

RegenOpt

Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher
Beeinflussung von Erdwärmesonden:
energetische und ökonomische Analysen

Schlussbericht

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

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

Bearbeitung:

Patrick Persdorf
Florian Ruesch
Dr. Michel Y. Haller
Institut für Solartechnik SPF
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
michel.haller@spf.ch

Projektleitung:

Dr. Roland Wagner (AHB)
Nicole Külling (AHB)
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik
Amt für Hochbauten

Projektteam:

Franz Sprecher (AHB)
Michael Kriegers (Meierhans + Partner AG, Zürich)
Ernst Rohner (Geowatt AG, Zürich)

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

Zürich, Mai 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Beurteilung der Ergebnisse aus Sicht des Auftraggebers	4
2	Zusammenfassung	6
3	Einleitung	7
4	Methode zum Vergleich der Regenerationsstrategien	8
4.1	Nutzungsdichte	8
4.2	Berücksichtigung von Langzeit-Effekten	9
4.3	Beeinflussung durch Nachbarn	9
4.4	Zusammenhang zwischen Regenerationsgrad und nachhaltiger EWS-Nutzung	10
5	Definition von Kennzahlen	11
6	Definition des Wärmebedarfs und der Varianten zur Regeneration	12
6.1	Wärmebedarf und Aufbau der Basisvariante (Variante ohne Regeneration)	12
6.2	Regeneration über Luft-Wärmetauscher	12
6.3	Regeneration über Geocooling	14
6.4	Regeneration über Solarwärme	15
7	Simulationsergebnisse für 50 Jahre Betrieb	18
7.1	Erforderliche EWS-Längen	18
7.2	Regenerationsgrade und Energiebilanzen	20
7.3	Kosten der verschiedenen Varianten	23
7.4	Verhalten des EWS-Feldes über 50 Jahre hinaus	26
8	Technisches Fazit	28
9	Literatur	30
9.1	Literaturverzeichnis	30
10	Anhang A: Nachbar-g-Funktion	31
11	Anhang B: Auslegung der simulierten Komponenten	33

1 Beurteilung der Ergebnisse aus Sicht des Auftraggebers

*Roland Wagner, Nicole Külling, Franz Sprecher
Amt für Hochbauten, Stadt Zürich*

Im Jahr 2050 sollen in der Stadt Zürich gemäss Effizienzscenario A des Energiekonzeptes der Stadt Zürich 2050 (EK 2050, Jakob et al., 2014) etwa 44% der gesamten Wärmenutzenergie über Wärmepumpen bereitgestellt werden – und davon etwa 38% bzw. 450 GWh a⁻¹ mit Erdsonden als Wärmequelle (Schmid, 2014). Im Vergleich mit der heutigen Erdwärmenutzung (etwa 44 GWh a⁻¹ Wärmeentzug im Jahr 2013, Meister, 2014), entspricht dies annähernd einer Verzehnfachung des Wärmeentzugs aus dem Boden.

Ob diese intensive Erdwärmenutzung nachhaltig ist, wurde im Rahmen der Studie „Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich“ (Wagner und Weisskopf, 2014) untersucht. Gemäss Ergebnissen dieser Arbeit ist eine Erdwärmenutzung nachhaltig, falls der Wärmeentzug an Orten mit hoher Erdwärmesonden-Dichte (EWS-Dichte) durch aktive Regeneration, d.h. Wärmeeintrag in den Boden, ganz oder teilweise ausgeglichen wird.

Aktive Regeneration ist für den Betrieb grosser EWS-Felder, wo die gegenseitige Beeinflussung aufgrund der kurzen EWS-Abstände sehr stark ist, bereits Stand der Technik (z.B. The Dolder Grand, ETH Science City, Familienheimgenossenschaft Zürich FGZ, u.a.). Dagegen geben nur 10% der Anlagen mit 1 - 4 EWS, welche in der Stadt Zürich im Jahr 2013 mit 79% den grössten Anteil aller Anlagen darstellen (Meister, 2014), einen Teil der entzogenen Wärme wieder in den Boden zurück.

In Ziffer 2.3.3.2 der SIA 384/6 steht, dass bei „einer örtlichen Häufung von verschiedenen Projekten [...] die gegenseitige Beeinflussung einzurechnen oder durch geeignete Massnahmen (saisonale Nachladung) zu eliminieren“ ist (z.B. auch KBOB-Empfehlung Gebäudetechnik 2014). Die SIA 384/6 stellt jedoch lediglich für Kleinobjekte mit bis zu 4 EWS pro Anlage detaillierte Planungshilfen zur Verfügung, mit denen die gegenseitige Beeinflussung der projekteigenen EWS untereinander berücksichtigt werden kann.¹

Im vorliegenden Bericht wird gezeigt, wie sich aktiv regenerierte und nicht aktiv regenerierte EWS-Anlagen in einem Szenario mit hoher EWS-Dichte verhalten. Die Studie liefert viele wertvolle Resultate. Aus Sicht der Stadt Zürich sind untenstehende Erkenntnisse besonders wichtig:

- Wird die gegenseitige Beeinflussung in einem Gebiet mit hoher EWS-Nutzungsichte durch aktive Regeneration vorschriftsmässig nach heutigem Stand der Technik (SIA 384/6 Z.2.3.3.2) kompensiert, erhöhen sich die Wärmegestehungskosten unter den getroffenen Annahmen je nach Regenerationstechnologie um etwa 10-20% gegenüber einer Anlage, die ohne Berücksichtigung einer nachbarschaftlichen Beeinflussung dimensioniert wurde.
- Die Kompensation der gegenseitigen Beeinflussung durch zusätzliche oder längere EWS verursacht höhere zusätzliche Investitionskosten als Massnahmen zur aktiven Regeneration. Ausserdem ist diese Variante weniger nachhaltig als aktive Regeneration, da bei ihr die EWS-Temperatur über 50 Jahre hinaus stärker abnimmt.
- Es kann keine generelle Empfehlung für den anzustrebenden Regenerationsgrad oder die geeignetste Regenerationstechnik gegeben werden. Der Regenerationsgrad richtet sich

¹ Die aktuellen Versionen der Simulationswerkzeuge „EWS Version 5“ (Huber Energietechnik, www.hetag.ch) oder „EWS-Planer“ der Firma Geowatt (Thomas Mégel, Geowatt AG, mündliche Mitteilung, 2015) können die gegenseitige Beeinflussung verschiedener EWS-Projekte mehr oder weniger vereinfacht berücksichtigt werden.

danach, wie lange in einem Gebiet eine EWS-Nutzung möglich sein soll und wie hoch die EWS-Dichte in diesem Gebiet erwartet wird. Die Auswahl der Regenerationstechnik ist deshalb projektspezifisch.

- Viele der Regenerations-Systeme sind einfach nachrüstbar. Unter den getroffenen Annahmen kann eine Anlage, welche nur auf Wärmeentzug ohne Berücksichtigung benachbarter Objekte ausgelegt wurde, ohne weiteres umgerüstet werden. Zusätzliche EWS-Bohrungen sind nicht nötig, da eine in Zukunft zu erwartende Beeinflussung alleine durch aktive Regeneration ausgeglichen werden kann.
- Eine standardmässige Überwachung der Soletemperatur über die Wärmepumpe kann mit dazu beitragen, eine nachbarschaftliche Beeinflussung frühzeitig zu erkennen.

2 Zusammenfassung

Michel Haller, Institut für Solartechchnik SPF

Einen wichtigen Beitrag zur Nutzung erneuerbarer Energien für die Gebäudeheizung können Wärmepumpen leisten, welche Umgebungswärme aus Luft, Wasser oder Boden als Wärmequelle verwenden. In den letzten Jahren wurde vermehrt darauf hingewiesen, dass eine Erhöhung der Wärmeentzugsdichte aus dem Untergrund eine übermässige Abkühlung des Erdreichs zur Folge haben könnte. In diesem Falle könnte ein Ausbau der Nutzung oberflächennaher Geothermie ab einem gewissen Punkt nur noch bei gleichzeitiger Regeneration des Untergrundes erfolgen. Die Stadt Zürich hat deshalb diese Simulationsstudie in Auftrag gegeben, welche verschiedene Möglichkeiten zur aktiven Regeneration von Erdwärmesonden untersucht, und deren Kosten miteinander vergleicht. In dieser Studie ist mit Regeneration immer eine aktive Regeneration durch technische Massnahmen gemeint.

Die Studie betrachtet exemplarisch ein nach Minergie saniertes Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten, dessen Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser durch eine Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage gedeckt wird. Die Langzeitauskühlung des Erdwärmesondenfeldes wurde über g-Funktionen berechnet, welche den Einfluss von Nachbar-Erdwärmesonden auf die Temperaturentwicklung im Erdreich mit einem neu entwickelten Ansatz berücksichtigen. Für die mittlere grossräumige Erdreich-Entzugsenergie wurde mit einem Zukunfts-Szenario von 35 kWh pro m² Bodenfläche und Jahr gerechnet, das als repräsentativ für eine zukünftige lokale dicht besiedelte Situation betrachtet wurde. Mit der Simulationsplattform Polysun wurden verschiedene Varianten zur Regeneration über einen Zeitraum von 50 Jahren simuliert und miteinander verglichen. Vier dieser Varianten beziehen die Regenerationswärme aus solarthermischen Komponenten (abgedeckte Kollektoren, selektive und nicht selektive unverglaste Absorber, PVT-Kollektoren). In zwei weiteren Varianten wurde ein Luft-Wärmetauscher und die Entwärmung des Gebäudes („Geocooling“) als Wärmequelle für die Regeneration simuliert.

Unter Voraussetzung der in dieser Studie gemachten Annahmen können folgende Aussagen zur Regeneration von EWS-Feldern gemacht werden:

- Unter dem Einfluss der benachbarten EWS folgt eine massiv stärkere EWS-Auskühlung über einen Zeitraum von 50 Jahren von zusätzlich ca. 7 Kelvin.
- Schon durch eine Teil-Regeneration kann der Langzeitauskühlung bei dichter Erdwärmennutzung signifikant entgegen gewirkt werden.
- Die Kostenunterschiede zwischen den Regenerationsmethoden sind gering. Die Regenerationsmethode kann somit in Abhängigkeit der konkreten Anwendungssituation gewählt werden.
- Die Option, die Erdwärmesonden bei der Auslegung länger zu dimensionieren, um über einen Zeitraum von 50 Jahren Frostfreiheit des Erdwärmesonden-Nahbereichs zu garantieren, ist sowohl ökonomisch (Wärmegestehungskosten) als auch aus Sicht der Nachhaltigkeit (fortschreitende Auskühlung nach 50 Jahren) nicht zu empfehlen. Eine aktive Regeneration ist günstiger und nachhaltiger.

Aus technischer Sicht ist es möglich, eine aktive Regeneration auch erst beim Erreichen einer kritischen Nutzungsdichte nachzurüsten. Somit könnten die Erdwärmesonden wie gewohnt ausgelegt werden. Ist jedoch in der Nachbarschaft eine kritische Nutzungsdichte vorhanden, sollte grossflächig eine Regeneration eingeplant werden. Für bestehende Anlagen bedeutet dies, dass beim Erreichen einer kritischen Nutzungsdichte eine Regeneration nachgerüstet werden muss.

3 Einleitung

Im Stadtgebiet Zürich waren im Jahr 2013 etwa 5'000 Erdwärmesonden in Betrieb (Meister, 2014). Bis zum Jahr 2050 wird gemäss Effizienzscenario A des EK 2050 mit einer etwa zehnfachen Erdwärmesondendichte gerechnet. Entsprechend würde sich die Wärmeproduktion im Jahre 2050 auf 450 GWh a⁻¹ und der Wärmeentzug aus dem Erdreich auf etwa 355 GWh a⁻¹ belaufen (Schmid, 2014).

Von der Stadt Zürich wurde ein nachhaltig nutzbares geothermisches Potenzial von 3 kWh m⁻² aufgrund einer relativ einfachen Abschätzung ermittelt für den Fall, dass keine Regeneration des Wärmeentzugs stattfindet. Dies entspricht einem Potenzial zur Erdwärmenutzung von rund 100 GWh a⁻¹ (Wagner und Weisskopf, 2014). Ein längerfristig höherer Entzug ohne Regeneration hätte eine übermässige Auskühlung des Erdreichs zur Folge, der für die Erdwärmenutzung selber auf Grund von Eisbildung im Boden und längerfristig sinkender Quellentemperaturen für die Wärmepumpen problematisch werden könnte. Damit das Erdreich nicht zu stark ausgekühlt wird, müssen deshalb Möglichkeiten und Kosten von aktiver EWS-Regeneration überprüft werden.

Im Projekt RegenOpt wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, welche die Kosten verschiedener Varianten zur EWS-Regeneration miteinander vergleicht. Die Regeneration soll dabei einer langfristigen und übermässigen Reduktion der Temperatur im Erdreich – und damit auch im Erdwärmesonden-Vorlauf – entgegen wirken. Gleichzeitig wurde als Grundlage für die Berechnungen die Abschätzung des geothermischen Potentials mit Hilfe von Simulationsrechnungen verfeinert.

Die Varianten, welche für die Regeneration untersucht wurden, sind:

1. Luft-Wärmetauscher (LWT)
2. Geocooling (Kühlung des Gebäudes über die EWS)
3. Verglaste Kollektoren, welche primär für die Warmwasserbereitung genutzt werden
4. Unverglaste Kollektoren selektiv
5. Unverglaste Kollektoren nicht selektiv
6. PVT-Kollektoren

Abwärmenutzungen aus Kältemaschinen oder Prozessen sind objektspezifisch, können aber wesentlich zur Regeneration beitragen. Dies wurde in diesem Bericht nicht berücksichtigt.

4 Methode zum Vergleich der Regenerationsstrategien

Florian Ruesch

Werden unterschiedliche Regenerationsstrategien miteinander verglichen, so stösst man auf das Problem, dass unterschiedliche Wärmequellen unterschiedliche Regenerationsgrade über die Jahre ergeben. Ziel ist bei allen Varianten die Einhaltung der SIA 384/6, d.h. nach 50 Jahren darf die minimale Soletemperatur -1.5°C nicht unterschreiten. Kann ein System eine 100% Regeneration erreichen, so findet keine Langzeitauskühlung statt. Je geringer der Regenerationsanteil ist, desto mehr kühlt sich das System über die Jahre ab, was mit längeren EWS kompensiert werden muss.

Zum Beispiel steht typischerweise durch Geocooling nicht genügend Energie für eine vollständige Regeneration zur Verfügung. Oder die Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Erdreich reicht erst nach einer gewissen Auskühlung des Erdreichs für eine ausgeglichene Regeneration mit Aussenluftwärmetauscher. Andere Wärmequellen wie Industrieabwärme oder Sonnenkollektoren erreichen nur eine ausgeglichene Regeneration bei ausreichender Verfügbarkeit. Um ausgeglichene mit „unvollständigen“ Regenerationsstrategien zu vergleichen wird in dieser Arbeit wie folgt vorgegangen:

1. Die Erdwärmesonden der Nachbarn in Gebieten mit hoher Geothermienutzung werden durch ein „unendliches EWS-Feld“ mit 20 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden angenähert. Der Einfluss dieser Nachbarn wird berücksichtigt. Dieses EWS-Feld entspricht einer Wärmeentzugsdichte von ca. $35 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.
2. Es wird angenommen, dass alle Nachbar-Erdwärmesonden im gleichen Masse genutzt und regeneriert werden wie das betrachtete System.
3. Die EWS-Längen werden nach SIA 384/6 ausgelegt (-3°C minimale Eintrittstemperatur bei einer Spreizung vom 3 K nach 50 Jahren). Unterschiedliche Regenerationsgrade benötigen andere EWS-Längen um das SIA Kriterium zu erreichen, und führen somit zu unterschiedlichen Installationskosten für die Erdwärmesonden.

Mit den beschriebenen Kriterien kann die Wirtschaftlichkeit unterschiedlich regenerierender Systeme direkt miteinander verglichen werden. So tritt beispielsweise bei einer vollständigen Regeneration mit Solarkollektoren keine Langzeitauskühlung auf. In diesem Falle reicht ein relativ kleines Erdwärmesondenfeld (EWS-Feld) um nicht unter die Minimaltemperatur der SIA 384/6 zu fallen. Wird hingegen nicht regeneriert, so wird das Erdreich durch den eigenen Wärmeentzug und zusätzlich durch denjenigen der Nachbarn stark ausgekühlt. In diesem Fall müssen die Erdwärmesonden verlängert und/oder zusätzliche Erdwärmesonden gebohrt werden um die Minimaltemperatur der SIA 384/6 auch vor 50 Jahren nicht zu unterschreiten. Unvollständige Regeneration wird unter diesen Bedingungen auch nach 50 Jahren noch zu einer weiteren Abkühlung des Erdreichs und zu einem Gleichgewichtszustand führen, der unter der tiefsten zulässigen EWS-Temperatur nach SIA 384/6 liegt. Das Verhalten der verschiedenen Systeme über den Zeitraum von 50 Jahren hinaus wird abgeschätzt, indem die EWS-Temperaturen für einen Zeitraum bis 60^2 Jahre simuliert werden. Daraus können Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit der verschiedenen Systeme getroffen werden.

4.1 Nutzungsdichte

In dieser Studie wird von einer Geothermienutzungsdichte von ca. 35 kWh pro m^2 und Jahr ausgegangen. Dieser Wert steht im Vergleich zu einer erwarteten Nutzungsdichte von

² Aus praktischen Gründen wurde der maximale Simulationszeitraum auf 60 Jahre begrenzt.

20-110 kWh m⁻² a⁻¹ für die Stadt Zürich gemäss Effizienzscenario 2050 (Jakob et al., 2012)³. In den Simulationen wurde diese Nutzungsdichte mit Hilfe einer sog. g-Funktion berücksichtigt, welche auf grossen EWS-Feldern mit 20 m Abstand zwischen den einzelnen EWS beruht.

Für das Erdreich im Gebiet der Stadt Zürich werden folgende Werte als typisch erachtet:

- Leitfähigkeit $\lambda = 2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Wärmekapazität $\rho c_p = 2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
- Oberflächentemperatur $T_0 = 10.7 \text{ °C}$ ⁴

4.2 Berücksichtigung von Langzeit-Effekten

Um den Langzeiteffekt bei Erdwärmesondenfeldern zu quantifizieren wird oft auf eine Transferfunktion, die sogenannte g-Funktion, zurückgegriffen (Eskilson, 1987). Der Temperaturabfall am Rande einer Erdwärmesonde (ΔT), welcher durch eine durchschnittliche spezifische Entzugsleistung (\dot{q}) herbeigeführt wird, kann mit Hilfe dieser g-Funktion ($g(t)$) in Abhängigkeit der Zeit (t) ausgerechnet werden:

$$\Delta T = 1/(2 \pi \lambda) \dot{q} g(t)$$

Die g-Funktion ist von vielen Parametern abhängig. Sie wird beeinflusst durch den Bohrlochdurchmesser, die EWS-Länge H , sowie Eigenschaften des Erdreichs wie Leitfähigkeit (λ) und spezifische Wärmekapazität c_p . Auch die Anschlusstiefe, und bei EWS-Feldern die Anordnung der Erdwärmesonden und deren Abstand zueinander, haben einen Einfluss. Wird statt der realen Zeit eine dimensionslose Eskilson Zahl

$$ES = 9 t \lambda / (H^2 c_p \rho)$$

eingeführt, kann dieselbe g-Funktion für unterschiedliche Erdwärmesondenlängen und Erdreischeigenschaften verwendet werden (ρ bezeichnet dabei die Dichte des Erdreiches). Für weitere Details zu diesem Verfahren wird auf Eskilson (1987) verwiesen. Anhand der g-Funktion kann die Langzeitentwicklung der Temperatur im Bereich von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern ausgerechnet werden. Auf diese Weise können bei der Dimensionierung einer Geothermieanlage auch längerfristige Temperaturentwicklungen im Erdreich berücksichtigt werden.

4.3 Beeinflussung durch Nachbarn

Bei der Auslegung von Erdwärmesonden werden üblicherweise Erdwärmesonden oder Erdwärmesondenfelder benachbarter Grundstücke nicht berücksichtigt. Für das Projekt RegenOpt wurde deshalb eine „Nachbar-g-Funktion“ eingeführt. Diese wurde definiert als die g-Funktion eines unendlichen Feldes abzüglich der g-Funktion des EWS-Feldes in der Mitte. An Stelle des EWS-Feldes in der Mitte wird dann das konkrete EWS-Feld der betrachteten Einzelanlage gerechnet. In diesem Bericht wird ein Einzelfeld von 2 x 3 resp. 3 x 3 Erdwärmesonden verwendet. Die Abstände innerhalb des Einzelfeldes (hier 6 m bei regenerierenden Anlagen und 10 m bei nicht regenerierenden Anlagen) sind deutlich geringer als zwischen den Erdwärmesonden des grossräumigen Nachbarfeldes (20 m). Die Werte der „Nachbar-g-Funktion“ (welche für die angestrebte Nutzungsdichte definiert werden kann) werden zur g-Funktion des spezifischen Einzelfeldes dazugezählt. Dieser Ansatz geht davon aus, dass alle Nachbarn ihre Erdwärmesonden mit derselben durchschnittlichen Entzugsleistung belasten wie das betrachtete System in der Mitte⁵.

³ Diese Werte beziehen sich auf die sogenannten Angebotszonen des EK 2050, wo EWS-Bohrungen aus gewässerschutzrechtlichen Auflagen zulässig sind.

⁴ Für die Berechnung wurde von diesen Parametern ausgegangen. Für spezifische Berechnungen von Anlagen müssen aber immer die lokalen Parameter verwendet werden.

⁵ Wenn die durchschnittliche Entzugsleistung der Nachbarn nicht mit der Entzugsleistung des betrachteten Systems übereinstimmt, ist die simple Addition der g-Funktionen nicht korrekt. Soll die grossräumige Entzugsdichte reduziert werden, so kann dies über eine geringere Dichte des grossräumigen Feldes erreicht werden, bei welcher die Entzugsleistung pro m EWS dann wieder der Entzugsleistung des Feldes in der Mitte entspricht.

Somit kann der Einfluss einer grossräumigeren EWS-Dichte mit identischen spezifischen Entzugsleistungen berücksichtigt werden. Mit den oben beschriebenen Annahmen führen die Nachbarn ohne Regeneration zu einer zusätzlichen Auskühlung von ca. 7 K nach 50 Betriebsjahren. Diese zusätzliche Auskühlung wird bei regenerierten Systemen proportional zum Regenerationsanteil verringert. Im Anhang A werden die verwendeten „Nachbar g-Funktionen“ für unterschiedliche EWS-Tiefen angegeben, sowie deren Berechnung genauer erläutert.

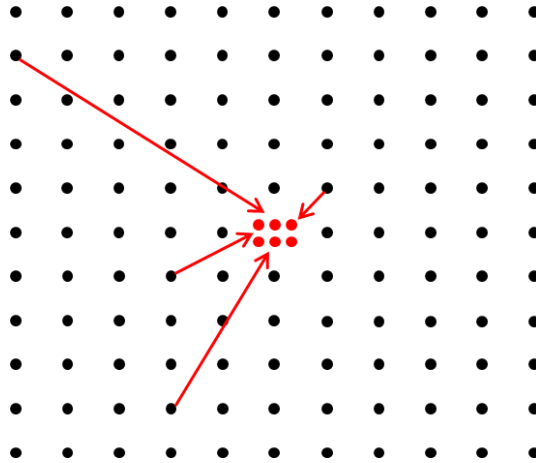


Abbildung 1: Der Einfluss aller Erdwärmesonden eines grossräumigen Gebietes auf ein EWS-Feld in der Mitte. Länge und Anordnung der schwarz gekennzeichneten EWS entsprechen einer Wärmeentzugsdichte von etwa $35 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

4.4 Zusammenhang zwischen Regenerationsgrad und nachhaltiger EWS-Nutzung

Für einen nachhaltigen EWS-Betrieb ist eine vollständige Regeneration nicht unbedingt erforderlich. Entscheidend ist vielmehr, ob unter den gegebenen Bedingungen sich ein stationärer Zustand der EWS-Temperatur über der tiefsten zulässigen Temperatur nach SIA 384/6 einstellt. In Gebieten mit sehr grossen Abständen zwischen den einzelnen EWS-Objekten kann dies auch ohne Regeneration erfolgen, d.h. der Wärmeentzug kann langfristig durch Wärmeeintrag über die Erdoberfläche und aus dem Erd-Innern ausgeglichen werden. Für viele Situationen kann deshalb auch eine Teil-Regeneration eine mögliche Variante für eine nachhaltige EWS-Nutzung sein.

5 Definition von Kennzahlen

Für die Darstellung der Resultate wird auf Kennzahlen abgestützt, welche mit Hilfe der Simulationsstudien ermittelt wurden. Diese Kennzahlen und weitere Grundlagen werden hier eingeführt und beschrieben.

Als **Brutto-Entzug** der EWS wird jene Energie bezeichnet, die dem Erdreich durch die Wärmepumpe entzogen wird um den Wärmebedarf für Warmwasser und Raumheizung abzudecken.

Die **Regenerationsenergie** ist die Energie, die dem Erdreich durch eine der untersuchten Varianten aktiv wieder zugeführt wird.

Die **Netto-Entzugsenergie** der EWS ergibt sich aus dem Brutto-Entzug, abzüglich der Regenerationsenergie. Sie wird jeweils über ein Jahr bilanziert. Ein vollständig regeneriertes System entspricht einem Null-Netto-Entzug.

In den **Investitionen** werden die Erstellungskosten für das EWS-Feld mit Wärmepumpe, die benötigten Wärmespeicher, die Hydraulik und die Verrohrung zwischen EWS-Feld und Puffer- bzw. Energie-Speicher verrechnet zuzüglich 15% Planerhonorar. Bei den jeweiligen Regenerationsvarianten werden die zusätzlichen Investitionen für den Luft-Wärmetauscher bzw. das Kollektorfeld, Wärmetauscher sowie die Verrohrung und Hydraulik berücksichtigt.

Die **jährlichen Kapitalkosten** werden mit dem Variantenvergleichstool der Stadt Zürich⁶ berechnet. Ein Screenshot vom Variantenvergleichstool mit den Grundeinstellungen für die Berechnungsgrundlage ist im Anhang B einzusehen. Der angegebene Kalkulationszinssatz des Variantenvergleichstools beträgt 2.5 %. Die Abschreibungszeit der Komponenten beträgt 15 Jahre für die Wärmepumpe, 20 Jahre für die Kollektoren, 20 Jahre für den Luft-Wärmetauscher und 50 Jahre für Erdwärmesonden.

Die **jährlichen Energiekosten** berücksichtigen die Ausgaben für elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpe und der Zirkulationspumpen oder des Rückkühlers. Für die Energiekosten wurde nach dem Variantenvergleichstool der Stadt Zürich eine Preissteigerung von 1.4 % a⁻¹ angesetzt. Die jährlichen Energiekosten ändern sich jedoch nicht nur auf Grund der Preissteigerung im Verlauf der Zeit, sondern auch auf Grund der Absenkung der Quelltemperatur der Wärmepumpe mit der Zeit. Deshalb werden die jährlichen Energiekosten sowohl für das erste Betriebsjahr als auch für das fünfzigste Betriebsjahr ausgewiesen.

⁶ Download: www.stadt-zuerich.ch/egt -> Werkzeuge

6 Definition des Wärmebedarfs und der Varianten zur Regeneration

Patrick Persdorf

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die verschiedenen Regenerationsmöglichkeiten mit Polysun geeignet simuliert werden können. **Der Simulationszeitraum wurde für die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse auf ein Betriebsjahr begrenzt**, um die generellen Abhängigkeiten zwischen Erdwärmesonden, Wärmepumpe, Regenerationsquelle und Bedarfsprofil des Objektes effizient untersuchen und die Polysun-Modelle entsprechend optimieren zu können. Simulationsrechnungen über 50 Betriebsjahre und mehr werden im nächsten Kapitel gezeigt.

Die im Bericht dargestellten Abbildungen der Hydraulik sind vereinfachte Simulations-Schemen und können nicht zur Planung von Anlagen eingesetzt werden. Im Einzelfall wird auf modellbedingt nötige Abweichungen zwischen „realer“ und „simulierter“ Hydraulik hingewiesen.

6.1 Wärmebedarf und Aufbau der Basisvariante (Variante ohne Regeneration)

Alle Regenerationsvarianten basieren auf der gleichen **Basisvariante** einer Wärmeversorgung für ein Mehrfamilienhaus und haben den gleichen Heiz- und Warmwasserbedarf. Das Gebäude umfasst 12 Wohnungen mit einer Gesamtwohnfläche von 1200 m² und einem spezifischen Heizwärmebedarf von 60 kWh m⁻² a⁻¹. Der jährliche Warmwasserbedarf inklusive Zirkulationsverluste beträgt 3400 kWh pro Wohneinheit. Der gesamte Wärmebedarf beträgt somit 112.8 MWh a⁻¹.

Die Basisvariante wurde für jede Regenerationsvariante um die speziellen Komponenten erweitert und in Polysun simuliert. Sowohl der Raumheizungsbedarf als auch der Warmwasserbedarf wurden in den Simulationen über eine zweistufige Sole-Wasser Wärmepumpe gedeckt. In Abbildung 2 ist die Basisvariante als Simulationsschema dargestellt.

Eine detaillierte Übersicht zu den Gebäudedaten, dem Verbrauch an Heizenergie, dem Warmwasserbedarf und Details zur Dimensionierung der Komponenten ist in Anhang B aufgeführt.

Die Basisvariante wird für Situationen mit und ohne Nachbarn simuliert.

6.2 Regeneration über Luft-Wärmetauscher

Die Variante mit dem Luft-Wärmetauscher (Abbildung 3) regeneriert die Erdwärmesonden mittels Aussenluft. Der Luft/Wasser Wärmetauscher wurde direkt in den Solekreislauf der Erdwärmesonde eingebunden.

Die Daten eines Luft-Wärmetauschers mit 80 kW Nennleistung (Typ CABERO GCHD089KB/2S-30D25) wurden auf verschiedene Nennleistungen skaliert und in die Komponente „Lüfter“ von Polysun übertragen. Bei einer Aussentemperatur von 25°C kann das Fluid von 10°C auf 15°C erwärmt werden. Details zum Luft-Wärmetauscher sind im Anhang B angegeben. Der Betrieb erfolgt bei folgenden Bedingungen:

- Aussentemperatur > Erdwärmesonden-Mitteltemperatur + ΔT .
- Die Regeneration ist während des Betriebs der Wärmepumpe aus simulationstechnischen Gründen inaktiv.

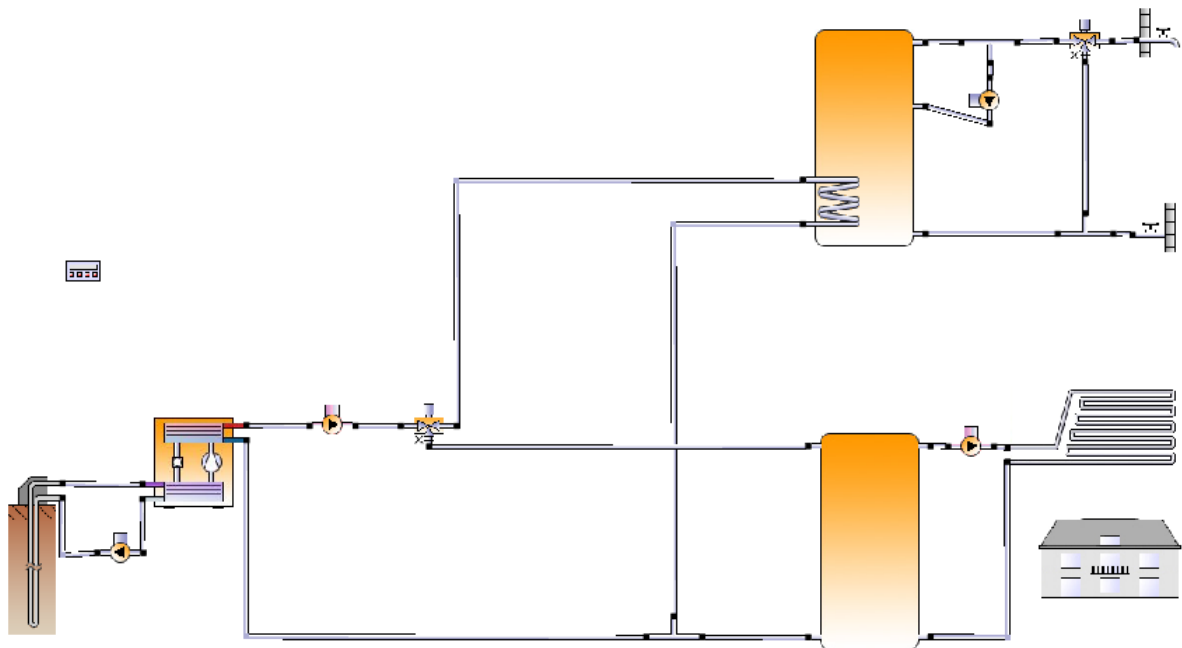


Abbildung 2: Simulationsschema der Basisvariante

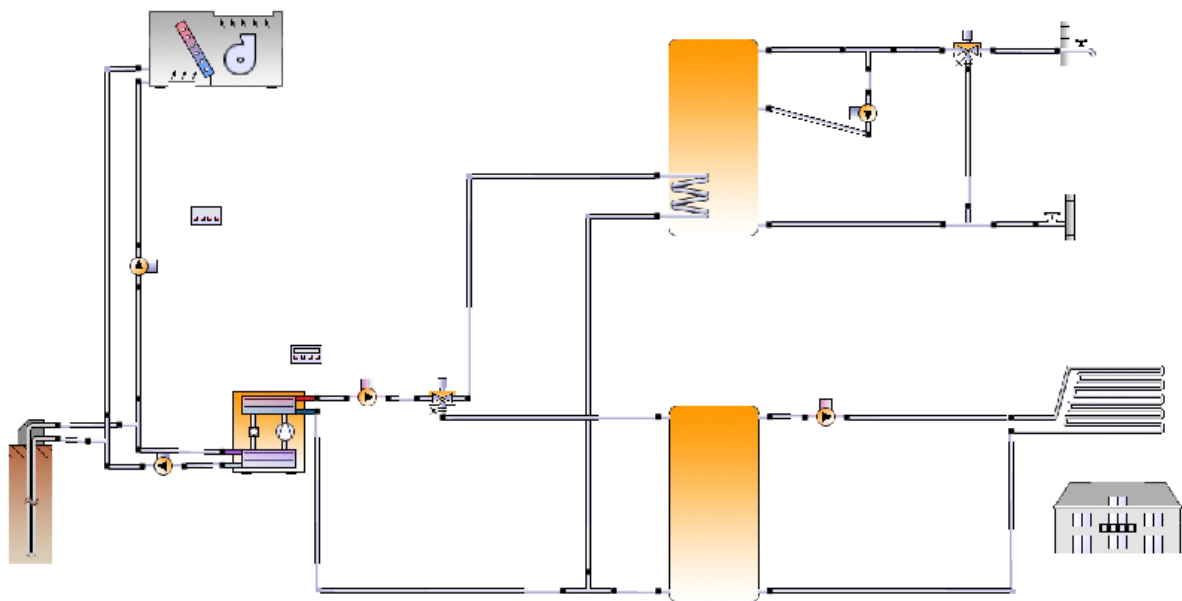


Abbildung 3: Simulationsschema für die Variante Regeneration mit Luft-Wärmetauscher

Der Luft-Wärmetauscher muss im Modell parallel zur Wärmepumpe eingebaut werden, eine serielle Einbindung mit gleichzeitigem Betrieb von Luft-Wärmetauscher und WP ist mit Polysun nicht möglich. Bei einer seriellen Einbauweise werden leicht bessere Resultate erwartet, da die Regeneration auch während des Wärmepumpeneinsatzes möglich ist. Aus modelltechnischen Gründen besitzt sowohl die WP als auch der Luft-Wärmetauscher eine eigene Solepumpe. Abbildung 4 zeigt die Abhängigkeit der Netto-Entzugsenergie von der nominellen Wärmeleistung des Luft-Wärmetauschers für das erste Betriebsjahr, relativ zum Wärmeentzug der Basisvariante. Daraus ist ersichtlich, dass im ersten Jahr auch mit einem sehr grossen Luft-Wärmetauscher

(Nennleistung⁷ vier Mal grösser als die Leistung der Wärmepumpe) nur knapp 50% der entzogenen Wärme regeneriert werden kann. Die berechnete Kurve flacht für Luft-Wärmetauscherleistungen über 60 kW ab. Deshalb wurde in dieser Studie mit einem Luft-Wärmetauscher von 60 kW Leistung gerechnet, dieser liegt in der Grössenordnung der WP-Nennleistung (50 kW).

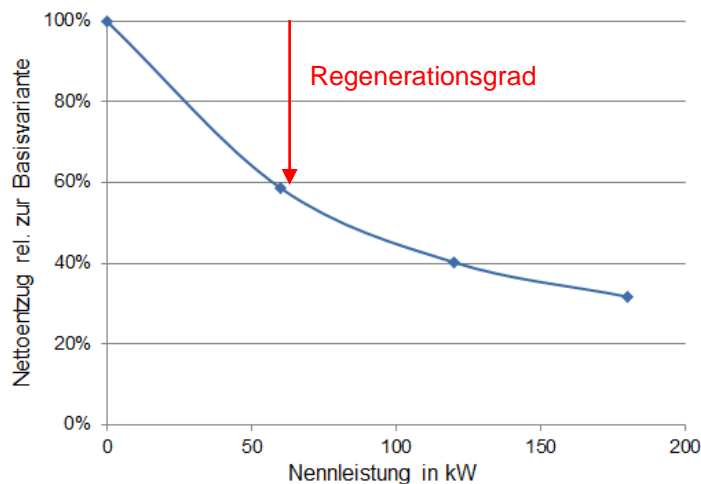


Abbildung 4: Netto-Entzugsenergie relativ zur Basisvariante im ersten Betriebsjahr als Funktion der Luft-Wärmetauscher-Nennleistung. Je kleiner die Netto-Entzugsenergie, umso grösser ist der Regenerationsgrad.

6.3 Regeneration über Geocooling

Die Geocooling-Variante (Abbildung 5) regeneriert die Erdwärmesonden durch Entwärmung des Gebäudes in den Sommermonaten. Über einen Wärmeüberträger wird die überschüssige Raumwärme direkt in die Erdwärmesonden geleitet. Der Wärmetauscher hat eine Übertragungskapazität von 17 kW K^{-1} . Der Durchfluss für die Regeneration beträgt 3600 l h^{-1} . In der Simulation ergab sich eine maximale Kühllast von 8.3 W m^{-2} bezogen auf die Wohnfläche. Die Regeneration ist freigegeben wenn folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Freigabezeitraum (Mai – September)
- Gebäudetemperatur > Soll-Gebäudetemperatur + 2 K
- Die Gebäudeheizung ist inaktiv
- Die Wärmepumpe ist inaktiv

Auch hier wäre in der Praxis eine Einbindung denkbar, welche einen gleichzeitigen Betrieb der Wärmepumpe (Warmwasserbereitung) und der Gebäudeentwärmung ermöglicht. Um die Regelung einfach und die Simulationszeit kurz zu halten wurde hier auf diese Optimierung verzichtet.

⁷ Nennleistung eines Luftwärmetauschers nach EN 1048, Leistung bei ΔT Lufteintritt zu Flüssigkeitseintritt 15 K

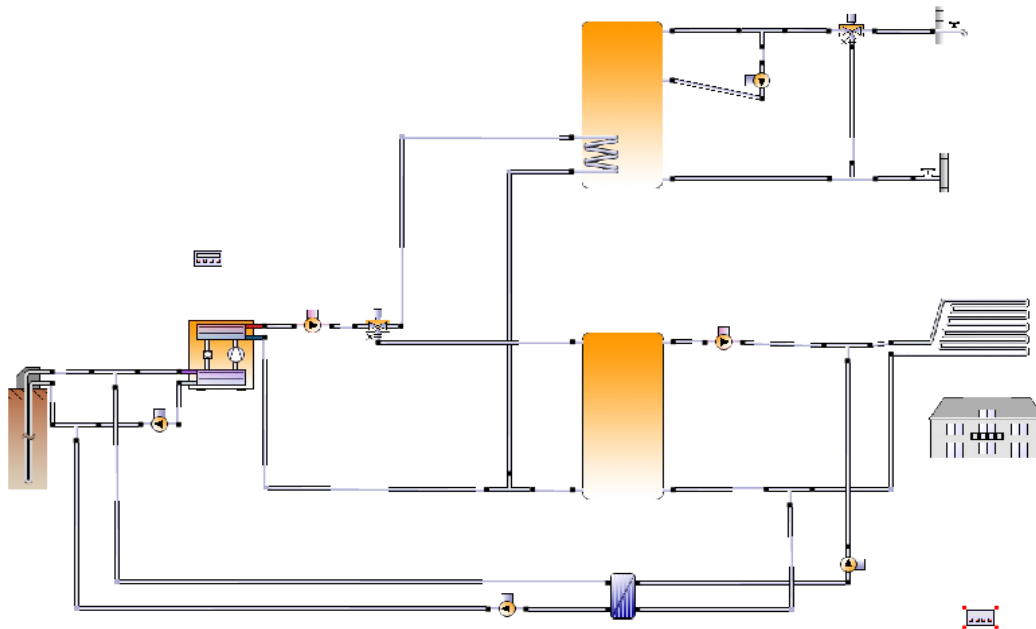


Abbildung 5: Simulationsschema der Variante Regeneration über Geocooling

6.4 Regeneration über Solarwärme

Die Kollektoren oder Absorber der Solarwärme-Varianten werden für die Warmwasserbereitung und die Regeneration der Erdwärmesonden eingesetzt. Priorität hat dabei die direkte Warmwasserbereitung. Die Kollektoren sind mittels Rohrwendel-Wärmeüberträger in den unteren Bereich des Solarspeichers eingebunden. Überschüssige bzw. nicht direkt genutzte Solarwärme wird zur Regeneration des Erdwärmesondenfeldes verwendet. Diese wird mittels Wärmeüberträger⁸ auf den Solekreis der Erdwärmesonde übertragen. Die Regeneration des Erdwärmesondenfeldes wurde in den Simulationen auf eine maximal zulässige EWS-Eintrittstemperaturen von 40°C limitiert (dies entspricht den Auflagen des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL des Kantons Zürich). In der Realität könnte die Temperaturbegrenzung mit einem Beimischventil realisiert werden. Das Erdwärmesondenmaterial muss für die höheren Temperaturen geeignet sein, z.B. PE100RT. Eine Priorisierung der WW-Ladung gegenüber der Regeneration wird über folgende Regelstrategie erreicht:

- Berechnung des theoretischen Kollektorwirkungsgrades η_{WW} bei einer Kollektortemperatur welche der Temperatur im unteren Bereich des Solarspeichers entspricht.
- Warmwasserbereitstellung falls $\eta_{WW} > 0$ und Speichertemperatur $< 60^\circ\text{C}$.
- Regeneration falls keine WW-Beladung und EWS-Temperatur $<$ Kollektortemperatur und EWS-Eintrittstemperatur $< 40^\circ\text{C}$.
- Diese universelle Regelstrategie wird für alle Kollektor-Varianten beibehalten.

Die Einbindung des Kollektorfeldes ist in Abbildung 6 dargestellt. Diese gilt für alle Kollektor- und Absorbertypen inklusive PVT. Abbildung 7 zeigt eine weitere Hydraulikvariante mit einem solaren Zusatzspeicher (+1500 L). Diese Variante erzielt einen höheren Solarertrag und benötigt weniger elektrische Energie, da die Wärmepumpe weniger häufig in Betrieb ist als in der Variante mit einem kleinerem Speichervolumen. Leistungsdaten der unterschiedlichen Kollektor- und Absorbertypen sind im Anhang B aufgelistet.

⁸ Auslegung: Delta T 5 K bei 500 W/m² Kollektorfläche nach VDI 6002

Temperatur im Erdreich die Temperaturdifferenz ΔT zwischen Erdreich und der Umgebungsluft zunimmt, wird die Regenerationsrate mit der Zeit steigen (in der Grafik nicht dargestellt).

Für die reine Warmwasserbereitstellung wird für das hier betrachtete Gebäude eine Kollektorfeldgrösse von 27 - 43 m² empfohlen (Fink, 2009). Da bei den betrachteten Systemen zusätzlich zur Warmwasserbereitung auch Erdwärmesondenregeneration durchgeführt wird, wurde die Kollektorfläche mit 60 m² etwas grösser gewählt. Zusätzlich wurde mit einem grösseren Kollektorfeld simuliert welches eine vollständige Regeneration erlaubt, oder die verfügbare Dachfläche (260 m²) vollständig bedeckt (siehe Abbildung 8). Darin ist erkennbar, dass eine vollständige Regeneration mit der verfügbaren Dachfläche nur mit verglasten oder unabgedeckten selektiven Kollektoren möglich ist. Eine vollständige Regeneration entspricht in der Grafik einem Nettoentzug von 0 %.

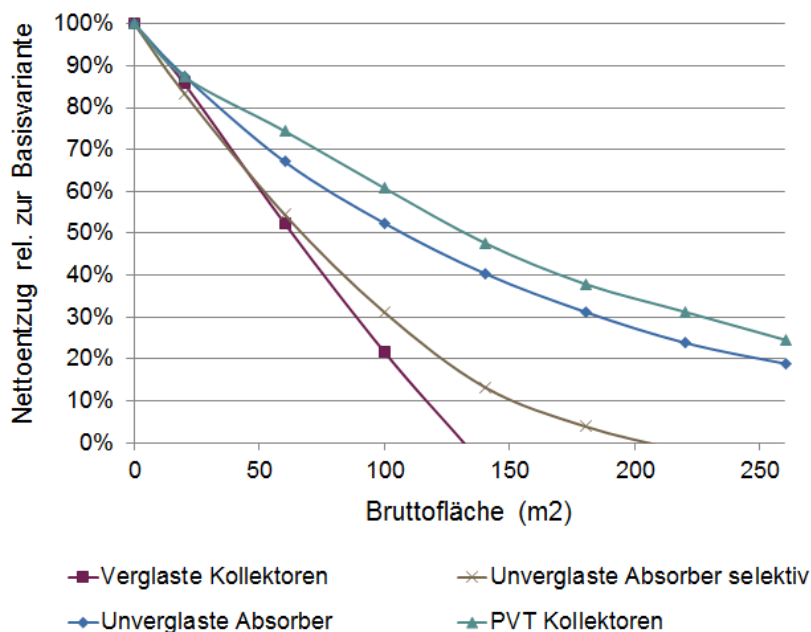


Abbildung 8: Nettoentzugsenergie relativ zur Basisvariante im ersten Betriebsjahr als Funktion der Brutto-Kollektorfläche.

7 Simulationsergebnisse für 50 Jahre Betrieb

In diesem Abschnitt werden Resultate dargestellt für einen 50 jährigen Betrieb der verschiedenen Varianten. Wie in Kapitel 4 genauer beschrieben, wurde bei diesen Simulationen der Einfluss von Nachbarobjekten mit einer durchschnittlichen Nutzungsdichte von $35 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ mit einbezogen. Für alle Nachbar-Objekte wurde dabei der gleiche Nettowärmeentzug angenommen wie für das simulierte Objekt.

7.1 Erforderliche EWS-Längen

Es gilt für alle Systeme die Anforderung, dass während 50 Jahren Betriebszeit die minimale Wärmeträgertemperatur von -3°C am Erdwärmesonden-Eintritt nicht unterschritten werden darf. Bei einer Temperaturspreizung von 3 K am Verdampfer der Wärmepumpe entspricht dies einer mittleren EWS-Temperatur von -1.5°C als tiefste zulässige mittlere Wärmeträgertemperatur nach SIA 384/6. Ausgehend von ersten Simulationen mit EWS-Länge 200 m wurde die Erdwärmesondenlänge der jeweiligen Varianten über ein Extrapolationsverfahren so lange angepasst, bis das Kriterium „Erdwärmesondeneintritt $> -3^\circ\text{C}$ “ gerade knapp erreicht wurde.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der Resultate für ein Feld ohne Regeneration mit Berücksichtigung der Nachbar-Erdwärmesondenfelder im Vergleich zu einer Auslegung ohne Berücksichtigung der Nachbar-Erdwärmesondenfelder.

Es zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung der Nachbar-Felder rund doppelt so viele Erdwärmesondenmeter benötigt werden um die Anforderungen nach SIA 384/6 zu erfüllen.

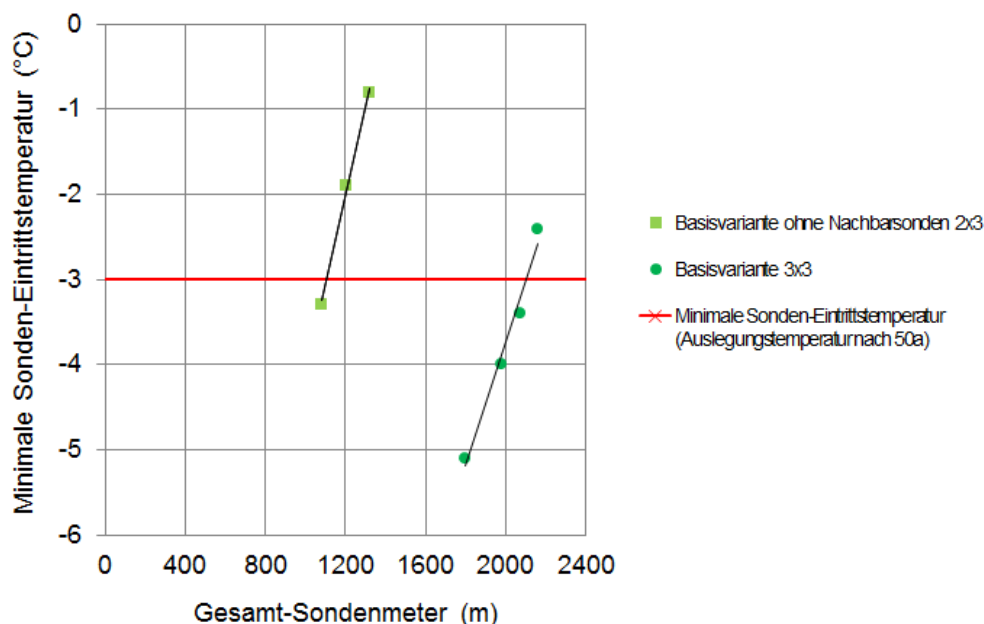


Abbildung 9: Minimale Eintrittstemperaturen in die EWS der Basisvariante mit (3 x 3 EWS) und ohne Beeinflussung durch benachbarte EWS-Anlagen (2 x 3 EWS) nach 50 Jahren Simulationszeit.

Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang zwischen Erdwärmesondenlänge und der minimalen Erdwärmesonden-Eintrittstemperaturen nach 50 Jahren Betrieb für die verschiedenen Regenerations-Varianten und die Basisvariante unter Berücksichtigung der Nachbarfelder.

Für die beiden Fälle Basisvariante und Geocooling ist ein Feld von 6 Erdwärmesonden bei weitem nicht ausreichend. Deshalb musste hier ein Feld mit 9 Erdwärmesonden (3 x 3) simuliert werden. Zur Vereinfachung wurde das 3 x 3 Feld mit denselben „Nachbar-g-Funktionen“

kombiniert wie das kleinere 2 x 3 Feld. Auch der mittlere Abstand von 20 m zwischen den Nachbarn wurde vereinfachend unverändert erhalten⁹.

Tabelle 1 zeigt die Resultate der Auslegung der Erdwärmesondenfelder für die verschiedenen Varianten auf Grund des Kriteriums von -3 °C nach 50 Jahren. Alle folgenden Darstellungen sowie die Berechnung der Kosten der jeweiligen Varianten basieren auf dieser Dimensionierung der Erdwärmesondenfelder.

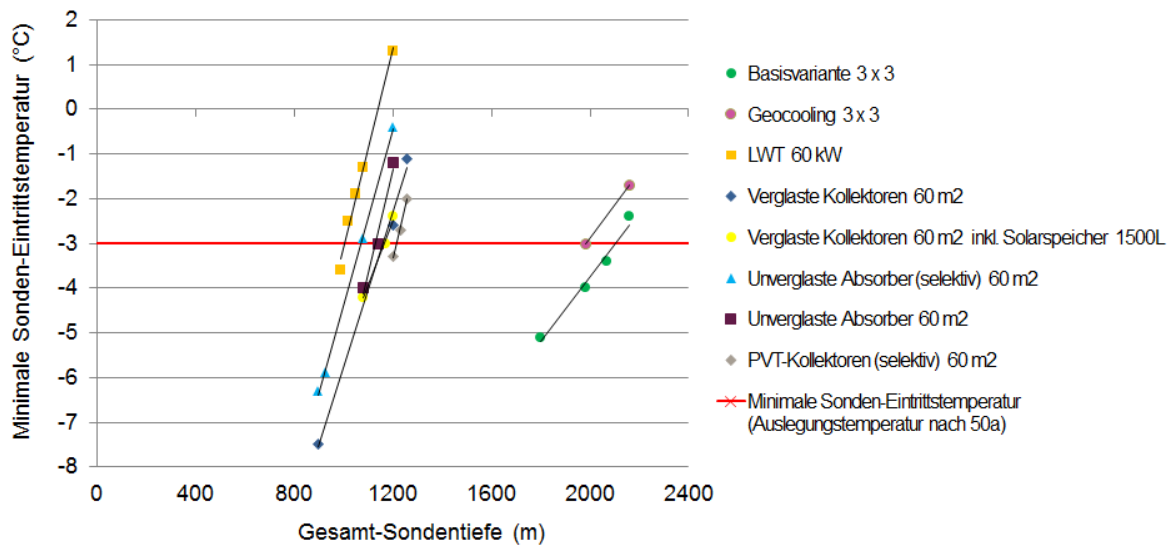


Abbildung 10: Minimale Erdwärmesonden-Eintrittstemperaturen der Regenerationsvarianten nach 50 Jahren Simulationszeit. Die rote Linie stellt die tiefste zulässige EWS-Eintrittstemperatur nach SIA 384/6 dar (Zielwert).

⁹ Korrekterweise müssten bei einer grösseren Anzahl von Erdwärmesonden im betrachteten Feld in der Mitte auch die Anzahl Erdwärmesonden im grossräumigen Nachbarfeld erhöht, respektive deren mittlerer Abstand verringert werden. Dadurch wären für die Basisvariante und die Variante Geocooling eine noch grössere Anzahl Erdwärmesondenmeter notwendig als im Bericht dargestellt.

Tabelle 1: Auslegung der Erdwärmesondenfelder für die jeweiligen Regenerationsvarianten.

	EWS-Feld	EWS-Abstand	EWS-Tiefe ^{a)}	Gesamt-EWS-Meter
Basisvariante ohne Nachbarn	2 x 3	10 m	185 m	1110 m
Basisvariante	3 x 3	10 m	235 m	2115 m
Geo-cooling	3 x 3	10 m	220 m	1980 m
Luft-Wärmetauscher (60 kW)	2 x 3	6 m	170 m	1020 m
Verglaste Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	200 m	1200 m
Verglaste Kollektoren (60 m ²) inkl. Solarspeicher	2 x 3	6 m	195 m	1170 m
Unverglaste, selektive Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	180 m	1080 m
Unverglaste Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	190 m	1140 m
PVT Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	205 m	1230 m
Verglaste Kollektoren 100 % (132 m ²)	2 x 3	6 m	130 m	780 m
Verglaste Kollektoren 100 % inkl Solarspeicher (138 m ²)	2 x 3	6 m	125 m	750 m
Unverglaste, selektive Kollektoren 100 % (218 m ²)	2 x 3	6 m	130 m	780 m
Unverglaste Kollektoren (260 m ²)	2 x 3	6 m	145 m	870 m
PVT-Kollektoren (260 m ²)	2 x 3	6 m	160 m	960 m

a) Die EWS-Tiefe ist auf 5 Meter aufgerundet. Die Auslegung basiert auf Stundenwerte der Polysunsimulationen.

7.2 Regenerationsgrade und Energiebilanzen

Die jährliche Netto-Entzugsenergie der Erdwärmesonden und die jährliche Regenerationsenergie für das erste Betriebsjahr sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Summe aus Netto-Entzugsenergie und Regenerationsenergie ergibt die Brutto-Entzugsenergie. Folgende Erkenntnisse können aus der Grafik gezogen werden:

- Bei der Geocooling-Variante wird der Sonde etwas mehr Brutto Energie entzogen als bei der Basisvariante. Dies wird dem wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb in der Übergangszeit zugeschrieben. Wird das Gebäude an einem schönen Herbsttag gekühlt, so muss es nach Sonnenuntergang auch wieder stärker aufgeheizt werden.
- Die Differenz zwischen Brutto-Entzug der Variante mit verglasten Kollektoren und dem Brutto-Entzug der Basisvariante ist ein Resultat der direkten Nutzung von Solarwärme für die Warmwasserbereitung. Die Grafik zeigt, dass mit einem solaren Zusatzspeicher deutlich mehr Solarenergie zur direkten Warmwasserbereitung genutzt werden kann.
- Die Varianten mit 60 m² und mit ca. 130 m² (vollständige Regeneration) abgedeckten Kollektoren weisen fast denselben Brutto-Wärmeentzug auf. Die zusätzliche Kollektorfläche kann also nicht mehr direkt genutzt werden. Ev. würde eine Vergrößerung des Speichers oder eine Heizungsunterstützung die solare Direktnutzung erhöhen.
- Die Brutto-Entzugsenergie liegt bei den unabgedeckten Kollektoren nur wenig tiefer als bei der Basisvariante. Der direkte Nutzen zur Warmwassererwärmung ist also bei diesen Systemen gering.

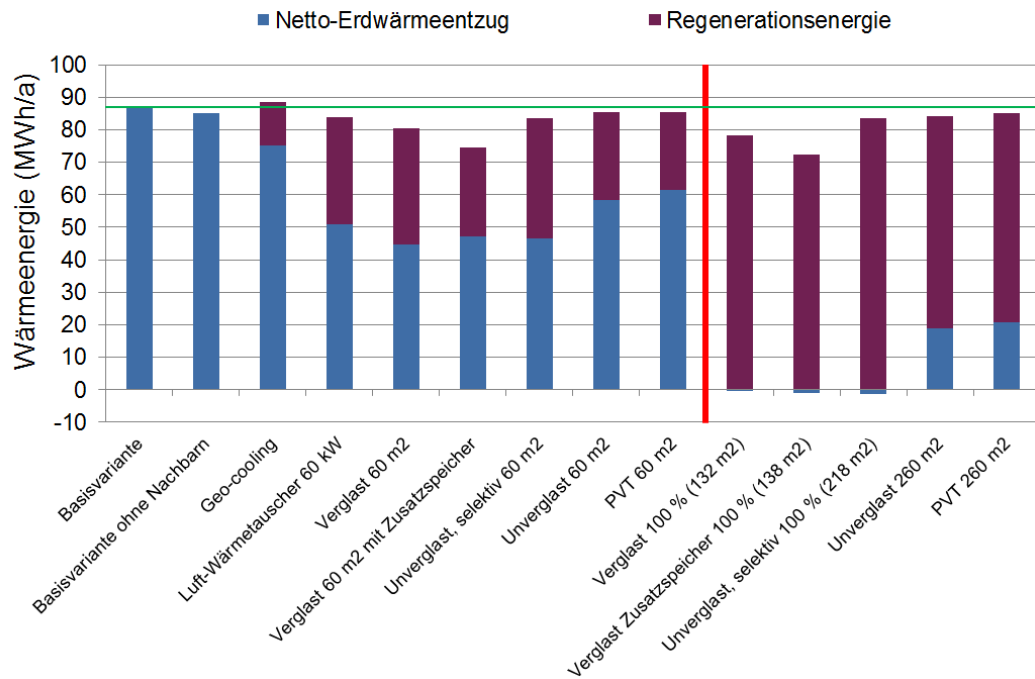


Abbildung 11: Netto-Entzugsenergie des EWS-Feldes und Regenerationsenergie im **ersten Betriebsjahr** der verschiedenen Hydraulikvarianten. Die grüne Linie dient als Vergleich zur Basisvariante. Rechts von der roten Linie sind Varianten mit vollständiger Regeneration dargestellt.

Abbildung 12 präsentiert den Jahres-Nettoentzug der Erdwärmesonden für das erste und das fünfzigste Betriebsjahr. Regenerationsvarianten welche die Differenz zwischen der EWS-Temperatur und der Umgebungstemperatur nutzen (Luft-Wärmetauscher, unverglaste Kollektoren), zeigen nach 50 jähriger Auskühlung des Erdreichs eine deutlich geringeren Netto-Entzug als im ersten Jahr. Grund dafür ist die über die Zeit grösser werdende Auskühlung des Erdreichs, was eine grössere Temperaturdifferenz zur Aussenluft ergibt und damit die Regeneration erhöht.

Zu beachten ist, dass auch nach 50 Jahren keine der Varianten links von der roten Linie eine vollständige Regeneration erreicht. Dies bedeutet, dass in diesen Varianten die EWS-Temperatur auch nach 50 Jahren weiter abnehmen wird.

Für eine 100 % Regeneration schon ab dem ersten Betriebsjahr kommen von den untersuchten Varianten nur die verglasten Kollektoren oder die selektiven, unverglasten Kollektoren in Frage (vergleiche Abbildung 8).

Abbildung 12 zeigt, dass mit einem ausreichend grossem Kollektorfeld die verglasten Kollektoren (132 m²) bzw. die selektiven Kollektoren (218 m²) über die gesamte Nutzungsdauer zu 100 % regenerieren können. Werden Erdwärmesondenfelder in dieser Form regeneriert, ist eine unbeschränkte Erdwärmenutzung gewährleistet.

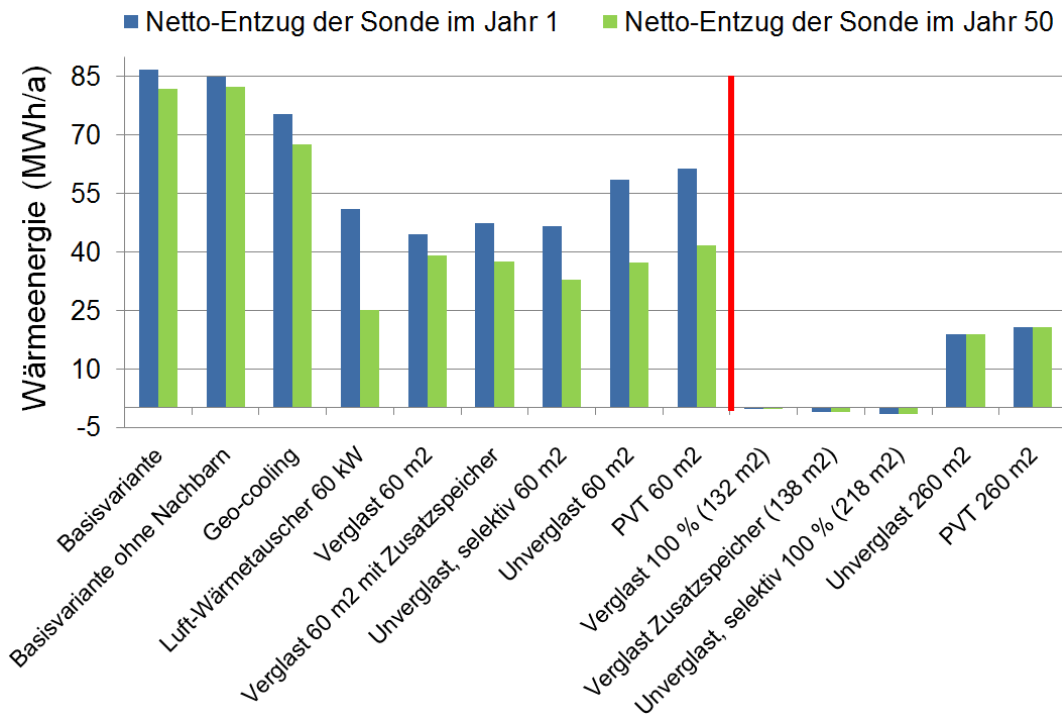


Abbildung 12: Netto-Entzugsenergie der EWS im ersten Betriebsjahr und nach 50 Jahren.

Der elektrische Energieverbrauch bzw. die elektrische Energieproduktion der verschiedenen Systemkomponenten im ersten Betriebsjahr sind in Abbildung 13 dargestellt. Varianten mit hohem Regenerationsanteil (Luft-Wärmetauscher, unverglaste Kollektoren), weisen in der Regel auch einen höheren Bedarf an elektrischer Energie für Umwälzpumpen oder Ventilatoren auf welche für die Regeneration benötigt werden. Die Laufzeit und somit auch der Strombedarf für die Wärmepumpe kann trotzdem nicht deutlich reduziert werden. Somit erhöht sich der Gesamtstrombedarf gegenüber der Basisvariante. Die verglasten Kollektoren können durch die direkte Solarnutzung für das Warmwasser eine deutliche Reduktion des Verbrauchs an elektrischer Energie erzielen, da die Wärmepumpe weniger produzieren muss. Dieser Unterschied wird durch die Variante mit dem solaren Zusatzspeicher verdeutlicht, bei der durch das grössere Speichervolumen die direkte Solarenergienutzung gesteigert werden kann.

Abbildung 14 vergleicht den elektrischen Nettoenergieverbrauch (Wärmepumpe + Pumpen + Luft-Wärmetauscher – PV-Ertrag) im ersten und im fünfzigsten Betriebsjahr. Der Bedarf an elektrischer Energie steigt für alle Simulationsvarianten an, der Hauptgrund dafür ist die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, die mit sinkender Quellentemperatur ebenfalls abnimmt. Bei den Varianten, die erst mittel- bis langfristig mit der abnehmenden EWS-Temperatur einen höheren Regenerationsgrad erreichen (Luft-Wärmetauscher, unverglaste Kollektoren) erhöht sich auch der elektrische Bedarf für die Regenerationspumpe. Der Netto-Bedarf an elektrischer Energie ist bei der PVT Variante auf Grund der photovoltaischen Stromproduktion, die zu 100% angerechnet wurde, mit Abstand am geringsten. Das zweitbeste Resultat erzielen die abgedeckten Solarkollektoren, welche auf Grund der - im Gegensatz zur Wärmepumpe energetisch effizienteren – Warmwasser-Erwärmung durch Solarwärme den Bedarf an elektrischer Energie für die Warmwassererwärmung deutlich reduzieren.

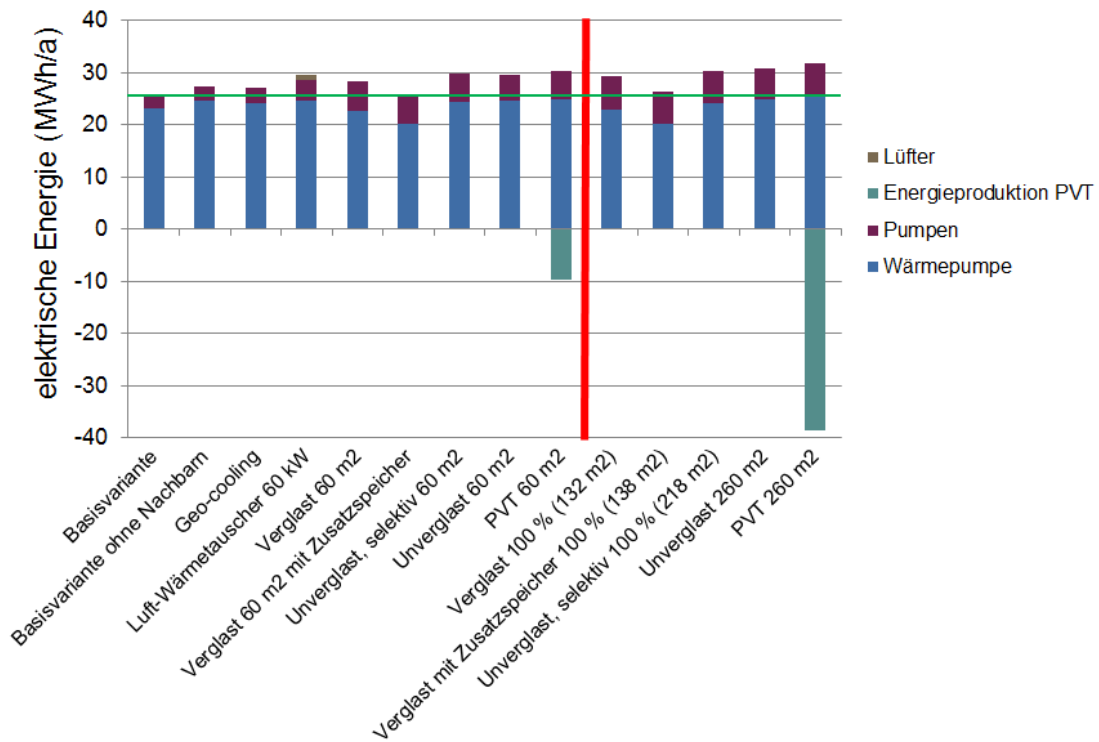


Abbildung 13: Elektrischer Energiebedarf und elektrische Energieproduktion im ersten Betriebsjahr. Grüne Linie dient als Vergleich zur Basisvariante

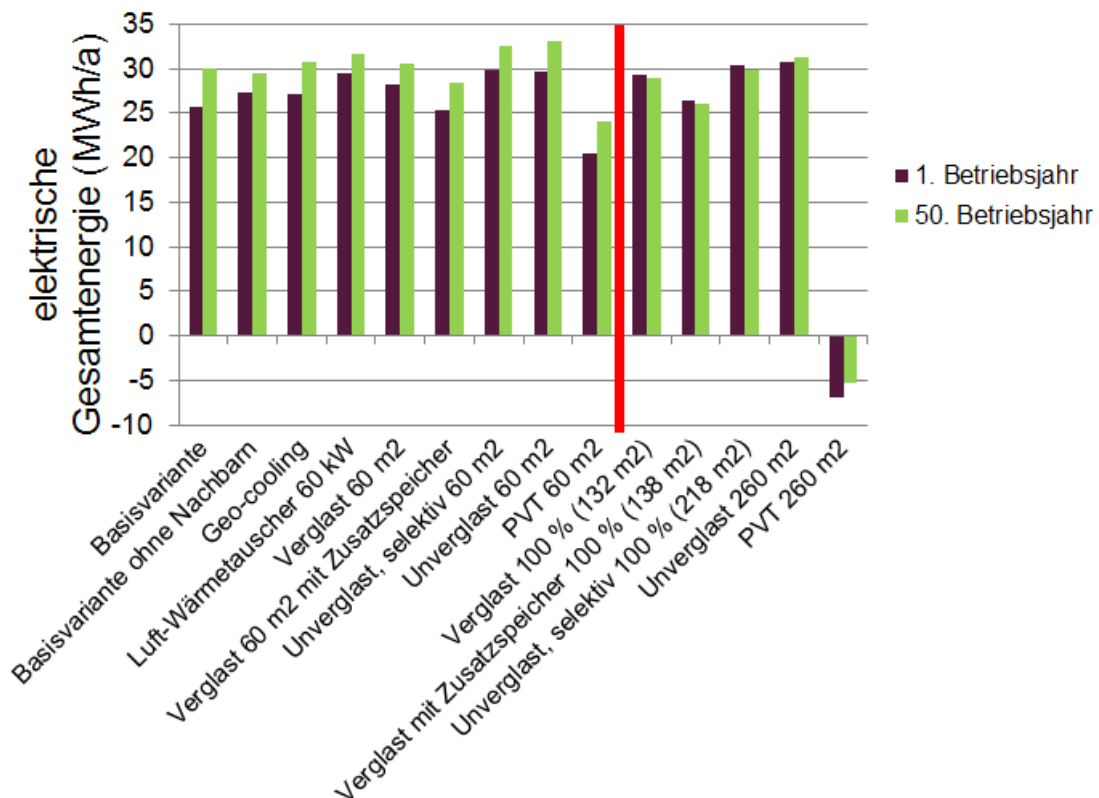


Abbildung 14: Elektrischer Netto-Energiebedarf im ersten und fünfzigsten Betriebsjahr.

7.3 Kosten der verschiedenen Varianten

Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Investitionsausgaben und Kapitalkosten der verschiedenen Regenerationsmethoden. Die hier aufgeführten Kosten beinhalten das EWS-Feld mit Wärmepumpe, die benötigten Wärmespeicher, die Hydraulik und die Verrohrung zwischen EWS-

Feld und Anlage. Die zusätzlichen Investitionen für den Luft-Wärmetauscher bzw. das Kollektorfeld sind mit Verrohrung und Hydraulik (inklusive Wärmeüberträger) bei der jeweiligen Regenerationsvariante berücksichtigt. Eine Übersicht zu den Investitionsausgaben der Systemkomponenten gibt die Tabelle 8 im Anhang B.

Die Stromkosten werden mit einem aktuellen Preis von 23.4 Rp/kWh veranschlagt. Die jährliche Preissteigerung der Stromkosten ist nach dem Variantenvergleichstool der Stadt Zürich mit 1.4 % veranschlagt. Die Einspeisung der PVT-Kollektoren ist beim elektrischen Verbrauch und somit bei den Energiekosten berücksichtigt.

Tabelle 2: Investitionsausgaben und jährliche Kosten der Regenerationsvarianten mit einer Strompreissteigerung von 1.4 %

	Investition [CHF]	Jährliche Kapitalkosten [CHF/a]	Jährliche Instandhaltungskosten [CHF/a]	mittlere Jährliche Energiekosten ^(b) [CHF/a]	mittlere Jährliche Energiekosten 50j ^(c) [CHF/a]	mittlere Jährliche Kosten ^(d) [CHF/a]	spez. jährliche Kosten ^(e) [CHF/kWh]
Basisvariante ohne Nachbarobjekte	184'800,-	10'243,-	2'460,-	8'130,-	8'800,-	21'168,-	0,19
Basisvariante	263'400,-	13'310,-	3'150,-	7'640,-	8'950,-	24'755,-	0,22
Geo-cooling	255'700,-	13'050,-	3'090,-	8'070,-	9'180,-	24'765,-	0,22
LWT (60kW)	201'000,-	11'470,-	2'910,-	8'500,-	9'450,-	23'355,-	0,21
Verglaste Kollektoren ^(a)	236'900,-	13'440,-	3'470,-	8'400,-	9'090,-	25'655,-	0,23
Verglast inkl. Solarspeicher ^(a)	243'700,-	13'950,-	3'530,-	7'190,-	8'090,-	25'120,-	0,22
Unverglaste, selektive Kollektoren ^(a)	215'400,-	12'300,-	3'120,-	8'900,-	9'670,-	24'705,-	0,22
Unverglaste Kollektoren ^(a)	203'500,-	11'420,-	2'810,-	8'830,-	9'850,-	23'570,-	0,21
PVT Kollektoren ^(a)	248'500,-	14'140,-	3'700,-	6'050,-	7'160,-	24'445,-	0,22
Verglast (100 %)	258'700,-	15'656,-	4'340,-	8'730,-	8'600,-	28'661,-	0,25
Verglaste (100 %) inkl Solarpeicher	269'800,-	16'426,-	4'490,-	7'870,-	7'740,-	28'721,-	0,25
Unverglaste, selektive (100 %)	277'900,-	16'900,-	4'730,-	9'040,-	8'870,-	30'585,-	0,27
Unverglaste (260 m ²)	236'300,-	14'040,-	3'710,-	9'180,-	9'340,-	27'010,-	0,24
PVT (260 m ²)	407'800,-	24'850,-	7'350,-	-2'050,-	-1'590,-	30'380,-	0,27

- Kollektorvarianten sind mit 60 m² Kollektorfläche berechnet.
- Die mittleren jährlichen Energiekosten sind mit dem elektrischen Verbrauch im ersten Betriebsjahr berechnet.
- Die mittleren jährlichen Energiekosten sind mit dem elektrischen Verbrauch im 50. Betriebsjahr berechnet.
- Die jährlichen Kosten beinhalten den Mittelwert der beiden Energiekosten.
- Zur Berechnung der spezifischen Kosten wurden die mittleren jährlichen Kosten durch die Nutzenergie für die Raumheizung und das Warmwasser inkl. der Verluste für Zirkulation und Zentrale geteilt.

Wird bei der Auslegung des Erdwärmesondenfeldes die Auswirkung der Nachbar-Objekte berücksichtigt, so resultieren Mehrkosten im Bereich von 2'200 – 4'500 CHF pro Jahr, was einer Kostensteigerung von 10 - 21% gegenüber einem unbeeinflussten Einzelobjekt entspricht. Die

Wärmegestehungskosten steigen entsprechend von 19 Rp/kWh auf 21 – 23 Rp/kWh. Diese Mehrkosten sind ein Resultat von zusätzlichen EWS-Metern, in Kombination mit Massnahmen für die Regeneration.

Unter den in dieser Studie getroffenen Annahmen sind die kostengünstigsten Varianten für das Erreichen des SIA-Kriteriums von -3 °C nach 50 Jahren Betrieb die Regeneration über Luft-Wärmetauscher oder über unverglaste Kollektoren (Kostensteigerung ca. 10% gegenüber unbeeinflusstem EWS-Feld). Beide Techniken sind jedoch nicht geeignet, um eine vollständige Regeneration zu erreichen.

Wird die gegenseitige Beeinflussung statt durch Regeneration durch zusätzliche EWS-Meter kompensiert (Basisvariante), so ist dies nicht nur eine der teuersten Möglichkeiten (Kostensteigerung +17% gegenüber unbeeinflusstem EWS-Feld), sondern gleichzeitig auch die am wenigsten nachhaltige¹⁰.

Kosten für eine vollständige Regeneration

Die Anwendung von verglasten Kollektoren oder selektiven Absorbern erlauben zwar als einzige eine Regeneration zu 100 %, erreichen diese aber mit der in dieser Studie definierten Brutto-Kollektorfläche von 60 m² nicht. Unter den gegebenen Voraussetzungen sind dies die teuersten Varianten zur Erreichung des SIA-Kriteriums. Der Einbau eines zusätzlichen Solarspeicher zur Vorwärmung des Brauchwassers in Kombination mit dem verglasten Kollektorfeld ist letztendlich günstiger (+19% Kostensteigerung) als der Verzicht darauf (+21% Kostensteigerung). Mit den selektiven Absorbern wäre die Regeneration noch günstiger zu haben (+17%).

Um mit verglasten Kollektoren eine vollständige Regeneration zu erreichen, ist eine Kollektorfläche von 132 m² erforderlich – eine Fläche die auf dem Dach des simulierten Mehrfamilienhauses verfügbar wäre. Die Wärmegestehungskosten steigen bei dieser Variante auf 25 Rp/kWh. Dies sind 2.5 Rp/kWh mehr als für die Variante mit den verglasten Kollektoren welche das SIA-Kriterium von -3°C nach 50 Jahren Betrieb knapp erreicht.

Zur vollständigen Regeneration mit selektiven Absorbern werden 218 m² Brutto-Kollektorfläche benötigt – also deutlich mehr Fläche als bei Verwendung von verglasten Kollektoren. Die Wärmegestehungskosten steigen dadurch auf 27 Rp/kWh. Diese Variante ist verglichen mit den verglasten Kollektoren also etwas teurer.

Für die Regeneration zu 100 % gibt es verschiedene Kombinationen aus Kollektorfeldgrösse und Erdwärmesondenlänge. Die hier dargestellten Varianten stellen nur eine der vielen Kombinationen dar. Um die günstigste Variante zu ermitteln, müsste eine weitere Simulationsstudie durchgeführt werden.

Bei der Variante mit PVT Kollektoren wurde bei der Kostenrechnung davon ausgegangen, dass ein Netto-Metering über das Jahr gemacht werden kann, was gleichbedeutend ist mit einem Preis für Einspeisevergütung pro kWh der gleich gross ist wie der Preis für den Strombezug. Unter diesen Voraussetzungen führt die Regeneration mit PVT-Kollektoren zu einer Kostensteigerung von 15% gegenüber dem unbeeinflussten EWS-Feld.

Sensitivität hinsichtlich Stromkosten

Abbildung 15 zeigt die Abhängigkeit des Wärmepreises von der gemachten Annahme zur Strompreissteigerung in den nächsten 50 Jahren. Gegenüber der Basisvariante mit der Annahme von 1.4% Strompreissteigerung pro Jahr rücken die Varianten Luft-Wärmetauscher, unverglaste Kollektoren, PVT-Kollektoren und verglaste Kollektoren (mit zusätzlichem Solarspeicher) deutlich näher zusammen. So dass der Unterschied zwischen diesen Varianten als sensitiv bezüglich der gemachten Annahmen für die Strompreissteigerung bezeichnet werden kann.

¹⁰ Wie die Simulationen auf 60 Jahre gezeigt haben, ist die Abkühlung bei dieser Variante nach 50 Jahren am stärksten.

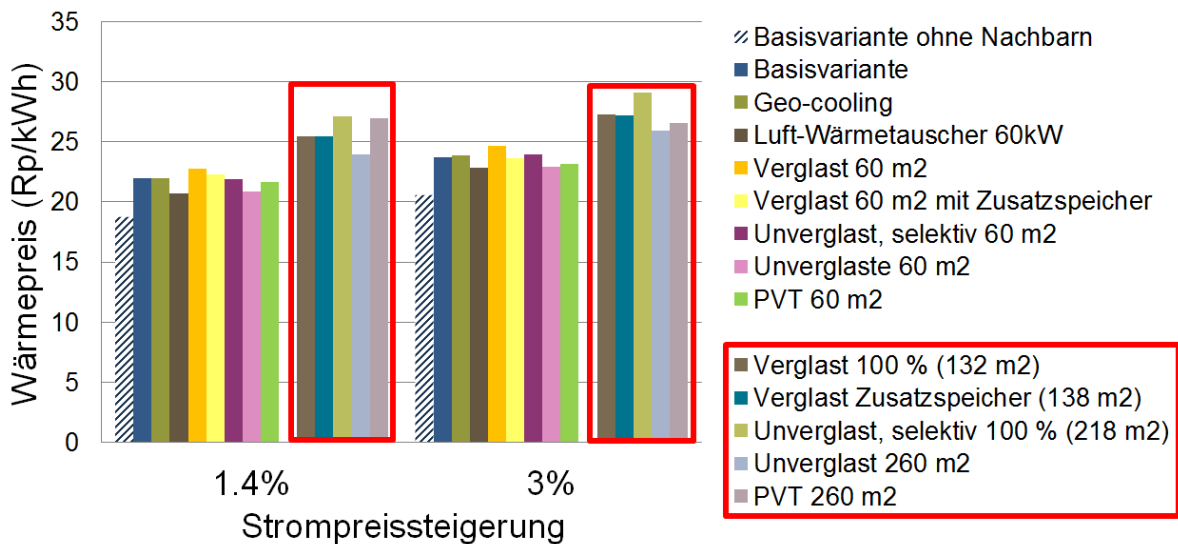


Abbildung 15: Wärmepreis in Abhängigkeit der Annahmen für die Strompreissteigerung.

7.4 Verhalten des EWS-Feldes über 50 Jahre hinaus

Sowohl durch die Varianten Geo-cooling, Luft-Wärmetauscher als auch mit 60 m² Kollektorfläche lässt sich keine 100%-ige Regeneration erreichen. Unter den gegebenen Bedingungen kühlt sich das Erdreich nach dem 50. Betriebsjahr weiter aus. Abbildung 16 zeigt die weitere Abnahme der minimalen EWS-Eintrittstemperatur zwischen dem 50. und dem 60. Betriebsjahr.

Die stärkste Abkühlung ist bei der Variante zu sehen, welche die Beeinflussung durch die Nachbarobjekte durch Mehrlänge kompensiert. Diese Variante ist also nicht nur eine der teuersten, sondern auch die am wenigsten nachhaltige.

Bei der Variante mit 60 m² verglasten Kollektoren kühlt das Erdreich nach dem 50. Betriebsjahr auch noch verhältnismässig stark ab. Durch den Einbau eines zusätzlichen Solarspeichers bei der verglasten Kollektorvariante kann die weitere Auskühlung um 1/3 gesenkt werden. Der zusätzliche Solarspeicher für die Variante mit verglasten Kollektoren führt nicht nur zu einem tieferen Wärmepreis, er führt auch zu einem nachhaltigeren Ergebnis.

Mit der fortlaufenden EWS-Auskühlung durch die Erdwärmenutzung können sowohl der Luft-Wärmetauscher als auch die unverglasten Kollektoren über die Betriebsjahre den Regenerationsanteil erhöhen, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Erdreich und der Umgebung mit der Zeit zunimmt. Diese beiden Varianten verursachen nur noch eine sehr geringe weitere Abkühlung der EWS um 0.1 K bzw. 0.2 K, d.h. die Temperatur im Boden ist annähernd stationär. **Unter den gegebenen Bedingungen** ermöglichen diese beiden Varianten eine nahezu nachhaltige Erdwärmenutzung über 50 Jahre Betriebszeit hinaus.

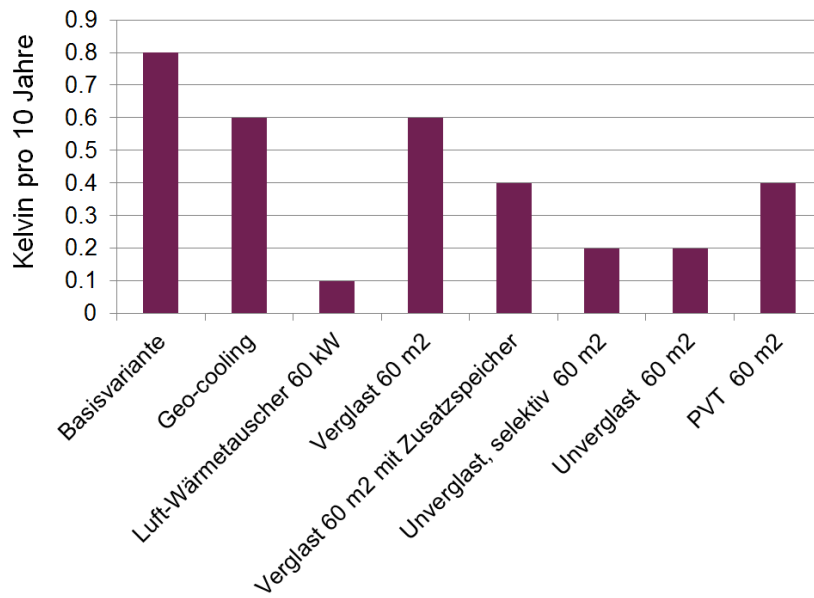


Abbildung 16: Zusätzliche Abkühlung der EWS im 60. Betriebsjahr im Vergleich zum 50. Betriebsjahr.

8 Technisches Fazit

Diese Studie wurde durchgeführt, um Methoden zu vergleichen, mit denen die gegenseitige Beeinflussung benachbarter EWS-Anlagen durch aktive Regeneration oder zusätzliche EWS kompensiert werden kann. Im Rahmen der Studie wurde untersucht, wie sich verschiedene Wärmequellen zur Regeneration von EWS-Feldern eignen, welche Regenerationsgrade mit den verschiedenen Methoden erreicht werden können, und welche Auswirkung die Regeneration auf die Wärmegestehungskosten hat.

Anhand der erarbeiteten Simulationsergebnisse, und mit den getroffenen Annahmen, können folgende Aussagen getroffen werden:

- Werden Nachbar-Objekte bei der Auslegung berücksichtigt, so ergibt sich eine massiv stärkere EWS-Auskühlung auf lange Zeit. Bei den in dieser Studie getroffenen Annahmen, welche eine Geothermie-Nutzungsdichte von ca. $35 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ abbilden, kühlen sich die EWS nach 50 Jahre gegenüber einer Situation ohne benachbarte EWS-Anlagen um zusätzlich 7 K ab.
- Bereits durch Teil-Regeneration kann der Langzeitauskühlung bei dichter Erdwärmennutzung entgegen gewirkt werden. Das erlaubt eine höhere Erdwärmennutzungsdichte und/oder eine längere Betriebszeit der EWS-Felder.
- Falls eine vollständige Regeneration (100%) angestrebt werden soll, ist dies unter den betrachteten Möglichkeiten nur mit grossen abgedeckten oder selektiv- ungedeckten Kollektorfeldern möglich. Unter den getroffenen Annahmen ist eine vollständige Regeneration aber nicht erforderlich.
- Die Variante, die Erdwärmesonden bei Auslegung länger zu dimensionieren, um über einen Zeitraum von 50 Jahren Frostfreiheit des EWS-Nahbereichs zu garantieren, ist sowohl ökonomisch (Wärmegestehungskosten) als auch aus Sicht der Nachhaltigkeit (fortschreitende Auskühlung nach 50 Jahren) nicht zu empfehlen. Eine aktive Regeneration ist in der Regel günstiger und auf jeden Fall nachhaltiger.
- Die Unterschiede zwischen den Wärmegestehungskosten mit verschiedenen Methoden zur Regeneration sind gering. Daher kann keine der Regenerationsmethoden favorisiert werden. Die Regenerationsmethode kann somit in Abhängigkeit der konkreten Anwendungssituation gewählt werden.

Aus technischer Sicht ist es möglich, eine aktive Regeneration auch erst beim Erreichen einer kritischen Nutzungsdichte nachzurüsten. Das bedeutet, dass die Erdwärmesonden wie gewohnt ausgelegt werden können. Ist jedoch in der Nachbarschaft eine kritische Nutzungsdichte vorhanden, sollte grossflächig (bei allen Objekten in der Nachbarschaft) eine Regeneration eingeplant werden. Für bestehende Anlagen bedeutet dies, dass beim Erreichen einer kritischen Nutzungsdichte eine Regeneration nachgerüstet werden muss. Je tiefer die Temperaturen beim Zeitpunkt des Nachrüstens bereits gesunken sind, desto höher sollte der Regenerationsgrad ausgelegt werden. Falls eine kritische Temperatur bereits erreicht wurde, kann ein weiterer Temperaturabfall nur noch mit einer vollständigen Regeneration verhindert werden. Die hier untersuchten Teilregenerationen sind nur möglich, wenn sie bereits beim Zeitpunkt des Erreichens einer hohen EWS Dichte in der Nachbarschaft (und nicht erst beim Erreichen der kritischen Temperatur) installiert werden.

Der Einsatz der jeweiligen Regenerationstechnik hängt letzten Endes von verschiedenen Faktoren ab:

- von der EWS-Dichte vor Ort und der Stärke der Auskühlung;
- vom Regenerationsgrad, welcher erreicht werden soll;

- von den Möglichkeiten der jeweiligen Regenerationstechnik beim konkreten Bauvorhaben und den Präferenzen des Bauherrn.

In dieser Studie wurde von einer Nutzungsdichte von 35 kWh/m²/a ausgegangen. Es wurde nicht untersucht wie die Resultate bei anderen Nutzungsdichten ausfallen würden.

9 Literatur

9.1 Literaturverzeichnis

Cimmino, M. & Bernier, M., 2014. *A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 70(0), p.641–650.

Eskilson, P., 1987. *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. PhD Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund.

Fink, C; Müller, T, 2009. *Thermische Solarenergienutzung im Geschloßwohnbau- Ein Leitfaden für Planung Umsetzung und Betriebsführung*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

Jakob, M., Flury, K., & Gross, N., 2012. *Energiekonzept 2050 für die Stadt Zürich – Auf dem Weg zu einer 2000-Watt-tauglichen Wärmeversorgung*. Im Auftrag des Departements der Industriellen Betriebe und des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich, Bericht vom 27. Juni, 2012. (unveröffentlicht).

Jakob, M., Flury, K., Gross, N., Martius, G. & Sunarjo, B., 2014. *Konzept Energieversorgung 2050 - Szenarien für eine 2000-Watt-kompatible Wärmeversorgung für die Stadt Zürich, Kurzbericht*. Im Auftrag des Departements der Industriellen Betriebe und des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich.

Meister, D., 2014. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, Abteilung Gewässerschutz, E-Mail vom 25.6.2014.

Schmid, F., 2014. *Dichter Einsatz von Erdwärmesonden, ungelöste räumliche und rechtliche Fragen*. Seminar Erdwärmesonden / Grundwassernutzung für Bewilligungs- und Vollzugsbehörden, Schweizerischer Nationalfonds (SNF), Bern, 24. April 2014.

Wagner, R., & Weisskopf, T. *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich*. Im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2014 (Download www.stadt-zuerich.ch/egt -> Projekte realisiert)

Normen und Richtlinien

SIA 384/6:2010. Erdwärmesonden. SIA, Zürich, 2010

10 Anhang A: Nachbar-g-Funktion

Ursprünglich berechneten Eskilson und auch andere Autoren g-Funktionen für ein EWS-Feld mit numerischen Verfahren, welche darauf beruhen, dass das EWS-Feld – eventuell unter Ausnützung von Symmetrien - in einer numerischen Simulation abgebildet und simuliert wird. Im Anschluss an die Simulation wurde die g-Funktion für die entsprechende Feld-Geometrie über ein Polynom angenähert, dessen Koeffizienten mit Hilfe der Simulationsresultate ermittelt wurden. Inzwischen sind jedoch auch semi-analytische Methoden zur Berechnung von g-Funktionen verfügbar (Cimmino & Bernier, 2014), welche sehr gute Übereinstimmung mit den bekannten numerischen Modellen aufweisen (Eskilson, 1987). Dabei wird die Auskühlung aller Erdwärmesonden in einem Feld gemittelt.

Mit dem Ziel eine Nachbar-g-Funktion zu definieren wurde die semi-analytische Methode leicht abgeändert, und nur der Einfluss aller Erdwärmesonden des Feldes auf die mittlere Erdwärmesonde betrachtet.¹¹

In Abbildung 17 wird die aus der Betrachtung der Mittelerdwärmesonden resultierende g-Funktion für steigende Feldgrößen und für eine EWS-Länge von 200 m bei einem Abstand von 20 m dargestellt. Dabei zeigt sich, dass zwischen den Feldgrößen 41 x 41 und 101 x 101 erst nach ca. 1'000 Jahren ein Unterschied auszumachen ist. Daher kann der Einfluss eines 41 x 41 EWS-Feldes bereits als gute Näherung für ein unendliches EWS-Feld angesehen werden. Hier wurden aber 101 x 101 EWS-Felder als Annäherung eines unendlichen Feldes verwendet. Dies würde einer hohen Geothermienutzungsdichte in einem ganzen Stadtgebiet entsprechen.

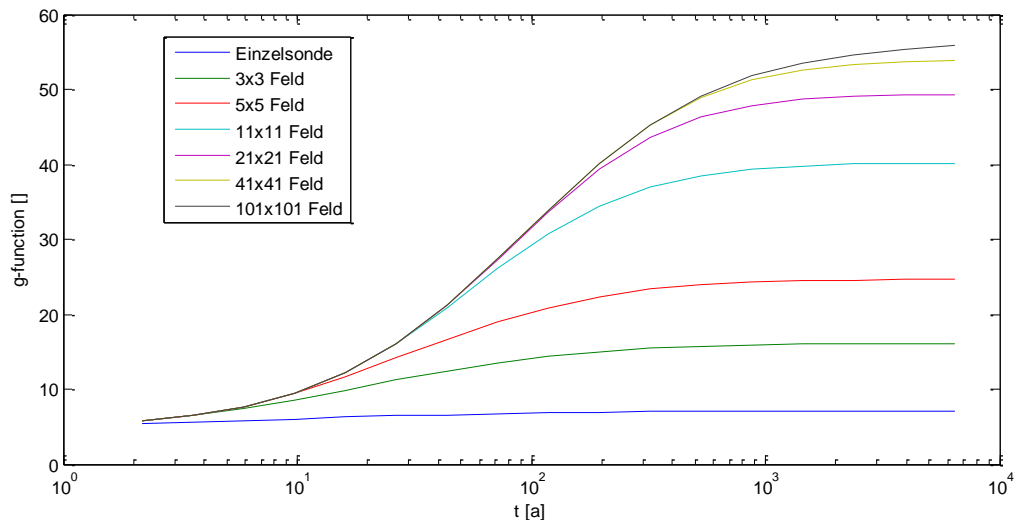


Abbildung 17: g-Funktion der zentralen EWS, umgeben von unterschiedlich grossen Feldern mit derselben Entzugsleistung. EWS-Länge 200 m; quadratisches Raster mit EWS-Abstand 20 m; Leitfähigkeit $2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Die Zeit ist hier bewusst in Jahren und nicht in einer dimensionslosen Einheit angegeben.

Der Effekt der Nachbarn oder eben die „Nachbar g-Funktion“ kann quantifiziert werden indem die g-Funktion der Einzel-EWS von der g-Funktion des 101x101 EWS-Feldes abgezogen wird. In der Abbildung 18 werden die „Nachbar g-Funktionen“ für unterschiedlichen Abstand (B)/EWS-Länge (H) Verhältnisse aufgezeigt. Die abgebildeten Kurven entsprechen einer Variation der EWS-Länge von 100 m bis 300 m bei gleichbleibendem Abstand von 20 m. In Abbildung 19 werden dieselben „Nachbar g-Funktionen“ in Abhängigkeit der realen Zeit in Jahren dargestellt (unter

¹¹ Normalerweise wird dies für alle Sonden des Feldes gemacht und anschliessend gemittelt

Verwendung der oben definierten typischen Parameter). Dabei zeigt sich, dass nach 50 Jahren noch lange kein stabiler Zustand eingetroffen ist. Mit den typischen Annahmen für Zürich (siehe oben) entspricht der dimensionslose g-Funktions-Wert von ca. 14 nach 50 Jahren einem zusätzlichen Temperaturabfall von ca. 7 K, der durch die Nachbarfelder verursacht wird.

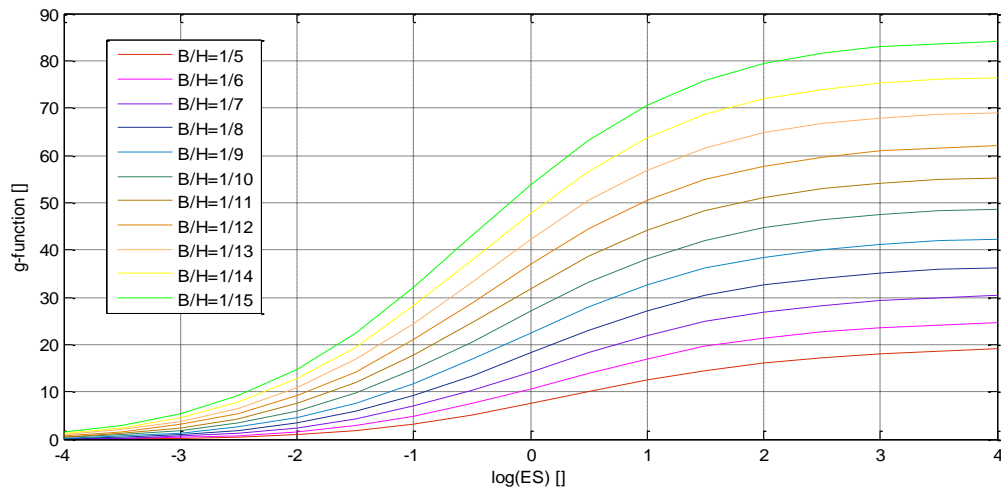


Abbildung 18: Nachbar g-Funktion für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Abstand und EWS-Länge (B/H). Die angegebenen Kurven entsprechen der Variation der EWS-Länge von 100 bis 300 m, bei einem gleich bleibenden Abstand von 20 m.

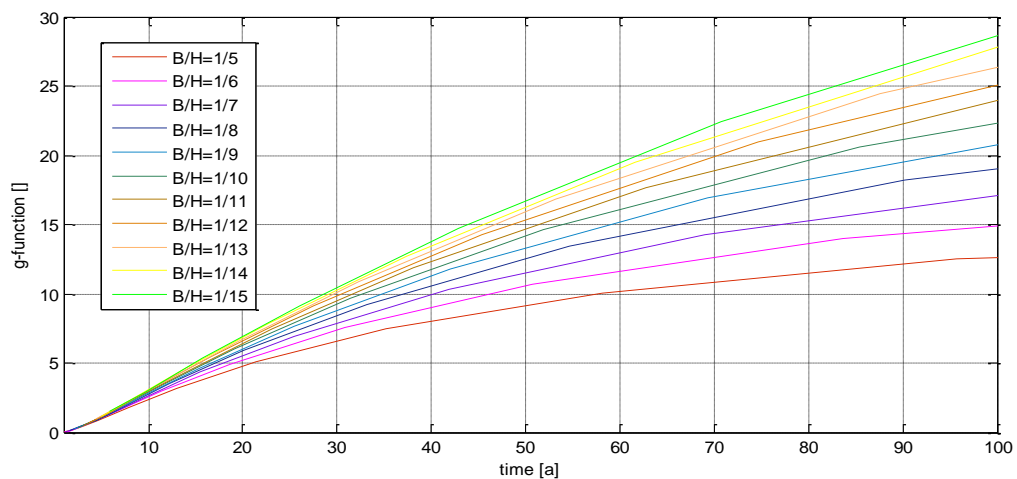


Abbildung 19: Nachbar g-Funktion für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Abstand und EWS-Länge (B/H) wie in Abbildung 18, für einen Abstand (B) von 20 m, aber als Funktion der Zeit in Jahren dargestellt.

11 Anhang B: Auslegung der simulierten Komponenten

Tabelle 3: Angaben zum MFH Minergie renoviert und zum Warmwasserbedarf.

Gebäude		
Wohnfläche	[m ²]	1200
Gebäudelänge (süd)	[m]	40
Gebäudebreite	[m]	10
Soll-Raumtemperatur	[°C]	20
Dachneigung für Kollektorvarianten	[°]	45
U-Wert	[W/(m ² K)]	0.41
Spezifische Heizlast	[W/ m ²]	40
Spezifischer Heizenergiebedarf	[kWh/m ²]	60
Jahres Heizenergiebedarf ca.	[MWh]	72
Warmwasserbedarf		
Zapfmenge	[l/Tag]	1450
Zapftemperatur	[°C]	50
Temperatur im WW-Speicher	[°C]	60
Jahresbedarf ca.	[MWh]	24
Verluste für Zentrale und Zirkulation bezogen auf den WW-Bedarf	[%]	70
	[MWh]	16,8

Tabelle 4: Detailangaben zu den Basisvariante-Systemkomponenten.

Erdwärmesonde (Doppel-U-Sonde) PE 100 RT		
Aussendurchmesser Rohr	[mm]	40
Innendurchmesser Rohr	[mm]	32.6
Anzahl Erdwärmesonden	[-]	6
EWS-Tiefe	[m]	s. Tabelle 1
EWS-Abstand für die Geocooling-Variante	[m]	10
EWS-Abstand für die anderen Varianten	[m]	6
Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	[W/mK]	0.8
Pumpe Erdwärmesonde		
Druckverlust (EWS, Zuleitung, WT)	[bar]	1
Durchfluss (3-4 K Spreizung)	[l/h]	8230
Pumpenleistung	[kW]	0.6
Pumpenstrombedarf/WP-Strombedarf	[%]	ca. 4
Erdreich (Feinsandstein)		
Dichte	[kg/m ³]	2550
Spezifische Wärmekapazität	[J/KgK]	825
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	2.5
Ungestörte Oberflächentemperatur	[°C]	10.7
Axialer Temperaturgradient	[K/m]	0.03
Speicher Gebäudeheizung		

Volumen	[l]	900
Höhe	[m]	1.7
U-Wert Wärmedämmung	[W/mK]	0.038
Dämmstärke	[mm]	80
Speicher Warmwasser		
Volumen	[l]	1500
Höhe	[m]	1.9
U-Wert Wärmedämmung	[W/mK]	0.038
Dämmstärke	[mm]	80
Fläche Interner Wendel-Wärmetauscher	[m ²]	10
Wärmepumpe		
CTA OH 48e (zweistufig, parallel)		
Kältemittel	[-]	R-410A
Heizleistung B0/W35	[kW]	47.8
COP bei B0/W55	[-]	4.33
Nenndurchfluss	[l/h]	8230
Fussbodenheizung		
Max. Durchfluss Verteilungen (Simulationen)	[l/h]	5000
Maximale Vorlauftemperatur	[°C]	35
Flächenheizungsindex	[-]	1.1

Tabelle 5: Luft-Wärmetauscher (Luftinheit) Cabero GCHD089KB/2S-30D25, auf 60 kW Nennleistung skaliert.

Luft-Wärmetauscher		
Leistung	[kW]	60
Fluid Ein-/Austrittstemperatur	[°C]	10/15
Luft Ein-/Austrittstemperatur	[°C]	25/18.3
Fluid Volumenstrom	[l/h]	9534
Luft Volumenstrom	[l/s]	3614
Fluid Inhalt	[l]	66
Pumpenleistung	[kW]	0.6
Ventilator Aufnahmeleistung	[W]	494

Tabelle 6: Angaben zu den zusätzlichen Systemkomponenten der Solarvarianten.

Speicher Warmwasser		
Volumen	[l]	1500
Höhe	[m]	1.9
U-Wert Wärmedämmung	[W/mK]	0.038
Dämmstärke	[mm]	80
Fläche Interner Wendel-Wärmetauscher (WP)	[m ²]	10
Fläche Interner Wendel-Wärmetauscher (Solar) (0.2 m ² WÜ pro m ² Koll)	[m ²]	10
Solarspeicher		
Volumen	[l]	1500
Höhe	[m]	1.9

U-Wert Wärmedämmung	[W/mK]	0.038
Dämmstärke	[mm]	80
Fläche Interner Wendel-Wärmetauscher (Solar) (0.2 m ² WÜ pro m ² Koll)	[m ²]	10

Externer Platten-Wärmetauscher (Regeneration)

Übertragungskapazität für 20m ² Kollektorfläche	kW/K	2.1
Übertragungskapazität für 60m ² Kollektorfläche	kW/K	6.3
Übertragungskapazität für 260m ² Kollektorfläche	kW/K	25

Pumpe Kollektor

Druckverlust (Kollektor, Zuleitung, WT)	[bar]	0.6 - 0.8
Durchsatz	[l/hm ²]	40
Pumpenleistung für 20m ² Kollektorfläche	[kW]	
Pumpenleistung für 60m ² Kollektorfläche	[kW]	0.25
Pumpenleistung für 260m ² Kollektorfläche	[kW]	0.6

Tabelle 7:Leistungs-Kennwerte für Kollektoren und Absorber zur Regeneration.

Verglaste Kollektoren

Aperturfläche	[m ²]	54
Eta0	[-]	0.8
a1	[W/m ² K]	3.5
a2	[W/m ² K ²]	0.02

Unverglaste Kollektoren (selektive)

Aperturfläche	[m ²]	53.13
Eta0	[-]	0.954
ϵ/α	[-]	0
bu	[s/m]	0.01
b1	[W/m ² K]	9
b2	[Ws/m ³ K]	3.77

Unverglaste Kollektoren (nicht selektiv)

Aperturfläche	[m ²]	53.76
Eta0	[-]	0.77
ϵ/α	[-]	0.85
bu	[s/m]	0.038
b1	[W/m ² K]	13.13
b2	[Ws/m ³ K]	4.41

PVT Kollektoren (unverglast, selektiv)

Aperturfläche	[m ²]	54.16
Eta0	[-]	0.66
ϵ/α	[-]	0.85
bu	[s/m]	0.055
b1	[W/m ² K]	12.2
b2	[Ws/m ³ K]	1.5

Tabelle 8: Investitionsausgaben der Komponenten

Komponente	Kosten	Kosten- einheit	Nutzungsdauer [Jahre]
Erdwärmesonde inkl. Bohrung	68	SFr/m	50
Pumpenstation(EWS-Pumpe)	1900	SFr	20
Anschlussleitungen Erdwärmesonde (EWS)	2090	SFr/EWS	40
Dämmung (zw. Verteiler und WP)	900	SFr	20
WP komplett (zweistufige WP "CTA OH 48e")	27550	SFr	15
Hydr. Einbindung WP inkl. Solefüllung	16100	SFr	15
Heizungsspeicher 900 L	1980	SFr	20
Dämmung zw. WP und Speicher	800	SFr	15
Heizgruppen	4500	SFr	15
Dämmung für Heizgruppe und Verteilung	1200	SFr	15
Warmwasserspeicher 1500 L inkl. Dämmung	11500	SFr	15
Geocooling Wärmeübertrager	2500	SFr	30
Pumpe Luft-Wärmetauscher	1900	SFr	20
<i>Luft-Wärmetauscher 60 kW inkl. Dachsockel</i>	<i>13400</i>	<i>SFr</i>	<i>20</i>
<i>Anschlussleitungen inkl. Dämmung (40m vom Dach in Keller)</i>	<i>4920</i>	<i>SFr</i>	<i>20</i>
<i>Verglaste Kollektoren inkl. Anschlüsse, Transport, Montage</i>	<i>615</i>	<i>SFr/m2</i>	<i>20</i>
<i>Unverglaste Kollektoren, selektiv inkl. Anschlüsse, Transport, Montage (Energie-Solaire)</i>	<i>440</i>	<i>SFr/m2</i>	<i>20</i>
<i>Unverglaste Kollektoren inkl. Anschlüsse, Transport, Montage (Fafco)</i>	<i>200</i>	<i>SFr/m2</i>	<i>20</i>
<i>PVT Kollektoren komplett installiert (MB: 1000,-) (Sunprofis 465,-)</i>	<i>750</i>	<i>SFR/m2</i>	<i>20</i>
<i>Befüllung Solarkreis</i>	<i>3.5</i>	<i>SFr/Liter</i>	<i>20</i>
<i>Pumpe Solarstation</i>	<i>920</i>	<i>SFr</i>	<i>20</i>
<i>Anschlussleitung 40 m inkl. Umschalthydraulik (Kollektorseitig und EWS-Seitig)</i>	<i>3980</i>	<i>SFr</i>	<i>40</i>
<i>Dämmung der 40m Anschlussleitung</i>	<i>1000</i>	<i>SFr</i>	<i>20</i>
<i>Wärmeübertrager Kollektro/EWS (6300W/K)</i>	<i>1200</i>	<i>SFr</i>	<i>30</i>
<i>Solarspeicher 1500 Liter</i>	<i>8000</i>	<i>SFr</i>	<i>20</i>

Variantenvergleich Energiesysteme - Version 2.0

© Stadt Zürich, Amt für Hochbauten - Alle Rechte vorbehalten

Grunddaten

Kapitalzinssatz (real) 2.5%

Instandhaltungskostensteigerung (real)

Energieträger	Wirtschaftlichkeit							Ökologie				MINERGIE Gewichtung
	Leistungs- preis (pro Jahr) [Fr./kW]	Preisanteil Energie [Rp./kWh]	Preisanteil Netz- nutzung [Rp./kWh]	Preisanteil Abgaben [Rp./kWh]	Zuschlag für Umwelt- kosten [Rp./kWh]	Arbeits- preis inkl. Zuschlag [Rp./kWh]	Preis- steigerung (linear) [%/a]	Primärener- gie nicht erneuerbar [kWh/kWh]	Primär- energie erneuerbar [kWh/kWh]	Treibhaus- gas- Emissionen [kg/kWh CO _{2e}]	Umwelt- belastungs- punkte [UBP/kWh]	
Elektrizität Stadt Zürich Verwaltungsmix	Hochtarif	9.6	6.6	2.2		18.5						2.0
	Niedertarif	5.3	3.3	1.4		10.1	1.4	1.536	0.703	0.0907	286.2	
ewz.ökopower	WP, Hochtarif	7.9	6.6	2.2		16.7						
	WP, Niedertarif	4.5	3.3	1.4		9.2						
ewz.naturpower	Hochtarif	12.5	6.6	1.7		20.8						
	Niedertarif	8.3	3.3	0.8		12.4	1.4	0.060	1.110	0.0148	68.0	
ewz.wassertop	WP, Hochtarif	10.8	6.6	1.7		19.1						
	WP, Niedertarif	7.4	3.3	0.8		11.5						
ewz.solartop	Hochtarif	9.6	6.6	2.2		18.5						
	Niedertarif	5.3	3.3	1.4		10.1	1.4	2.340	0.480	0.1336	406.4	
CH-Verbrauchermi	Hochtarif	11.1	6.6	1.7		19.3	1.4	0.030	1.110	0.0094	59.4	
	Niedertarif	6.8	3.3	0.8		10.9						
Netzurückspeisung erneuerbar	Hochtarif	63.2			7.3	63.2	1.4	0.350	1.240	0.0803	174.2	
	Niedertarif	63.2				63.2						
Netzurückspeisung nicht erneuerbar	Hochtarif	23.4				30.7	1.4	2.650	0.440	0.1360	376.0	
	Niedertarif	23.4				30.7						
Lokales Produkt A	Hochtarif	20.0				20.0	1.4					
	Niedertarif	10.0				10.0						
Lokales Produkt B	Hochtarif	10.0				10.0	1.4					
	WP, Hochtarif	5.0				5.0						
Lokales Produkt C	WP, Niedertarif						1.4					
	WP, Niedertarif											

Abbildung 20: Screenshot des AHB-Variantenvergleichstool, Grunddaten.

Variantenvergleich Energiesysteme - Version 2.0

© Stadt Zürich, Amt für Hochbauten - Alle Rechte vorbehalten

MFH RegenOpt

Variante 1: Grundhydraulik

Jährliche Energiekosten (ohne Umweltkosten)

Energieträger	Leistungspreis [CHF/a]	Verbrauch [kWh/a]	Berechnungspreis Energie [Rp./kWh]	Heutige jährliche Energiekosten [CHF/a]
Elektrizität				
Elektrizität, Hochtarif	Anteil: 70%	2'007	23.4	470.-
Elektrizität, Niedertarif	Anteil: 30%	860	23.4	200.-
Elektrizität Wärmepumpen, HT	Anteil: 70%	19'018	23.4	4'450.-
Elektrizität Wärmepumpen, NT	Anteil: 30%	8'151	23.4	1'910.-

Abbildung 21: Screenshot des AHB-Variantenvergleichstool, Strompreise.