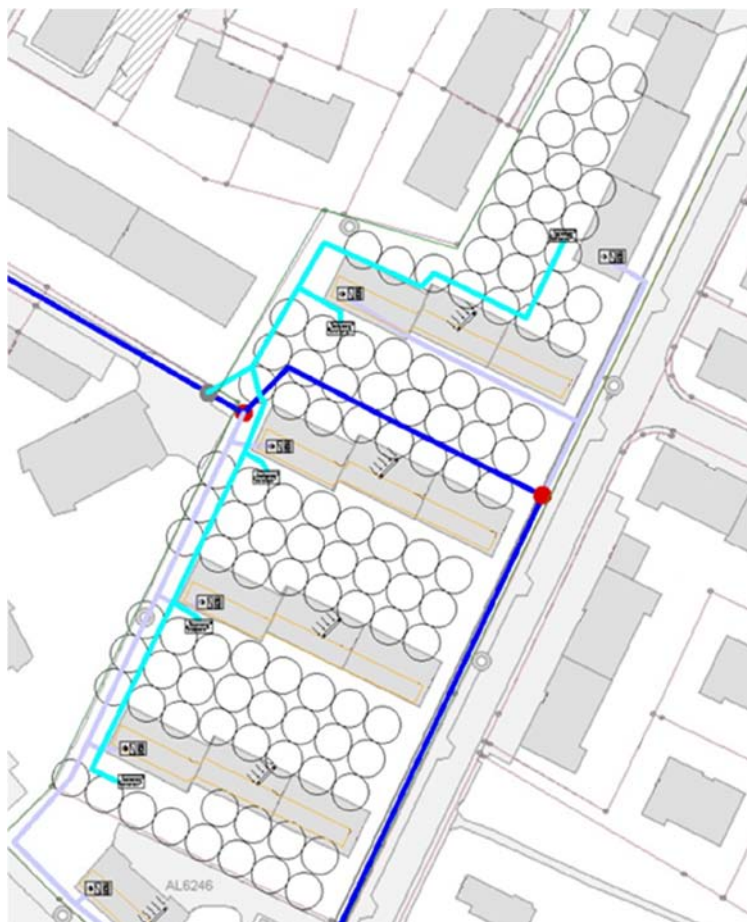


Im Test-Areal wurde untersucht, welche lokalen Bedingungen die Realisierung einer EWS gebundenen Energie-Versorgungs-Anlage begünstigen oder erschweren.

Fragestellungen

1. Verdichtung, freie Flächen: Wenn möglich, sollte die Installation von EWS auf Flächen zwischen bestehenden Gebäuden so erfolgen, dass eine zukünftige Verdichtung des Gebäudeparks nicht eingeschränkt wird (siehe Figur 12).

Figur 12: EWS-Standorte (Kreise) und NT-Netz (blaue Linie) zwischen Wohnobjekten im Test-Areal. Durch eine starke EWS-Nutzung der freien Flächen zwischen bestehenden Objekten kann in Zukunft eine Verdichtung des Gebäudeparks eingeschränkt werden.



2. Eigentümerschaften: In Arealen mit heterogenen Besitzverhältnissen muss geprüft werden, ob Flächen auf privaten Grundstücken genutzt werden können, z.B. für die Installation von EWS-Feldern über mehrere Parzellen unterschiedlicher Eigentümerschaften oder die Verlegung von NT-Leitungen. Günstige Voraussetzungen bieten Areale mit homogener Eigentümerstruktur (z.B. Genossenschaften).
3. Solarwärme: Im Test-Areal konnte kein nennenswertes Abwärmepotenzial erkannt werden. Die Regeneration der EWS-Felder muss also über Luft-Wärmetauscher, Solarkollektoren oder andere Wärmequellen erfolgen. Geeignete Bedingungen für Regeneration über Solarkollektoren sind bei Objekten mit grossen Dachflächen und direktem Anschluss an das NT-Netz gegeben. Bei kleinen Objekten, die über ein Nahwärmenetz versorgt werden und keinen direkten Anschluss an das NT-Netz besitzen, bietet sich die Installation günstiger Solarkollektoren zur Heizungsunterstützung an (Wärmegestehungspreis 15-20 Rp./kWh, www.swissolar.ch).
4. Luft-Wärmetauscher: Fällt ausserhalb der Heizsaison kein nennenswerter Energiebedarf an, wie es für Areale mit überwiegendem Raumwärmebedarf typisch ist, ist die Gleichzeitigkeit

zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot der Aussenluft gering. Entsprechend muss der EWS-Speicher auf Deckung der Spitzenheizlast ausgelegt werden. Unter diesen Bedingungen ist der Anteil der Investitionskosten für EWS und NT-Netz an den Gesamtinvestitionen am höchsten.

5. Gebäudesanierung: Wird der Wärmebedarf für Raumheizung durch Sanierung der Gebäudehüllen oder durch Ersatzneubau pro Objekt gesenkt, kann ein zunehmender Anteil des Gesamtwärmebedarfs über Solarkollektoren intern gedeckt werden. Zugleich erhöht sich die Gleichzeitigkeit zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot von Luft-WT, wodurch kleinere EWS-Speicher möglich sind.
6. Wärmeverteilung: Eine einheitliche Eigentümer- oder Gebäudesubstanz-Struktur mit tiefen Vorlauf-Temperaturen bietet gute Voraussetzungen für eine Gesamtkosten-optimierte Wärmeversorgung. Die Erstellung einer Wärmezentrale, die eine grössere Überbauung versorgt, bietet z.B. die Möglichkeit, dezentral überschüssige Solarwärme der einzelnen Bezüger zentral über die Systemtrennung zwischen NT-Netz und Zentrale in das NT-Netz einzuspeisen.

Da die Regeneration die zentrale Fragestellung ist, werden bei den Pilotstudien unterschiedliche Regenerationskonzepte angewendet und aus den Ergebnissen generelle Schlussfolgerungen gezogen. Als Pilotareale wurden zwei Wohngebiete unterschiedlicher Grösse (Pilotareal 1 und 2) sowie ein Areal mit überwiegend städtischem Inventar (Pilotareal 3) ausgewählt:

- Pilotareal 1: OIZ (Albisrieden)
- Pilotareal 2: ABZ Entlisberg (Wollishofen)
- Pilotareal 3: Wärmeverbund Isengrind/Wolfswinkel (Affoltern)

Das Ziel der Pilotstudien ist, zu untersuchen, welche Voraussetzungen zu wirtschaftlichen Grenzen führen und unter welchen Bedingungen andere regenerative Energiequellen möglicherweise sinnvoller eingesetzt werden können. Eine maximale Optimierung der Investitionskosten wurde daher nicht bewusst angestrebt. Daher sind die wirtschaftlichen Ergebnisse als Grundlage für konkrete Projekte nicht ohne weiteres übertragbar.

Planungsgrundlagen

Als Grundlage für die Berechnung des heutigen und gemäss "Effizienz-Szenario A" des EK 2050 in Zukunft zu erwartenden Nutzenergiebedarfs werden Daten des Gebäudeparkmodells der Stadt Zürich (GPM) verwendet. Dieses Modell liefert Einzelobjekt-bezogenen Nutzform, Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE. Für jedes Objekt und jede Nutzungsform wird daraus der NE-Bedarf für Raumheizung (RH) und Brauchwarmwasser (BWW) separat berechnet. Für den BWW-Bedarf wurde gemäss SIA 380/1 21 kWh/m²/a für "Wohnen" und 7 kWh/m²/a für "Nicht-Wohnen" angenommen. Der NE-Bedarf für Raumheizung entspricht der Differenz zum NE-Bedarf gemäss GPM. Die Heizleistung für Raumwärme wird mit 2'000 Volllaststunden berechnet, zuzüglich 15% als Zuschlag für die BWW-Erwärmung.

Das Potenzial von EWS-Speichern wurde für verschiedene Regenerationsquellen mit Hilfe von Simulationsrechnungen mit eingebundener Regenerationsquelle geschätzt.

Für die wirtschaftliche Betrachtung wurde eine JAZ von 4.6 für Raumwärme und 3.5 für BWW angenommen. Der Wärmeverlust im NT-Netz wird vernachlässigt. Die Verluste ab Wärmepumpe werden mit 3% für Raumheizung, 5% für BWW und für Hilfsenergie (Netzpumpen) wird eine Leistung von 2% der maximalen Heizleistung angenommen.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung (Kalkulationszinssatz, Energiepreise) erfolgt gemäss den Vorgaben der Stadt Zürich.¹¹

¹¹ <http://www.stadt-zuerich.ch/content/gud/de/index/umwelt/energie/energiestatistik/wirtschaftlichkeit.html>

7.2 Pilotareal OIZ (Albisrieden)

Ausgangslage

Das Pilotareal OIZ (Figur 13) liegt in Albisrieden zwischen Rechenzentrum OIZ Albis und Freibad Letzigraben. Die Arealfläche (ohne OIZ) beträgt 45'340 m². Das Rechenzentrum OIZ Albis hat im Endausbau gemäss Auskunft von Chr. Erb (Halter AG) einen Kühlenergiebedarf von 30.1 GWh/a bei konstanter Kühlleistung von 3'440 kW. 20.7 GWh/a sollen über Freecooling (Rückkühler) und 9.4 GWh/a über Kältemaschinen erzeugt werden. Ein Teil der Abwärme wird heute bereits über eine Wärmepumpe für die Heizenergieversorgung der Wohngenossenschaft Gewobag genutzt.

Das Gesamtpotenzial nutzbarer Abwärme des OIZ für Raumheizung und BWW über Wärmepumpen beträgt etwa 7.6 GWh/a. Von den restlichen 22.5 GWh/a Abwärme fallen 7 GWh/a während der Heizsaison von Oktober bis März an. Diese Wärme kann als Grundlast über Wärmepumpen in Kombination mit einer z.B. fossilen Heizzentrale genutzt werden.

Die Pilotstudie soll aufzeigen, wie viel Abwärme in einem EWS-Feld gespeichert und im Winter für Heizzwecke genutzt werden kann. Ziel ist es, aufzuzeigen, wie hoch der wirtschaftliche Aufwand zur Erschliessung einer hochwertigen, jedoch ausserhalb der Bedarfszeiten anfallenden Wärmequelle ist.

Energiebedarf

Der in Figur 13 gezeigte Areal-Perimeter wurde so bestimmt, dass der lokale Nutzwärmebedarf über ein EWS-Feld auf dem Sportgelände der Schule Utogrund gedeckt werden kann. Das Sportgelände Utogrund bietet eine nutzbare Fläche für 96 jeweils 250 m tiefe EWS mit 10 m Abstand. Der heutige Wärme- und Leistungsbedarf von 3'035 MWh/a bzw. 1'530 kW kann über das EWS-Feld nicht gedeckt werden (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Daher wurde von einer für das Jahr 2050 erwarteten Situation gemäss EK 2050 ausgegangen.

Der NE-Bedarf für "Nicht-Wohnen" entfällt hauptsächlich auf die Schulanlage in G3 und auf einige Objekte mit Dienstleistungen in G1. Gemäss EK 2050 sinkt der Nutzenergiebedarf bis 2050 um 36% auf 1'931 MWh/a bei einer erwarteten Zunahme der EBF um 22%. Gemäss den Daten aus Tabelle 2 und 3 nimmt der spezifische Nutzenergiebedarf von 106 auf 55 kWh/m²_{EBF} ab.

Figur 13: Pilotareal OIZ (grün: angeschlossene Wärmebezüger, blau: NT-Leitung, rote Fläche: EWS-Feld).



Tabelle 2: Nutzungsform "Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss GPM für Eff.Sz.Var.a.

Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
G1	3'931	6'152	405'678	343'568	186	123
G2	7'841	9'624	998'284	635'357	479	249
G3	644	1'761	87'981	96'507	43	34
Summe	12'416	17'537	1'491'943	1'075'432	708	406

Tabelle 3: Nutzungsform "Nicht-Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss GPM für Eff.Sz.Var.a.

Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
G1	9'474	10'713	879'515	480'560	468	233
G2	883	889	77'856	46'337	41	23
G3	5'780	5'780	586'255	328'739	314	166
Summe	16'137	17'382	1'543'626	855'636	823	422

Konzept

Die Regeneration des EWS-Feldes erfolgt ausserhalb der Heizsaison von April bis September 24 h/d mit Abwärme des Rechenzentrums (21°C/16°C). Dieser saisonale Wärmeeintrag ist durch die Vorlauf-Temperatur der Abwärme begrenzt und beträgt unter diesen Bedingungen etwa 1'540 MWh/a. Die gleiche Wärmemenge wird während der Heizsaison aus dem EWS-Feld mit tiefsten EWS-Eintrittstemperaturen knapp über 0°C bezogen (s. Angang).

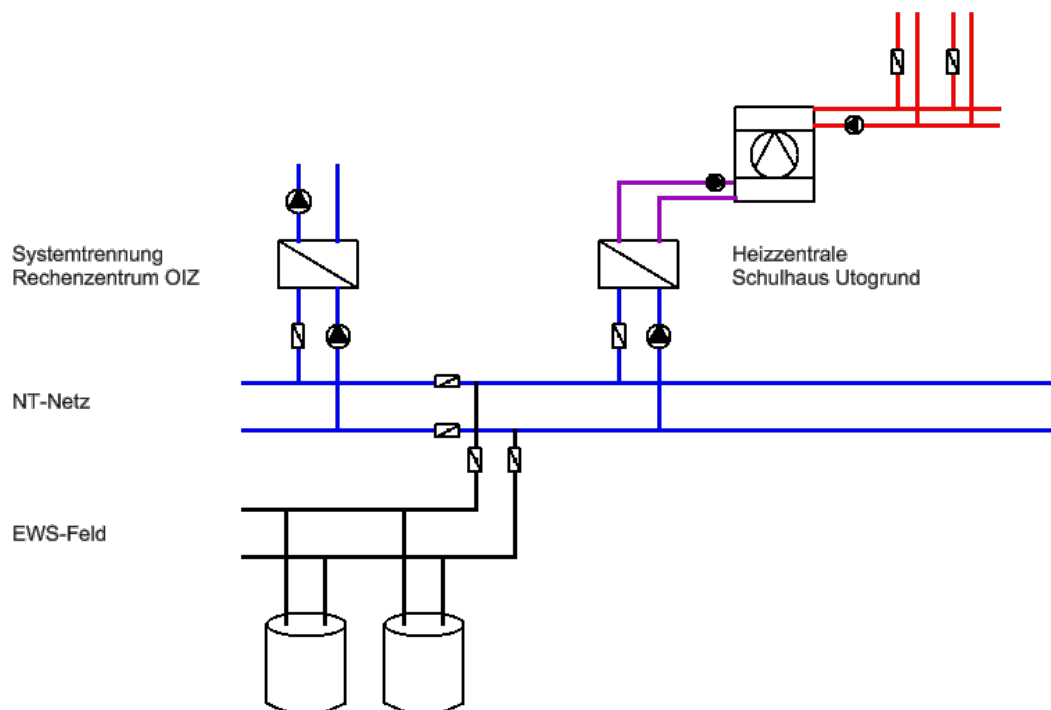
Das NT-Netz kann mit Wasser als Wärmeträger in Betrieb genommen werden. Eine spätere Umstellung auf ein Wasser-Antifrogen-Gemisch bietet eine zusätzliche Leistungsreserve.

Der Temperaturhub auf die Vorlauftemperatur für Raumwärme und BWW erfolgt über eine Wärmepumpe mit 840 kW Heizleistung. Es wird angenommen, dass die Energiezentrale im Schulhaus Utogrund untergebracht werden kann.

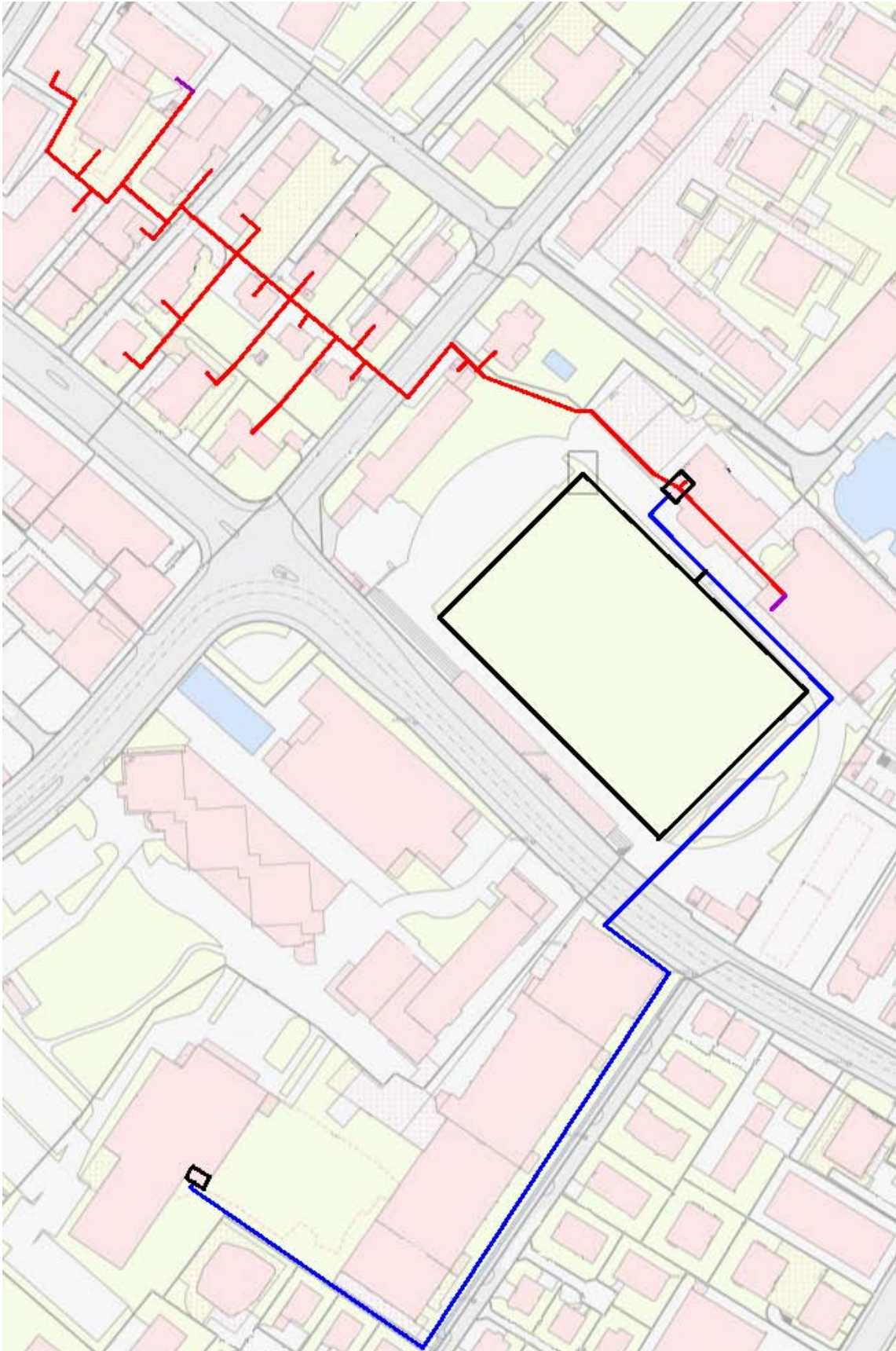
Je ein Wärmetauscher am Rechenzentrum und an der Heizzentrale stellen die Systemtrennung zwischen NT-Netz (Primärkreis) und Regeneration bzw. Wärmeerzeugung dar. Die Wärmepumpe muss über einen frostsicheren Verdampfer-Zwischenkreis an den Tauscher angeschlossen werden, damit im Primärkreis tiefe Wassertemperaturen erreicht werden können. Beide Wärmetauscher verfügen über eigene Pumpenstationen (Figur 14).

Das Pilotareal wird über ein Nahwärmenetz versorgt (Figur 15). Als Systemgrenze wird die Fernwärmeübergabestation beim Verbraucher definiert. Das Nahwärmenetz verläuft auf kürzestem Weg über das Areal, um die hohen Kosten von Leitungsrampen entlang von Strassen zu vermeiden. Die Leitungen fallen, wenn möglich, mit den Parzellengrenzen zusammen.

Figur 14: Konzept-Skizze: Das NT-Netz (blau, Wärmeträger: Wasser) ist über zwei Wärmetauscher mit der Regenerationsquelle und der Heizzentrale verbunden. Der Antrieb des Primärkreis-Wärmeträgers erfolgt über Pumpenstationen, die mit dem Kühlkreis des OIZ bzw. der Wärmepumpe gekoppelt sind. Das Areal wird über ein Nahwärmenetz (rot) versorgt. Eine tiefe Grädigkeit der Wärmetauscher (1.5 K) wird vorausgesetzt.



Figur 15: Arealübersicht: NT-Netz (blau) und Nahwärmenetz (rot). Das EWS-Feld befindet sich auf dem Sportgelände der Schulanlage Utogrund (schwarz).



Investitionen

Position	Ausmass
1	Niedertemperatur-Netz (Primärkreis)
1.1	96 EWS à 250 m
1.2	NT-Leitung 2 x 500 m, DN 200 mm
	1 Abgang zu EWS-Feld
	2 Abgänge zu Rechenzentrum und Heizzentrale
2	Zentrale Wärmeerzeugung
2.1	1 Wärmepumpen-Heizzentrale, 840 kW
2.2	Wärmetauscher OIZ, 400 kW Übertragungsleistung
3	Wärmeverteilung (Sekundär-Kreis)
3.1	1 Nahwärmenetz, 2 x 900 m
4	Verbraucheranschlüsse
4.1	19 Übergabestationen

Grundlagen Kostenschätzung

Kapitalzins	2.5%
Teuerung	1.5%
Betrachtungsdauer	30 a

Investitionskosten	Abschr.	Summe	
EWS-Speicher	50 a	1'680'000	CHF
NT-Leitung	50 a	900'000	CHF
Zentrale Wärmeerzeugung	20 a	830'000	CHF
Wärmeverteilung	50 a	515'000	CHF
Verbraucheranschluss	50 a	325'000	CHF
Unvorhergesehenes	20 a	215'000	CHF
Honorare/Nebenkosten	20 a	445'000	CHF
Total		4'910'000	CHF

Jahreskosten

Annuitätsfaktor	0.048	
Kapitalkosten	215'000	CHF/a
Jahresenergiekosten	110'000	CHF/a
Jahreskosten Wartung/Instandsetzung/Inspektion	75'000	CHF/a
Jahreskosten Betriebsführung	55'000	CHF/a
Total Jahreskosten	455'000	CHF/a

Wärmegestehungspreis

Heutiger Wärmegestehungspreis	21.4 Rp./kWh
Langfristiger Wärmegestehungspreis	23.4 Rp./kWh

Fazit

Das Rechenzentrum OIZ könnte von April bis September 1'500 MWh/a Kühlenergie mit geringen Betriebskosten direkt über einen EWS-Speicher auf dem Sportgelände Utogrund beziehen. Hierdurch könnten ca. 200-300 MWh/a elektrische Energie, die sonst für den Betrieb von Kältemaschinen anfallen, eingespart werden. Dieser zusätzliche Nutzen ist in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht berücksichtigt.

Die im EWS-Feld gespeicherte Wärme versorgt das Pilotareal bei einem angenommenen Nutzenergiebedarf entsprechend EK 2050 "Eff.Sz.Var.a" von 1'930 GWh/a. Der Energiebedarf für Wärmepumpe und Umwälzpumpen beträgt etwa 550 MWh/a. Die Regeneration des Speichers erfolgt mit geringer Leistung, die "Entladung" mit etwa doppelt so hoher Leistung, was ein wichtiger zusätzlicher technischer Nutzen ist.

Der EWS-Speicher ermöglicht unter diesen Voraussetzungen, das Abwärmeangebot besser auszunutzen, indem die sonst im Sommer nicht nutzbare Abwärme saisonal für spätere Nutzung gespeichert wird, und andererseits die Leistung der Abwärme zu verdoppeln. Eine Bewertung der Investitionskosten ist unter der speziellen Fragestellung, die in diesem Areal untersucht wurde, nur im Kontext einer weitergehenden Nutzung der OIZ-Abwärme zu sehen, d.h. unter der Berücksichtigung der Gesamtkosten für ein EWS-gebundenes NT-Netz, womit die gesamte jährlich anfallende Abwärme für Heizzwecke genutzt werden kann.

Wird die Abwärme des Kältemaschinen-Kondensators (ca. 33°C) des OIZ zur Regeneration genutzt, kann der jährliche Wärmeeintrag und die Temperatur des Wärmeträgers im Primärkreis langfristig um etwa 300 MWh/a bzw. 6 K angehoben und die JAZ der Wärmepumpe (gemäss Simulationsrechnungen) um ca. 10% verbessert werden (s. Anhang). Bei gleichem Wärmeentzug entsteht durch die höhere Quelltemperatur jedoch kein sinnvoller Nutzen, da die Effizienzsteigerung durch den zusätzlichen Energiebedarf für die Kältemaschine benötigt wird. Durch den mit der Regenerationstemperatur steigenden Wärmeeintrag kann auch der Wärmebezug im Winter langfristig erhöht werden. Der zusätzliche Wärmeentzug ist aber geringer als die eingetragene Wärmemenge, da der Unterschied zwischen Regenerationstemperatur und mittlerer Bodentemperatur zunimmt und deshalb entsprechend höhere Speicherverluste entstehen.

Die Nutzung zusätzlicher Wärmequellen (z.B. lokale Solarwärmenutzung zur Heizungsunterstützung) bietet grundsätzlich aus wirtschaftlicher Sicht ein weiteres Optimierungspotenzial. Andererseits sollte in der unmittelbaren Umgebung des Rechenzentrums eine vollständige Nutzung der verfügbaren Abwärme im Vordergrund stehen.

Wie eingangs erwähnt, handelt es sich bei dem hier beschriebenen Szenario um eine reine Studienarbeit. Aktuell nutzt die Genossenschaft Gewobag einen Teil der Abwärme genauso ökologisch für die Wärmeversorgung von Wohnungen.

7.3 Pilotareal ABZ Entlisberg (Wollishofen)

Ausgangslage

Die Genossenschaft ABZ Entlisberg in Wollishofen plant bis 2035 gemäss "Masterplan Entlisberg" einen Neubau der Wohnsiedlungen Entlisberg II/III, Owenweg, Moosstrasse und Im Moos (Figur 16). Das Areal bietet durch seine einheitliche Eigentümer- und Wärmebedarfsstruktur gute Bedingungen für die Realisierung einer EWS gebundenen Energieversorgungsanlage. Das Areal ist für ein Gebiet mit reinem Wohncharakter relativ dicht bebaut und weist heute keinen erkennbaren Bedarf an Kühlenergie auf.

Durch den in Etappen geplanten Ersatzneubau können die Flächen unter den Gebäuden für EWS-Felder genutzt werden. Der Trinkwasserkanal des Seewasserwerks Im Moos verläuft jedoch mitten durch das Areal und schränkt das nutzbare Flächenangebot für EWS-Bohrungen ein. Das Schulhaus Entlisberg besitzt die grösste freie Fläche in der Umgebung und einen geringen eigenen Nutzwärmebedarf und wird in den Modell-Verbund integriert. Der Block "C3" zwischen Marchwartstrasse und Balberstrasse enthält private Liegenschaften. Um ein kompaktes Areal zu erhalten, werden die Objekte dieses Blocks ebenfalls in den Verbund integriert (Figur 16).

Anhand dieser Pilotstudie soll vorrangig das Regenerationspotenzial von Solarkollektoren und Umgebungsluft sowie die Möglichkeit einer direkten Nutzung dieser Regenerationsquellen untersucht werden.

Figur 16: Pilotareal ABZ Entlisberg (grün: angeschlossene Wärmebezügler, blau: NT-Leitung, rote Fläche: EWS-Feld).



Energiebedarf

Der Nutzenergiebedarf des Pilotareals ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst. Der Nutzwärmebedarf für "Nicht-Wohnen" ist vergleichsweise gering und weist auf einen geringen Kühlenergiebedarf hin.

Gemäss EK 2050 sinkt der Nutzenergiebedarf bis 2050 von heute 7.2 GWh/a um 28% auf 5.2 GWh/a bei einer gleichzeitigen Zunahme der EBF um 40%. Netto wird eine Verringerung des spezifischen Nutzenergiebedarfs von 130 auf 67 kWh/m²_{EBF} erwartet.

Tabelle 4: Nutzungsform "Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss GPM für Eff.Sz.Var.a.

Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
Entlisberg II/III	12'391	18'534	1'801'500	1'337'296	886	545
Areal "C3"	6'871	10'850	928'070	728'034	454	288
Im Moos I/II	19'833	27'244	2'500'224	1'818'290	1'198	717
Schulhaus Entlisberg	1'171	1'615	152'774	110'580	74	44
Owenweg	4'836	6'825	612'295	453'448	294	178
Moosstrasse 8/10	3'773	4'584	436'711	312'419	206	124
Summe	48'875	69'652	6'431'573	4'760'067	3'108	1'896

Tabelle 5: Nutzungsform "Nicht-Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss GPM für Eff.Sz.Var.a.

Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
Entlisberg II/III						
Areal "C3"	191	560	27'521	22'910	9	5
Im Moos I/II	2'185	3'076	272'536	171'383	148	86
Schulhaus Entlisberg	3'871	3'871	424'593	233'532	229	119
Owenweg						
Moosstrasse 8/10	345	560	27'521	22'910	14	11
Summe	6'592	7713	741'615	437'935	400	221

Konzept

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde das lokale Potenzial von Luft-Wärmetauschern zur Regeneration der EWS-Felder untersucht (siehe Anhang). Bei den vorherrschenden klimatischen Bedingungen und einem angenommenen Bedarfsprofil Raumwärme zu BWW von 4 zu 1 beträgt das Regenerationspotenzial über Luft-Wärmetauscher etwa 88% für EWS-Felder mit 250 m tiefen Sonden bzw. etwa 93% für 150 m tiefe EWS. Im Unterschied zur Situation im Pilotprojekt OIZ stabilisiert sich der Speicher bei tieferen EWS-Temperaturen, d.h. der spezifische Wärmeentzug wird hier gegenüber den Annahmen des Pilotareals OIZ entsprechend reduziert. EWS-Felder mit "kurzen" Sonden benötigen im Vergleich zu Feldern mit "tiefen" Sonden brutto mehr Sondenmeter, können aufgrund der geringeren Abstände und der tieferen Bodentemperaturen die Wärme aus der Umgebungsluft aber effizienter speichern. Da die Platzverhältnisse des Pilotareals für EWS-Bohrungen eher ungünstig eingeschätzt werden, ist eine hohe EWS-Dichte anzustreben. Im Pilotareal werden daher EWS mit 200 m Tiefe und 8 m Abstand empfohlen. Der spezifische Wärmeentzug wird auf 55 kWh/m_{EWS}/a geschätzt.

Als Standort für die Aufstellung von Luft-Wärmetauschern ist die Fläche über dem Strassentunnel der A3 wegen der bereits bestehenden Lärmbelastung prädestiniert. Der abgelegene Standort hat aber lange Transportwege mit maximaler Regenerationsleistung und deshalb grosse Leitungsquerschnitte zur Folge.

Gemäss Novak et al. (2007) kann die in Zürich nutzbare Solarwärme für unterschiedliche Nutzungsformen mit Hilfe eines typischen solaren Potenzial-Index geschätzt werden. Der Potenzial-Index beschreibt das Verhältnis aus Kollektorfläche K_F und EBF. Zur Heizungsunterstützung von Mehrfamilienhäusern wird für den Potenzial-Index ein Bereich von 0.015-0.023 angegeben. Für die Pilotstudie werden ein Index von 0.023 und ein Kollektorertrag von $500 \text{ kWh/m}^2_{K_F}/\text{a}$ angenommen. Daraus folgt ein gesamter Solarertrag von 900 MWh/a für Bedingungen in 2050 bzw. ein spezifischer Solarertrag von $12 \text{ kWh/m}^2_{EBF}/\text{a}$. Dies entspricht 17% des gesamten NE-Bedarfs (im Jahr 2050). Die gesamte Kollektorfläche von $1'800 \text{ m}^2$ entspricht einer Dichte von nur $0.8 \text{ m}^2_{K_F}$ pro Person.

Die Nutzwärmeproduktion der Wärmepumpen nimmt bei zusätzlicher interner Solarwärmenutzung um 17% von 5.2 GWh/a auf 4.3 GWh/a ab. Entsprechend nimmt der Wärmeentzug aus den EWS-Feldern von 4.2 GWh/a auf 3.4 GWh/a ab.

Da die Solarwärme überwiegend im Sommer anfällt, nimmt der relative Anteil der über die Wärmepumpe produzierten Energie für BWW-Erwärmung von $1.5/3.7$ auf etwa $0.9/3.4 \approx 1/4$ ab, d.h. die spezifische Belastung des EWS-Speichers ist während der Heizsaison stärker als ohne solare Unterstützung. Das Verhältnis von BWW zu Raumwärme von netto 0.9 zu 3.4 entspricht dem Belastungsprofil der Simulationsrechnungen, weswegen die abgeleiteten Kennzahlen für dieses Szenario angewendet werden können. Bei 17% solarem Deckungsgrad kann die Anzahl der erforderlichen EWS also um 17% verringert werden.

Die Erschliessung des Areals erfolgt in mehreren Etappen gemäss "Masterplan Entlisberg". Tabelle 6 zeigt den zeitlichen Ablauf der Arealerschliessung über das NT-Netz sowie Anzahl bzw. Grösse der auf den jeweiligen Arealen installierten EWS. Der durch jedes neu hinzukommende Areal zusätzlich entstehende Wärmebedarf muss durch neu hinzukommende EWS-Felder gedeckt werden können. Entsprechend muss die Leistung der Luft-Wärmetauscher mit zunehmendem Wärmebedarf vergrössert werden.

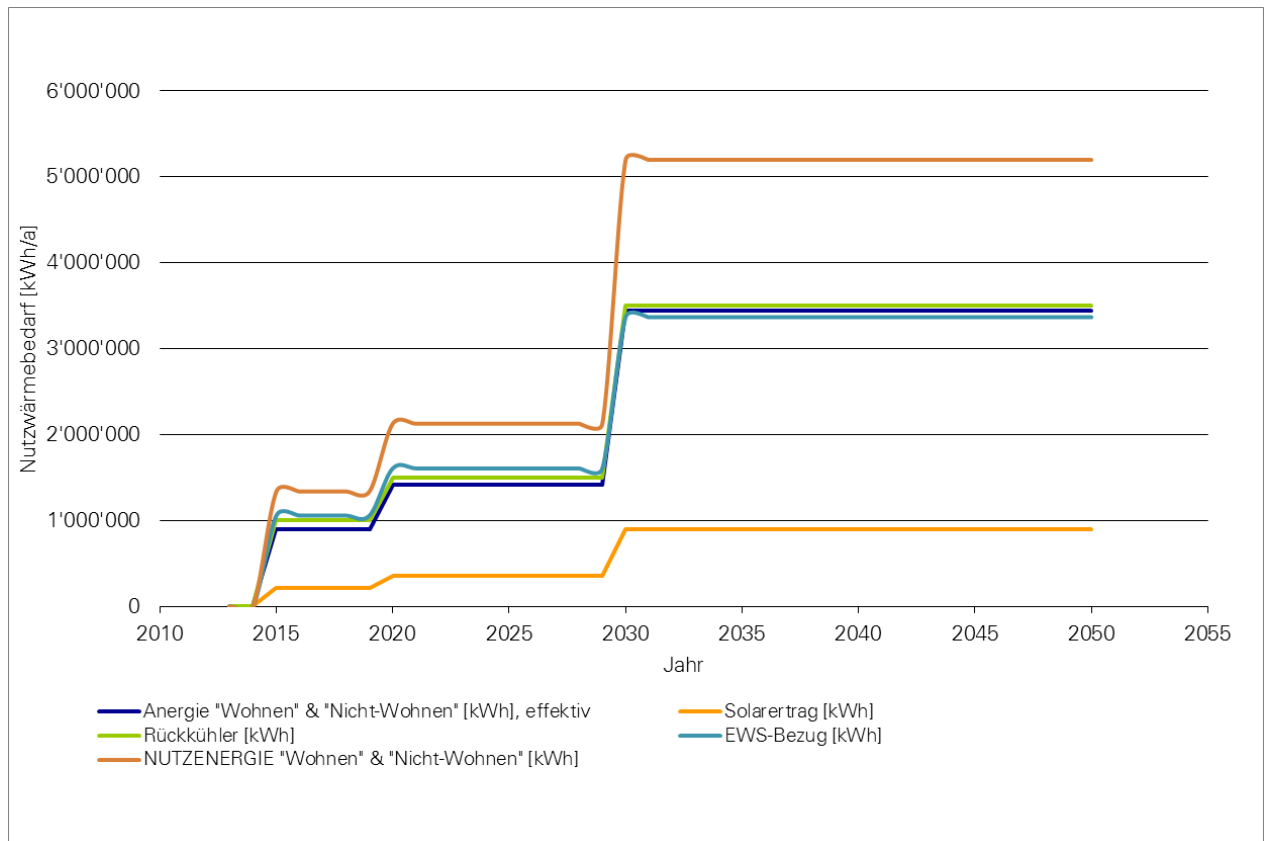
Figur 17 stellt die zeitliche Entwicklung des Nutzenergiebedarfs im gesamten Areal dar. Es wird davon ausgegangen, dass nur Objekte mit Nutzenergiebedarf und EBF gemäss Erwartungen für das Jahr 2050 nach "Eff.Sz.Var.a" des EK 2050 angeschlossen werden. Das nutzbare Solarwärmepotenzial wird gemäss Potenzial-Index für MFH in Zürich berechnet. Die Anzahl der neu hinzukommenden EWS-Felder ist so bemessen, dass der Wärmebedarf abzüglich Solarwärmenutzung vollständig gedeckt werden kann. Entsprechend nimmt die Anzahl der Luft-Wärmetauscher zu. Die Linien "Anergie „Wohnen und Nicht-Wohnen“, "Rückkühler" und "EWS-Bezug" müssen etwa zur Deckung kommen.

Tabelle 6: Etappierungsplan für die Arealerschliessung, angelehnt an den "Masterplan Entlisberg".

Areal	Neubau/Umbau	Anzahl EWS auf Areal
Entlisberg II/III	2015	110
Owenweg	2020	60
Moosstrasse	2020	keine
Im Moos I	2030	80
Im Moos II	2030	keine
Schulhaus Entlisberg*)	2030*)	80*)
"C3"	2030*)	keine

*) Annahme

Figur 17: Zeitliche Entwicklung der Energiebilanz im Pilotareal ABZ Entlisberg (Anergie „Wohnen“ & „Nicht-Wohnen“ [kWh], effektiv: Nutzenergiebedarf abzüglich intern nutzbarer Solarertrag und abzüglich Strombedarf für die Wärmepumpen).

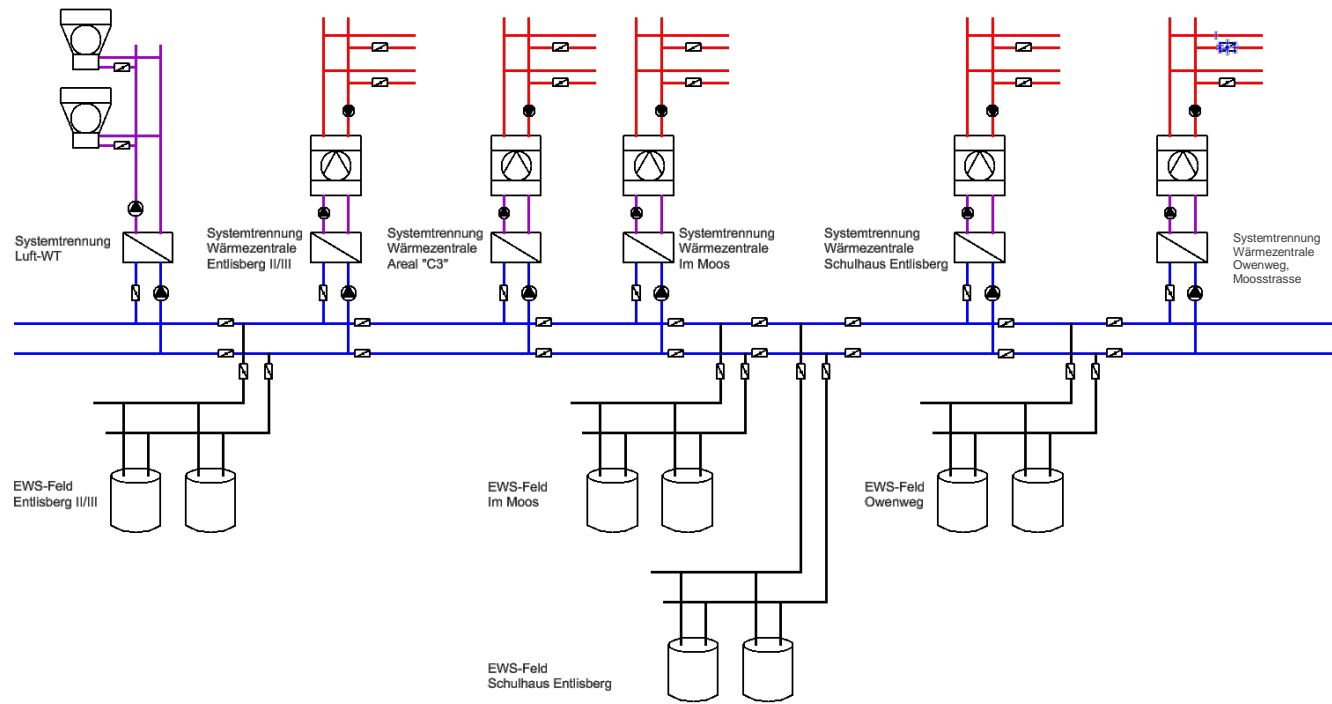


Die Wärmeerzeugung erfolgt pro Areal über Wärmepumpenzentralen. Der geplante Areal-Neubau bietet die Möglichkeit, optimale Bedingungen für die Aufstellung von Wärmezentralen sicherzustellen. Die Wärmelieferung zum Verbraucher erfolgt über Nahwärmenetze. Die Schnittstelle zum Verbraucher ist durch eine Fernwärme-Übergabestation in jedem Gebäude definiert.

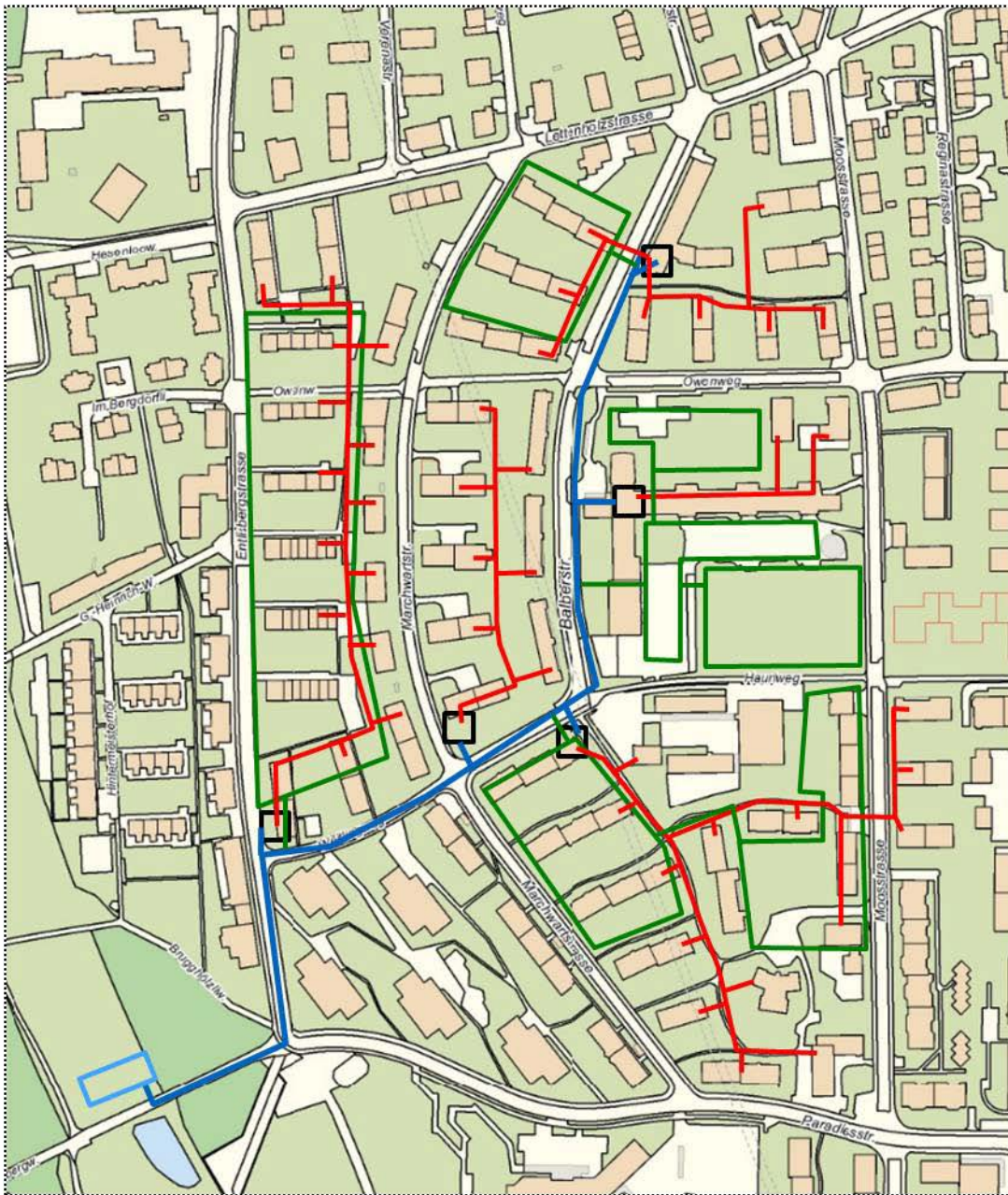
Der Kern des Verbundes ist eine NT-Leitung, welche die Wärmezentralen auf den einzelnen Arealen mit den EWS-Feldern und den Luft-Wärmetauschern im Südwesten über ein Differenz-Netz verbindet (Figur 18, Figur 19). Die Wärmezentralen sind so zwischen den Abgängen zu den EWS-Feldern gelegen, dass der Wärmebedarf über benachbarte EWS-Felder gedeckt werden kann, d.h. im Heizbetrieb ist die Netto-Leistung entlang des NT-Netzes minimal. Auf entsprechend geringe Leistungen können die dezentralen Pumpenstationen, über die jede Wärmezentrale verfügt, ausgelegt werden.

Die Regeneration erfolgt aufgrund des Standortes der Luft-Wärmetauscher im Parallelbetrieb. Die Pumpenstationen des Luft-WT müssen den Druckverlust über die Gesamtstrecke des Netzes überwinden können. Ein zusätzlicher oder alternativer Standort für die Aufstellung der Luft-Wärmetauscher innerhalb des NT-Netzes würde bei Regeneration ebenfalls Differenz-Betrieb ermöglichen und die Kosten für die Erstellung der NT-Leitungen deutlich reduzieren. Der Platzbedarf für die Aufstellung von Luft-WT innerhalb des Areals kann hier nicht ohne weiteres realisiert werden.

Figur 18: Konzept-Skizze



Figur 19: Arealübersicht: NT-Netz (blau) und Nahwärmenetz (rot), mögliche Standorte für EWS-Felder (grün).



Investitionen

Position	Ausmass
1	Niedertemperatur-Netz (Primär-Kreis)
1.1	310 EWS à 200 m
1.2	NT-Leitung, 2 x 520 m, DN 200 - DN 355
	4 Abgänge zu EWS-Feldern
	5 Abgänge zu Wärmezentralen
2	Zentrale Wärmeerzeugung
2.1	5 Wärmepumpen-Heizzentralen (total 2'100 kW)
2.2	6 Luft-Wärmetauscher, 2'500 kW Übertragungsleistung
3	Wärmeverteilung (Sekundär-Kreis)
3.1	5 Nahwärmenetze, total 2 x 1'800 m
4	Verbraucheranschlüsse
4.1	53 Übergabestationen
4.2	53 Solarwärmeanlagen, total 1'800 m ² Kollektorfläche

Grundlagen Kostenschätzung

Kapitalzins	2.5%
Teuerung	1.5%
Betrachtungsdauer	30 a

Investitionskosten	Abschr.	Summe	
EWS-Speicher	50 a	4'340'000	CHF
NT-Leitung	50 a	1'640'000	CHF
Zentrale Wärmeerzeugung	20 a	4'190'000	CHF
Wärmeverteilung	50 a	1'165'000	CHF
Verbraucheranschluss	50 a	900'000	CHF
Unvorhergesehenes	20 a	610'000	CHF
Honorare/Nebenkosten	20 a	1'875'000	CHF
Total		14'720'000	CHF

Jahreskosten

Annuitätsfaktor	0.048
Kapitalkosten	715'000 CHF/a
Jahresenergiekosten	235'000 CHF/a
Jahreskosten Wartung/Instandsetzung/Inspektion	255'000 CHF/a
Jahreskosten Betriebsführung	155'000 CHF/a
Total Jahreskosten	1'360'000 CHF/a

Wärmegestehungspreis

Heutiger Wärmegestehungspreis	24.0 Rp./kWh
Langfristiger Wärmegestehungspreis	26.1 Rp./kWh

Fazit

Die Regeneration der EWS-Felder erfolgt über Luft-Wärmetauscher, für die ein geeigneter Standort ausserhalb des Areals gefunden wurde. Dieser Standort hat grosse Leitungsquerschnitte im NT-Netz und entsprechend hohe Kosten für Material und Leitungsgräben zur Folge.

Für die Wärmeversorgung wurde ein Konzept mit Wärmepumpenzentralen und kostengünstiger dezentraler Solarwärmenutzung zur Heizungsunterstützung untersucht. Über dezentrale Solaranlagen kann ein bedeutender Anteil des Nutzwärmebedarfs gedeckt und die Effizienz der Wärmepumpenzentralen verbessert werden.

Der EWS-Speicher muss im Heizbetrieb die volle Entzugsleistung gewährleisten, da der Beitrag der Solarwärme während der Heizsaison eher unbedeutend ist. Wärmequellen, deren Angebotszeiten nicht oder nur gering mit dem Wärmeangebot zusammenfallen, sind als gleichwertige Energiequelle in einem EWS-Verbund nicht geeignet.

Alternative Standorte für Aufstellung der Luft-Wärmetauscher innerhalb des Areals könnten die Kosten für die Erstellung des NT-Netzes spürbar verringern.

Die Regeneration der EWS-Felder über dezentrale Solarwärme und über Direktkühlung der Gebäude wurde nicht in Erwägung gezogen, da der individuelle Anschluss an das NT-Netz hohe Kosten pro Objekt verursacht.

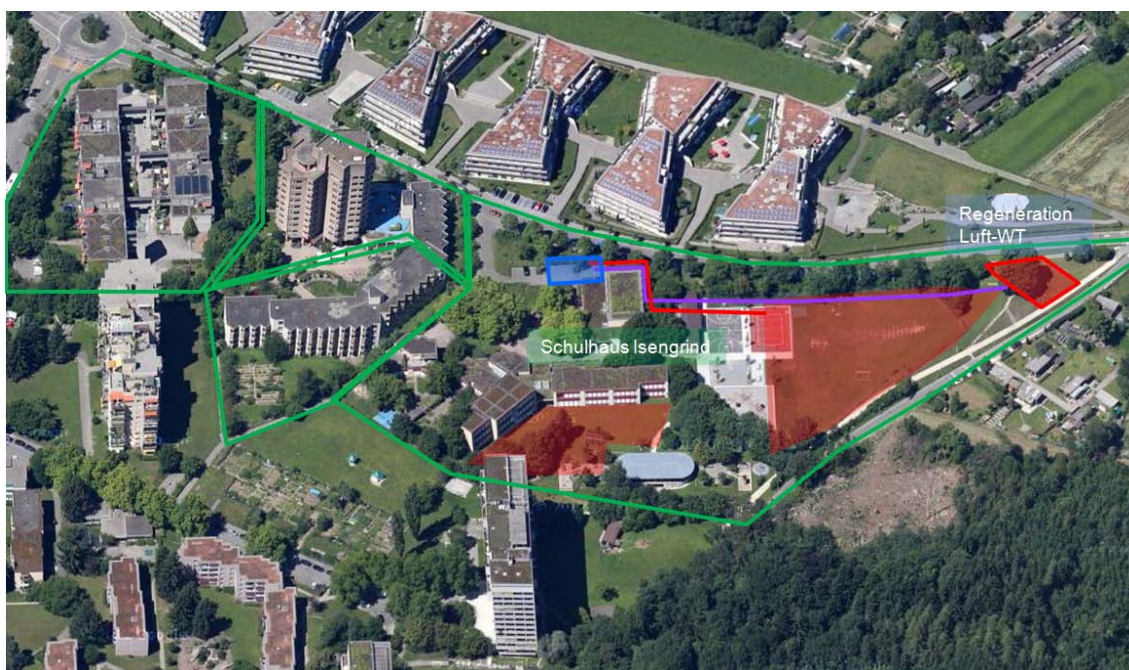
7.4 Pilotareal Isengrind/Wolfswinkel (Affoltern)

Ausgangslage

Der Perimeter des dritten Pilotareals (Figur 20) enthält das Schulhaus Isengrind, das Altersheim Wolfswinkel, die Alterssiedlung SAW Unteraffoltern sowie Gebäude der Liegenschaftenverwaltung der Stadt Zürich (Wohnsiedlung Unteraffoltern III). Der Zustand der bestehenden Wärmeerzeugung der Schulanlage und des Altersheims ist Anlass für eine Untersuchung der Machbarkeit einer Erdwärmesonden gebundenen Energieversorgungsanlage.

Gemäss Auskunft der Immobilien-Bewirtschaftung der Stadt Zürich wird eine Sanierung der Gebäudehüllen des Schulhauses und des Altersheims in Erwägung gezogen, wodurch günstigere Bedingungen für eine Wärmeerzeugung über Wärmepumpen entstehen.

Figur 20: Pilotareal Isengrind/Wolfswinkel (blau: Heizzentrale, grün: angeschlossene Wärmebezügler, rote Fläche: EWS-Felder).



Energiebedarf

Der Nutzenergiebedarf nimmt gemäss EK 2050 bis 2050 von heute 3.2 GWh/a um 40% auf 1.9 GWh/a bei einer gleichzeitigen Zunahme der EBF um nur 10% ab. Netto wird eine Verringerung des spezifischen Nutzenergiebedarfs von 109 auf 59 kWh/m²_{EBF} erwartet (Tabelle 7 und 8).

Tabelle 7: Nutzungsform "Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss GPM für Eff.Sz.Var.a.

Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
LV Unteraffoltern III	7'681	9'831	880'189	629'321	413	243
AH Wolfswinkel	11'210	11'210	1'227'158	632'914	570	229
SAW Unteraffoltern	6'275	6'781	686'924	375'244	319	134
SH Isengrind	157	157	16'851	7'714	8	3
Summe	25'323	27'978	2'811'122	1'645'194	1'311	608

Tabelle 8: Nutzungsform "Nicht-Wohnen": Energiebezugsfläche EBF und Nutzenergiebedarf NE gemäss Gebäudeparkmodell der Stadt Zürich (GPM) für Eff.Sz.Var.a.

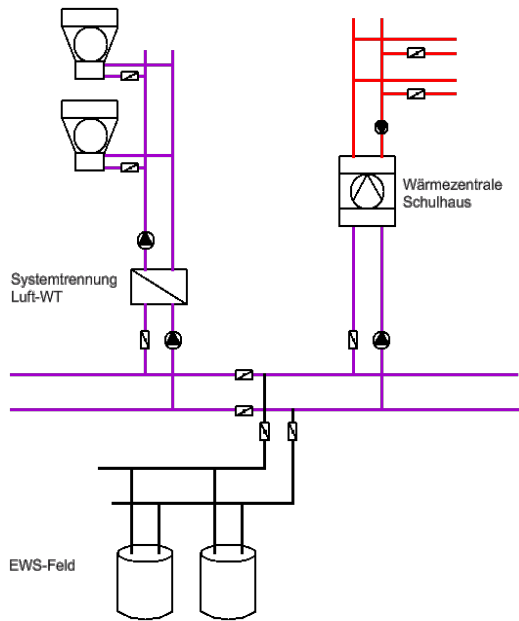
Block	EBF 2010 [m ²]	EBF 2050 [m ²]	NE 2010 [kWh/a]	NE 2050 [kWh/a]	Heizleistung 2010 [kW]	Heizleistung 2050 [kW]
LV Unteraffoltern III						
AH Wolfswinkel	1'065	1'065	114'675	74'972	62	39
SAW Unteraffoltern						
SH Isengrind	2'969	2'969	269'373	143'163	143	70
Summe	4'034	4'034	384'048	218'134	205	109

Konzept

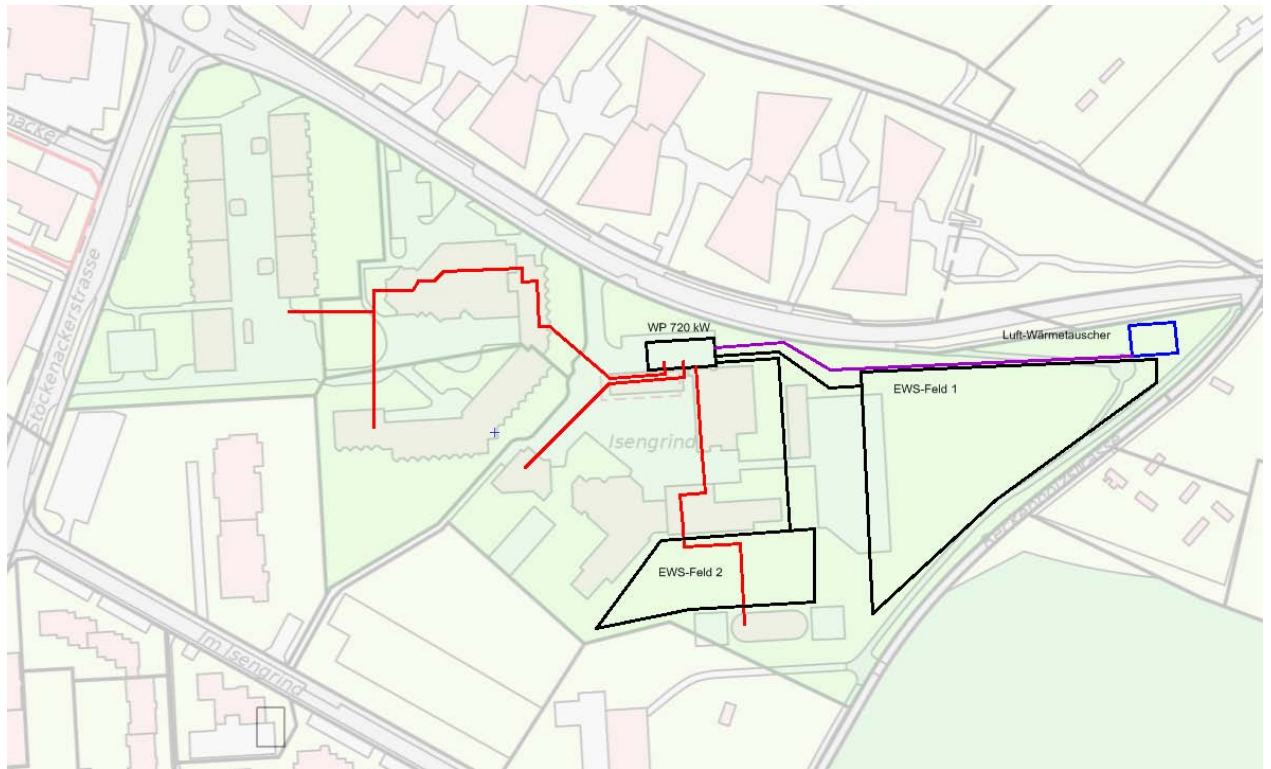
Das Konzept entspricht der Situation im Pilotareal OIZ, mit dem Unterschied, dass die Regeneration der EWS über Luft-Wärmetauscher erfolgt (Figur 21).

Das Areal ist dicht bebaut (Figur 22). Grössere zusammenhängende Flächen sind nur südlich und östlich des Schulhauses Isengrind vorhanden. Da keine nutzbaren Flächen für EWS-Felder unter neuen Gebäuden bzw. Ersatzneubauten entstehen, wird ein höherer spezifischer Wärmeentzug pro EWS angenommen, was ein Wasser/Ethylenglykol-Gemisch als Wärmeträger voraussetzt.

Figur 21: Konzept-Skizze. Das NT-Netz (violett, Wasser/Ethylenglykol als Wärmeträger) ist über einen Wärmetauscher mit der Regenerationsquelle und direkt mit der Heizzentrale verbunden. Das Areal wird über ein Nahwärmenetz (rot) versorgt.



Figur 22: Pilotareal Isengrind/Wolfswinkel (rot: Nahwärmeverbund, schwarz: EWS-Felder, blau: Standort Luft-WT).



Investitionen

Position	Ausmass
1	Niedertemperatur-Netz (Primär-Kreis)
1.1	110 EWS à 200 m
1.2	NT-Leitung, 2 x 100 m, DN 200
	1 Abgang zu EWS-Feldern
	1 Abgang zu Wärmezentrale
2	Zentrale Wärmeerzeugung
2.1	1 Wärmepumpen-Heizzentralen (total 720 kW), 4 UST
2.2	2 Luft-Wärmetauscher, total 800 kW Übertragungsleistung
3	Wärmeverteilung (Sekundär-Kreis)
3.1	1 Nahwärmeverbund
4	Verbraucheranschlüsse
4.1	4 Übergabestationen
4.2	4 Solarwärmeanlagen, total 640 m ² Kollektorfläche (inklusive)

Grundlagen Kostenschätzung

Kapitalzins	2.5%
Teuerung	1.5%
Betrachtungsdauer	30 a

Investitionskosten	Abschr.	Summe	
EWS-Speicher	50 a	1'540'000	CHF
NT-Leitung	50 a	370'000	CHF
Zentrale Wärmeerzeugung	20 a	2'810'000	CHF
Wärmeverteilung	50 a	215'000	CHF
Verbraucheranschluss	20 a	240'000	CHF
Unvorhergesehenes	20 a	190'000	CHF
Honorare/Nebenkosten	20 a	400'000	CHF
Total		5'765'000	CHF

Jahreskosten

Annuitätsfaktor	0.048
Kapitalkosten	215'000 CHF/a
Jahresenergiekosten	80'000 CHF/a
Jahreskosten Wartung/Instandsetzung/Inspektion	80'000 CHF/a
Jahreskosten Betriebsführung	50'000 CHF/a
Total Jahreskosten	425'000 CHF/a

Wärmegestehungspreis

Heutiger Wärmegestehungspreis	20.7 Rp./kWh
Langfristiger Wärmegestehungspreis	22.6 Rp./kWh

Fazit

Die im EWS-Feld gespeicherte Wärme kann über eine Wärmepumpenzentrale den angenommenen Nutzwärmebedarf von 1'870 GWh/a erbringen. Der Energiebedarf für die Wärmepumpe und Pumpen beträgt etwa 400 MWh/a. Das EWS-Feld wird über Luft-Wärmetauscher regeneriert, die am östlichen Rand des Areals installiert werden können. Die Luft-Wärmetauscher können in der Übergangszeit und im Sommerbetrieb auch als direkte Wärmequelle anstelle der Erdwärmesonden genutzt werden.

Wie im Pilotareal ABZ Entlisberg wird ein Teil des Nutzwärmebedarfs über Solarkollektoren auf den Dächern aller Objekte gedeckt. Der solare Nutzungsgrad wurde mit Hilfe von Potenzial-Indizes nach Nowak et al. (2007) auf Basis von Daten des Gebäudeparkmodells (GPM) grob geschätzt. Ob die anhand dieser Indizes berechneten Solarerträge erreicht werden, hängt von den Sanierungsmassnahmen und der konkreten Situation ab.

Die Wärmepumpen-Heizzentrale kann beim Schulhaus Isengrind untergebracht werden. Die vier Objekte haben vermutlich unterschiedliche Bedarfsprofile, daher könnte bei einzelnen Objekten eine dezentrale BWW-Erwärmung energetisch vorteilhaft sein.

8 Diskussion

8.1 Fazit zu den Pilotarealen

Im Pilotareal OIZ wurde das EWS-Feld auf einem Sportgelände installiert. Die über den EWS-Speicher bezogene Wärme stammt vollständig aus saisonaler Regeneration mit Abwärme des Rechenzentrums OIZ, die im Sommer sonst für keine anderen Zwecke verwendet werden kann und daher an die Aussenluft abgeführt würde. Der langfristige Wärmegestehungspreis von 23 Rp./kWh muss im Zusammenhang mit der saisonalen Speicherung hochwertiger Abwärme mit einem Primärenergiefaktor mit hohem nicht-erneuerbaren Anteil gesehen werden.

Im Pilotareal ABZ Entlisberg sind im Hinblick auf die geplanten Ersatzbaumassnahmen alle Optionen für EWS-Standorte unter oder neben Gebäuden offen. In dieser Studie wurde die Anzahl von EWS pro Etappe so gewählt, dass sowohl die eine als auch die andere Variante grundsätzlich möglich ist, und mindestens der lokale Wärmebedarf über das EWS-Feld bezogen werden kann. Hierdurch entfallen die zusätzlichen Kosten für die Berücksichtigung der Etappierung nur auf die Installation der NT-Leitung zwischen dem Standort des Luft-WT und des Abgangs zum Areal Entlisberg II/III. Die Wärmeversorgung erfolgt nach Umbau des gesamten Areals über vier EWS-Felder, bestehend aus jeweils 60 - 100 EWS, die je nach Situation auf mehrere kleinere Einheiten aufgeteilt werden können bzw. müssen. Falls auf dem ersten umgebauten Areal mehr EWS installiert werden können, als für den eigenen Bedarf erforderlich ist, können auch externe Bezüger, deren Objekte noch nicht saniert wurden, versorgt werden.

Die Wärmeversorgung im Pilotareal Isengrind/Wolfswinkel erfolgt über zwei EWS-Felder auf den einzigen grösseren freien Flächen südlich und östlich des Schulhauses Isengrind. Das dort umgesetzte Konzept entspricht aus hydraulischer Sicht einer technisch konventionellen EWS-Anlage. Die Regenerationsquelle und EWS-Speicher werden einzeln zur Wärmezentrale geführt und von dort aus gesteuert.

Aus dem hier angewendeten Detaillierungsgrad folgen gewisse Ungenauigkeiten, was die Kostenschätzung von Bauwerken, insbesondere die Verlegung von Leitungen mit grossen Querschnitten und Wärmenetze über Flächen des öffentlichen Raums betreffen. Im konkreten Fall ist also mit abweichenden Kosten zu rechnen, bei günstigen baulichen Situationen auch mit einem hohen Einsparpotenzial.

Die geringe Gleichzeitigkeit zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot von Luft und Sonne verursacht bei diesen monovalenten Konzepten hohe Investitionskosten, da die EWS-Speicher den gesamten Wärmebezug im Winter bereitstellen müssen. Es wird ein bedeutendes Einsparpotenzial bei bivalenter Wärmeerzeugung (z.B. 10% - 20% Spitzenlastdeckung) vermutet.

Die spezifische Entzugsleistung der EWS-Speicher wurde für konservative Bodenkennwerte nach SIA 384/6 geschätzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit des Bodens und damit der spezifische Wärmeentzug bis zu 10% höher ist. Ergebnisse einer geothermischen Vorerkundung über Test-EWS können das Optimierungspotenzial aufzeigen.

Für die Auslegung der EWS-Speicher wurde ein Verhältnis von Raumwärmebedarf zu Brauchwarmwasserbedarf von 4 zu 1 angenommen. Dadurch muss der Speicher etwa 44% des jährlich anfallenden Wärmebedarfs von Dezember bis Februar bereitstellen. Dieses Belastungsszenario wurde bewusst so gewählt, um konservative Kennzahlen für Anwendung auf unterschiedliche Szenarien zu erhalten. Andere Szenarien mit einem relativ höheren BWW-Bedarf verbessern die Gleichzeitigkeit zwischen Regenerationsangebot und Wärmebedarf und bieten je nach Situation ein bedeutendes Optimierungspotenzial.

8.2 Fazit betreffend geothermisches Potenzial

Ohne aktive Regeneration ist das über Erdwärmesonden nachhaltig nutzbare geothermische Potenzial gering. Eine Abschätzung mit Hilfe statischer Methoden ergibt einen unteren Grenzwert

von etwa 3 kWh/a pro Quadratmeter Grundstücksfläche (0.03 GWh pro Jahr und Hektar). Im Vergleich dazu beträgt die Wärmenachfragedichte 20 - 110 kWh/a pro Quadratmeter Grundstücksfläche im Jahr 2050 (EK 2050). Eine nachhaltige Wärmeversorgung ist in dieser Grössenordnung nur dort möglich, wo die Erdwärmesonden thermisch regeneriert werden, will heissen, wo die Energiemenge, um diese Nachfrage zu decken, in Form von "Regenerationsenergie" zur Verfügung gestellt werden kann. In den untersuchten Pilotarealen sind die Voraussetzungen dafür gemäss den Resultaten der Pilotstudie im Jahr 2050 anzutreffen - mit Ausnahme des dicht bebauten Gebiets A3 mit einer Nachfragedichte > 100 kWh/m²/a.

Der Fokus in der vorliegenden Studie wurde daher auf Erdwärmesonden in EWS-Feldern gerichtet, die über erneuerbare Wärmequellen (z.B. Sonne oder Luft) aktiv regeneriert, d.h. saisonal bewirtschaftet, werden. Hierdurch ist eine nachhaltige Wärmeversorgung technisch sichergestellt. In Tabelle 9 sind Parameter aufgelistet, welche die charakteristischen Unterschiede in den Pilotarealen aufzeigen.

Tabelle 9: Vergleichende Übersicht der Pilotareale.

Areal	OIZ	ABZ Entlisberg	Isengrind/Wolfswinkel
EBF ₂₀₅₀ / AF	0.93	0.81	0.74
NE ₂₀₅₀ / AF [kWh/m ²]	62	45	42
HL / AF [W/m ²]	25	19	19
SE / AF [kWh _{Solar} /m ²]	0	11	7
Langfristige Wärmegestehungskosten [Rp./kWh]	23.4	26.1	22.6
Anteil Investitionskosten EWS+NT-Netz	61%	49%	50%
Vermutetes Einsparpotenzial EWS+NT-Netz bei bivalent paralleler Wärmeversorgung	nicht vorgesehen*)	hoch	hoch

EBF: Energiebezugsfläche; AF: Arealfläche; NE: Nutzenergie (Raumheizung + BWW); HL: Heizleistung; SE: Solarertrag (intern)

*) Einsparpotenzial ginge zulasten der OIZ-Abwärme-Ausnutzung

Das Verhältnis aus Energiebezugsfläche zur Arealfläche liegt in den untersuchten Arealen zwischen 0.74 bis 0.93, die Wärmenachfragedichte zwischen 42 und 62 kWh pro m² Arealfläche (entspricht 420 bis 620 MWh/ha/a). Die mittlere Nachfragedichte aller Angebotszonen - in denen EWS-Bohrungen zulässig sind - liegt gemäss Effizienz-Szenario a) für das Jahr 2050 (Bébié und Jakob, 2012) zwischen 20 und 80 kWh pro m² Arealfläche, mit der Ausnahme von 110 kWh/m² in der Angebotszone A3 (siehe Figur 1).

Das in den Pilotarealen über EWS-Felder erschlossene Speicherpotenzial des Bodens liegt bei den hier zugrunde liegenden Lastszenarien (mit Ausnahme der Angebotszone A3) etwa im Bereich der Wärmenachfragedichte. Das bedeutet, dass Erdwärmesonden ein bedeutendes Potenzial für eine nachhaltige Wärmeversorgung besitzen, sofern das Erdreich aktiv regeneriert wird.

8.3 Wirtschaftlichkeit

Die ausschliessliche Nutzung von Erdwärmesonden als Wärmequelle im Winter ist mit hohen Investitionskosten verbunden und verursacht in den untersuchten Arealen langfristige Wärmegestehungspreise von etwa 23 bis 26 Rp./kWh. Diese Wärmegestehungspreise beziehen sich auf die untersuchten Areale und den angenommenen Randbedingungen pro Areal und sind nicht als "Technologiepreise" zu verstehen.

Der Anteil der erdgebundenen Leitungen (Erdwärmesonden, horizontale Zuleitungen, NT-Netze) beträgt in den untersuchten Arealen annähernd die Hälfte der gesamten Investitionen. Bivalente Konzepte, bei denen der Wärmebedarf im Winter nicht alleine über EWS gedeckt wird, lassen hinsichtlich der Einsparung von Investitionskosten ein signifikantes Potenzial erhoffen.

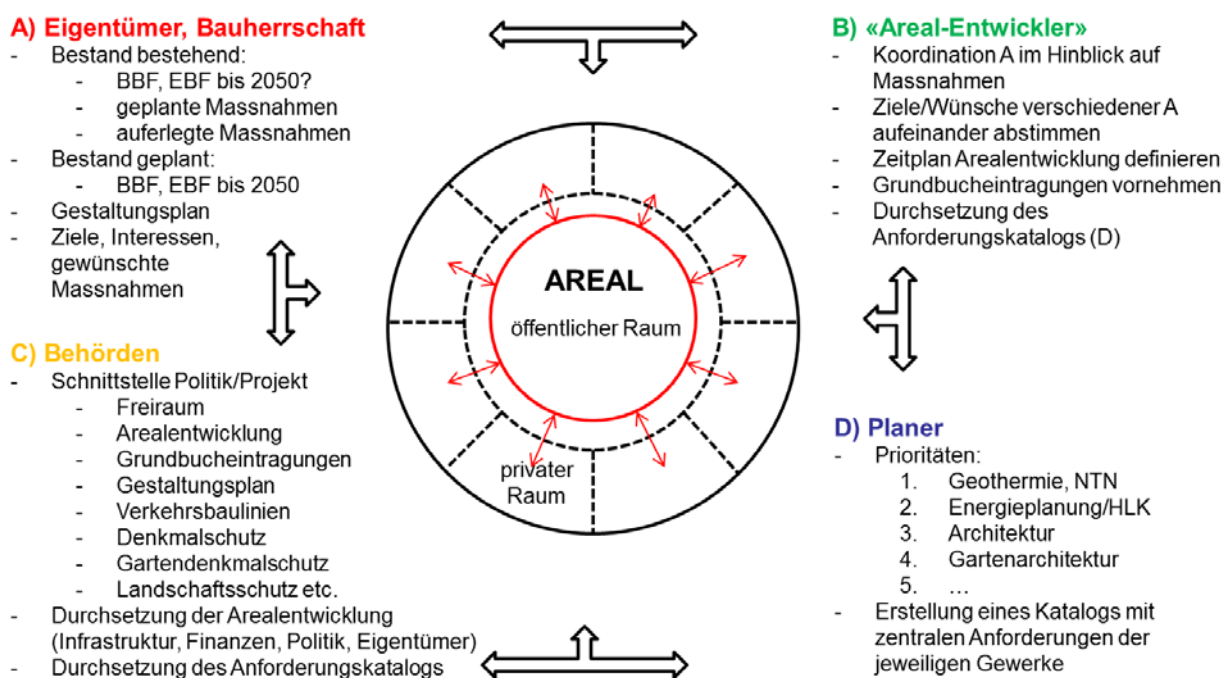
Die Möglichkeit, Kühlenergie aktiv oder direkt über den EWS-Speicher zu beziehen, wurde nicht explizit untersucht, da der Bedarf an Kühlenergie in den untersuchten Arealen anhand der verfügbaren Daten als gering eingeschätzt wurde.

8.4 Transformationspfad

Geht man davon aus, dass in nächster Zukunft (10-20 Jahre) keine vergleichbaren technischen Lösungen zur saisonalen Speicherung von Wärme vorhanden sind, stellen sich im Hinblick auf die Realisierung EWS-gebundener Netze im urbanen Gebiet u.a. folgende Fragen:

- Muss die heutige Auslegungspraxis (Auslegung auf Wärmeentzug über 50 Jahre, SIA 384/6) und die kantonal unterschiedlichen Bewilligungsverfahren diskutiert werden? Ab welcher Bebauungsdichte besteht Handlungsbedarf betreffend einer koordinierten Regeneration von EWS?
- Welches Potenzial besitzen Niedertemperatur-Netze im Verbund mit anderen Wärme- und Kältequellen? Wie können einzelne, unabhängige NT-Netze miteinander verbunden werden?
- Die Realisierung von NT-Netzen ist mit organisatorischen Herausforderungen verbunden. Wer übernimmt die Rolle der Koordination?

Die folgende Skizze zeigt die bei der Realisierung Areal übergreifender NT-Netze zu erwartenden Herausforderungen und stellt die verschiedenen Akteure mit ihren Betroffenheiten dar.



Die Realisierung erfordert eine langfristige Planung, wobei unterschiedlichste Bedürfnisse privater und öffentlicher Beteiligter berücksichtigt werden müssen. Bei heterogener Eigentümerstruktur ist ein langer Planungsvorlauf zu erwarten, um die Bedürfnisse einer Vielzahl von privaten Eigentümerschaften zu ermitteln und rechtliche Fragen bei der gemeinsamen Nutzung des öffentlichen und privaten Raums abzuklären. Die langfristige Aufgleisung des Planungsablaufes und die Umsetzung der übergeordneten energiepolitischen Ziele könnten durch einen übergeordneten, städtischen Mittler (Areal-Entwickler) erfolgen.

9 Anhang

9.1 Simulationsergebnisse

Nutzwärmebedarf

Als Grundlage zur Berechnung des Speicherpotenzials von EWS-Feldern dient der Nutzwärmebedarf von vier dreistöckigen Mehrfamilienhäusern mit jeweils 2'700 m² EBF. Der Heizwärme- und Leistungsbedarf beträgt jeweils 217'700 kWh/a bzw. 108 kW. Der Wärmebedarf für BWW beträgt inkl. Bereitstellungsverluste 56'500 kWh/a.

Das Bedarfsprofil wurde durch das Programm POLYSUN berechnet. Die Bausubstanz entspricht einem sanierten MFH nach Minergie-Standard bei Südausrichtung. Als Wärmeerzeuger besitzt jedes Objekt eine Wärmepumpe mit folgenden Betriebspunkten (Heizleistung in kW und COP):

- B0W35: 118 (5.13)
- B5W35: 132 (5.73)
- B0W55: 105 (3.09)
- B5W55: 120 (3.47)

Jedes Objekt besitzt einen Wärmespeicher mit 2000 l Inhalt.

Der Nutzenergie- und Leistungsbedarf beträgt pro Objekt 1'097'000 kWh/a bzw. 432 kW. Zwischen Wärmepumpe und EWS-Feld wird eine Systemtrennung mit einer Übertragungsleistung von 300 kW/K angenommen.

Für die thermischen Eigenschaften des Bodens wurde eine für die Stadt typische Geologie angenommen:

- 0 - 40 m : Moräne (Wärmeleitfähigkeit 1.6 W/m/K)
- > 40 m: OSM (Obere Süsswassermolasse, Wärmeleitfähigkeit 2.3 W/m/K)
- Temperaturgradient 0.03 K/m

Für alle Erdwärmesonden wird eine "thermisch verbesserte" Hinterfüllung (2 W/m/K) angenommen.

Regeneration über ICT-Abwärme (Pilotareal OIZ)

Die Regeneration erfolgt im Modell über eine Wärmequelle mit einer Vorlauftemperatur von 21°C. Die Abwärme steht von April bis einschliesslich September (24/7) zur Verfügung. Da im Modell die Vorlauftemperatur und der Durchsatz fest vorgegeben sind, stellt sich die effektive Regenerationsleistung je nach EWS-Temperatur ein. Im vorliegenden Modell beträgt die mittlere Regenerationsleistung 200 kW, wobei zu Beginn der Regeneration wegen der tieferen EWS-Temperaturen kurzzeitig höhere Leistungen möglich sind.

Zwischen Wärmequelle und EWS-Feld wird eine Systemtrennung mit einer Wärmeübertragung von 100 kW/K angenommen.

Speicher 1 ("lange Sonden")

- 5 x 10 EWS à 250 m, 10 m Abstand (total: 12'500 m)
- Wärmeentzug im 1., 10. und 50. Jahr: 875, 876, 874 MWh/a
- Wärmeeintrag im 1., 10. und 50. Jahr: 690, 753, 825 MWh/a
- tiefste EWS-Eintrittstemperatur nach 50 Jahren: -0.7°C, JAZ 4.9, 70 kWh/a/m_{EWS}
- "langsames" Einschwingen des Speichers

Speicher 2 ("kurze Sonden")

- 10 x 10 EWS à 150 m, 7 m Abstand (total 15'000 m)
- Wärmeentzug im 1., 10. und 50. Jahr: 874, 874 u. 873 MWh/a
- Wärmeeintrag im 1., 10. und 50. Jahr: 876, 858 u. 860 MWh/a
- tiefste EWS-Eintrittstemperatur nach 50 Jahren: -0.7°C , JAZ 4.9, 58 kWh/a/m_{EWS}
- "schnelles" Einschwingen des Speichers, mehr EWS-Meter (+20%)

Unter den getroffenen Annahmen liefert der Speicher mit 250 m tiefen EWS einen effektiven spezifischen Wärmeentzug von 70 kWh/a pro Sondenmeter. Die tiefsten EWS-Eintrittstemperaturen liegen bei etwa -1°C , bei Auslegung auf -3°C kann ein etwa 10% grösserer Wärmeentzug erwartet werden.

Für Betrieb mit Wasser wird für 250 m tiefe EWS ein 10% geringerer Wärmeentzug angenommen, d.h. 63 kWh/a/m_{EWS}. Diese Temperaturen können nur dann erreicht werden, wenn der Verdampfer der Wärmepumpen über einen mit Frostschutz gefüllten Zwischenkreis besitzt.

Sensitivitäten

Eine Anhebung der Speichertemperatur gelingt nur durch Regeneration mit höherer Abwärmtemperatur, z.B. bei konstant 27/33°C statt 16/21°C: tiefste EWS-Eintrittstemperaturen im Winter $>+6^{\circ}\text{C}$ (sicherer Betrieb mit Wasser im Primär- und Sekundärnetz).

Für Speicher 1:

Regenerationstemperatur, Wärmeeintrag, JAZ und tiefste EWS-Eintrittstemperatur nach 50 Jahren:

- | | | | |
|-----------|-------------|-----------|------------------------|
| - 16/21°C | 825 MWh/a | JAZ = 5.0 | -0.7°C |
| - 22/27°C | 981 MWh/a | JAZ = 5.2 | 2.9°C |
| - 27/33°C | 1'135 MWh/a | JAZ = 5.5 | 6.5°C |

Fazit: Der EWS-Speicher kann mit Abwärme aus dem OIZ ($16/21^{\circ}\text{C}$) ungefähr so weit regeneriert werden, dass sich ein stationärer Zustand einstellt. Bei 250 m tiefen EWS in einem Abstand von 10 m wird bei Betrieb mit Wasser als Wärmeträger in den EWS und mit Wasser/Frostschutzgemisch im Verdampferkreis der Wärmepumpe ein spezifischer Wärmeentzug von 63 kWh/a/m_{EWS} angenommen.

Regeneration über Luft-Wärmetauscher

Als Wärmequelle zur Regeneration der EWS wird ein Luft-WT (Rückkühler) mit Nenn-Kühlleistung von 561 kW nach EN 1048 bei $U=450\text{ min}^{-1}$ eingesetzt.

Speicher 1 im 50. Betriebsjahr:

- Eintrag: 763 MWh/a
- Bezug: 867 MWh/a
- tiefste EWS-Eintrittstemperatur: -2.1°C , JAZ = 4.8

Speicher 2 im 50. Betriebsjahr:

- Eintrag: 806 MWh/a
- Bezug: 866 MWh/a
- tiefste EWS-Eintrittstemperatur: -2.1°C , JAZ = 4.8

Fazit: Der Wärmeeintrag über Luft-Wärmetauscher kann den Wärmeentzug nicht vollständig ausgleichen. Im Modell beträgt der Anteil BWW-Bedarf zu Raumwärme etwa 1 zu 4. Es ist davon auszugehen, dass in den Pilotarealen nach Sanierung der Objekte sich das Verhältnis mehr hin

zum BWW-Bedarf verschiebt, wodurch sich grösseres Potenzial für die direkte Nutzung der Luft-WT-Wärme ergibt.

Es werden daher für den spezifischen Wärmeentzug die gleichen Grössen wie bei Regeneration über die OIZ-Abwärme angenommen.

9.2 Literatur

[Bassetti et al., 2006] Bassetti, S., Rohner, E., Signorelli S., und Matthey, B.: *Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden*, Schlussbericht, im Auftrag von EnergieSchweiz, 2006

[Bébié und Jakob, 2012] Bébié, B., und Jakob, M.: *Wärmeversorgung: Potenzial der Quartiere*, TEC 21, 12/2012

[energeia, 2012] energeia: *Wärme und Kälte aus der untiefen Erde*, energeia Nr. 3/2012, Newsletter des Bundesamtes für Energie BFE, Bern, 2012

[Ehrbar und Hubacher, 2006] Ehrbar, M., und Hubacher, P.: *Grosswärmepumpen - Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen. Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte*, Schlussbericht, Projektnummer 100'237, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 2006.

[Eskilson, 1987] Eskilson, P.: *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987

[Frischknecht et al., 2012] Frischknecht, R., Stucki, M., Flury, K., Itten, R., und Tuchschnid, M.: *Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 2.2, Juli 2012*, ESU-services Ltd, Uster, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2012

[Forrer et al., 2008] Forrer, S., Mégel, T., Rohner, R., und Wagner, R.: *Mehr Sicherheit bei der Planung von Erdwärmesonden*, Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau bbr, Ausgabe 05/2008

[Hubacher et al., 2010] Hubacher, P., Bernal C., und Ehrbar, M.: *Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2*, Schlussbericht, Projektnummer 100'917, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 2010

[Huber und Pahud, 1999a] Huber, A., und Pahud, D.: *Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder*, Schlussbericht, Projektnummer 19'227, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 1999

[Huber und Pahud, 1999b] Huber, A., und Pahud, D.: *Untiefe Geothermie. Woher kommt die Energie?*, Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Programm Geothermie, Bern, 1999

[Huber, 2011a] Huber, A.: *Benutzerhandbuch zum Programm EWS, Version 4.7*, Huber Energietechnik AG, 2011

[Huber, 2011b] Huber, A.: *Speicherung von Wärme in Erdwärmesonden*, Vortrag, 22. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG, 4. November 2011, Solothurn

[Huber, 2012] Huber, A.: *Speicherung von Wärme in Erdwärmesonden, Möglichkeiten und Grenzen*, Ostschweizer Energiepraxis, April 2012

[Jakob et al., 2012] Jakob, M., Flury, K., und Gross, N.: *Energiekonzept 2050 für die Stadt Zürich - Auf dem Weg zu einer 2000-Watt-tauglichen Wärmeversorgung*, Bericht vom 27. Juni 2012, im Auftrag des Departements der Industriellen Betriebe und des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2012 (unveröffentlicht)

[Kohl et al., 2007] Kohl, T., Rybach, L., Baujard, C., Wagner, R., und Signorelli, S.: *Geothermische Energie im Kanton Zürich - Grundlagen und Potenzial*, im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Zürich, 2007

[Leu et al., 2006] Leu, W., Mégel, T., und Schärli, U.: *Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m), Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität, Überarbeitung 2006*, Schlussbericht,

Projektnummer 101'296, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Programm Geothermie, Bern, 2006

[Marti et al., 2009] Marti, J., Witzig, A., Huber, A., und Ochs, M.: *Simulation von Wärmepumpen-Systemen in Polysun 4*, Schlussbericht, Projektnummer 102'248, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 2009

[Nowak et al., 2007] Nowak, S., Gutschner, M., und Gnos, S.: *Potenzialabschätzung für Sonnenkollektoren in der Stadt Zürich*, NETNowak Energie & Technologie, im Auftrag der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich ewz, 2007

[Poppei et al., 2008] Poppei, J., Schwarz, R., Péron, H., Silvani, C., Steinmann, G., Laloui, L., Wagner, R., Lochbühler, T., und Rohner, R.: *Innovative Improvements of Thermal Response Tests*, Schlussbericht, Projektnummer 101'690, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 2008

[Rohner et al., 2012] Rohner, E., Mégel, T., und Wagner, R.: *Geothermie für Grossanlagen*, Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau bbr, Sonderheft Geothermie, 2012

[Schärli et al., 2007] Schärli, U., Rohner, E., Signorelli, S., und Wagner, R.: *Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. "kabellose Temperatursonde") mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone*, Schlussbericht, Projektnummer 101'289, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern, 2007

9.3 Normen und Richtlinien

BAFU: Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, *Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung*, Reihe Umwelt-Vollzug, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2009

SIA 384/6: *Erdwärmesonden*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.), Zürich, 2010

VDI: *Thermische Nutzung des Untergrundes*, Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, VDI-Handbuch Energietechnik, Beuth Verlag, Berlin, 2001

Begriffe und Abkürzungen

Im vorliegenden Bericht wird nur oberflächennahe Geothermie untersucht. Alle Begriffe und Definitionen beziehen sich auf die Anwendung von Erdwärmesonden und andere Anlagen zur Nutzung der im Boden gespeicherten Wärme.

AF	Arealfläche (Perimeter der Objekte im Wärmeversorgungsgebiet)
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
NE	Nutzenergiebedarf
NT	hier: Niedertemperaturwärme (Erdwärme), die für Heizzwecke nicht direkt genutzt werden kann
NT-Netz	Niedertemperatur-Netz mit dezentraler Wärmeerzeugung, in dem der EWS-Wärmeträger über ein ganzes Areal transportiert wird („kalte Fernwärme“)
Bedarfsprofil	(Sekundärseitiger) Heiz- und Kältebedarf eines Objektes in Funktion der Zeit (monatlich oder stündlich)
Belastungsprofil	(Primärseitige) Heiz- und Kühlbelastung der EWS in Funktion der Zeit (monatlich oder stündlich)
Bodenoberflächentemperatur	Temperatur an der Erdoberfläche (Jahresmittelwert)
Bodentemperatur	hier: mittlere Temperatur des Bodens entlang der gesamten EWS-Länge
Bodentemperatur (ungestört)	hier: Bodentemperatur vor der Inbetriebnahme der EWS
BWW	Brauchwarmwasser (Nutzenergiebedarf für Brauchwarmwasser-Erwärmung)
Direktkühlung	Kühlung durch direkte Abgabe der Gebäudewärme über einen Wärmeträger in die EWS
EBF	Energiebezugsfläche
Entzugsleistung	(Primärseitige) Heizbelastung der EWS
EK 2050	Konzept Energieversorgung 2050 der Stadt Zürich
Erdwärme	Im Gestein gespeicherte thermische Energie (Geothermie)
Es	„Eskilson-Zahl“, dimensionslose Zeitkonstante von g-Funktionen
eTRT	erweiterter thermischer Response Test, Messverfahren zur Bestimmung von thermischen Gesteinseigenschaften an Erdwärmesonden
EWS	Erdwärmesonde, bestehend aus Erdwärmesonden-Rohren, Erdwärmesondenfuss, Injektionsrohr, Wärmeträger und Bohrloch-Hinterfüllung
EWS-Anlage	Anlage zur Wärme- und Kälte-Erzeugung über EWS, bestehend aus dem gesamten Sole-Kreis einschliesslich Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen
EWS-Austritt	EWS-Rücklauf
EWS-Eintritt	EWS-Vorlauf

EWS-Feld	EWS-Anlage mit mehreren gleichzeitig genutzten EWS
EWS-Kreis	Primärkreis, bestehend aus EWS und allen Verbindungsleitungen bis zum Verdampfer-Eintritt der Wärmepumpe
EWS-Radius	Abstand des Bohrloch-Randes von der EWS-Achse (entspricht dem Bohrloch-Radius)
EWS-Rohre	Wärmetauscher-Rohre in Erdwärmesonden (Polyethylen PE 100 PN 16 SDR 11). In der Schweiz werden meist zwei parallele Kreisläufe installiert ("Doppel-U", Duplex)
EWS-Temperatur	Über Vor- und Rücklauf der EWS gemittelte Temperatur des Wärmeträgers (Sole oder Wasser)
EWS-Verteiler	Zusammenführung aller parallel geführten EWS-Zuleitung
EWS-Zuleitung	Horizontal im Boden verlegte Leitung zum Anschluss der EWS an die Wärmepumpe oder an einen EWS-Verteiler
Geocooling	siehe Direktkühlung
Geothermische Energie	Erdwärme
Geothermisches Potenzial	Im Boden gespeicherte und nutzbare Wärme für die Erzeugung von Heizwärme über Wärmepumpen (nutzbare Erdwärme)
g-Funktion	Funktion zur Berechnung der Temperaturänderung von Erdwärmesonden im Erdreich
HL	Heizleistung
Kälteleistung	1. Verdampferleistung der Wärmepumpe, entspricht der Entzugsleistung der EWS 2. Leistung, die für Gebäudekühlung notwendig ist
Natürliche Regeneration	Vollständige oder teilweise Wiederherstellung der ursprünglichen Bodentemperatur über den natürlichen Wärmestrom aus dem Erdinnern und durch solare Einstrahlung über die Erdoberfläche
NE	Nutzenergie, Nutzenergiebedarf
Primär-Kreis	EWS-Kreislauf (Kreislauf Energiequelle)
Regeneration	Vollständige oder teilweise Wiederherstellung der ursprünglichen Bodentemperatur durch Eintrag von Wärme in den Boden über EWS
RH	Raumwärme (Nutzenergiebedarf für Raumwärme)
Saisonal Speicher	Wärmespeicher, der momentan nicht genutzte Wärme (z.B. Abwärme im Sommer) für spätere Nutzung (z.B. Heizwärme im Winter) zwischenspeichert
Sekundär-Kreis	Kreislauf Energiebezüger
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Sole	Wärmeträger in EWS; meist Wasser-Frostschutz-Gemisch
Sole-Kreis	EWS-Kreis
Spezifische Entzugsleistung	Entzugsleistung einer EWS, dividiert durch die EWS-Länge

Temperatur-Gradient	Änderung der Temperatur mit der Tiefe
TRT	Thermischer Response Test, Messverfahren zur Bestimmung von thermischen Gesteinseigenschaften an Erdwärmesonden
UBP	Umweltbelastungspunkt
Wärmeentzugsdichte	Genutzte Erdwärme, dividiert durch die Fläche des EWS-Feldes
Wärmeträger	Medium, welches im EWS-Kreislauf (Primärkreislauf) Wärme transportiert (Wasser oder Wasser-Frostschutz-Gemisch)
WP	Wärmepumpe