



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 19. März 2010

Langzeiterfahrungen mit Erdwärmesonden- Systemen in der Schweiz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Geowatt AG
Dohlenweg 28, 8050 Zürich
www.geowatt.ch

Autor(en):

Sarah Signorelli, signorelli@geowatt.ch
Sabin Imhasly, imhasly@geowatt.ch
Ernst Rohner, rohner@geowatt.ch
Ladislaus Rybach, rybach@geowatt.ch

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152'924 / 103'022

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist/sind ausschliesslich der/die Autor/en dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Erdwärmesonden-Systeme sind in der Schweiz weit verbreitet und bieten eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative zu anderen Heizsystemen. In diesem Projekt werden die Betriebserfahrungen mit Erdwärmesonden-Systemen, welche seit Jahrzehnten in der Schweiz in Betrieb stehen, erfasst und beurteilt. Die Auswertung erlaubt die Nachhaltigkeit der Langzeitproduktion zu bewerten.

Als erster Projektschritt wurden "alte" Anlagen eruiert und bei ihren Besitzern eine Umfrage durchgeführt. Der Schwerpunkt lag darin, herauszufinden, wie Erdwärmesondenanlagen über längere Zeit laufen und wie zufrieden die Besitzer mit ihrer Anlage sind. Die Auswertung der Fragenbogen zeigte, dass praktisch alle Anlagen noch im Betrieb sind. Rund 90 % der Anlagebesitzer sind zufrieden bis sehr zufrieden und würden sich wieder für dieses System entscheiden.

Die meisten Anlagen funktionieren immer noch einwandfrei. Die wenigen aufgetretenen Probleme bezogen sich meistens auf die Wärmepumpe oder die Erdwärmesonde. Bei den Erdwärmesonden beruht die Hälfte der Probleme auf unterdimensionierte Sondenlängen. Es empfiehlt sich, auf eine fachgerechte Auslegung der Erdwärmesonde zu achten.

Die Befragung zeigt auch, dass durch den Ersatz der alten Wärmepumpen durch eine neue mit höherem COP die Erdwärmesonden überlastet werden können. Bei einem Ersatz muss daher abgeklärt werden, ob die vorhandenen Erdwärmesonden der Verdampferleistung der Ersatzwärmepumpe genügen. Es ist wichtig, dass die Wärmepumpe mit den Erdwärmesonden abgestimmt ist. Wichtige Hinweise zur fachgerechten Auslegung und Ausführung von Erdwärmesondensystemen sind in der SIA Norm 384/6 enthalten.

Die generelle Zufriedenheit der Besitzer von Erdwärmepumpen-Anlagen haben auch zwei kürzlich abgeschlossene Studien in Deutschland aufgezeigt; die meisten Bauherren würden sich wieder für die Erdwärme-Lösung entscheiden. Allerdings reicht die Erfahrungszeit wesentlich weniger weit zurück, als in der vorliegenden Studie.

In einem zweiten Projektschritt wurden Messdaten von zwei Anlagen analysiert und numerisch nachsimuliert. Die Vorwärtssimulation beider Anlagen für eine Betriebszeit von 50 Jahren zeigt, dass der Betrieb von Erdwärmesonden-Anlagen nachhaltig ist. Mit einer Analyse der Betriebsdaten konnte weiter aufgezeigt werden, dass die Wärmegestehungskosten überaus konkurrenzfähig sind.

Gesamthaft erwiesen sich die Anlagen auch im Langzeit-Betrieb als zuverlässig, womit die Nachhaltigkeit der Produktivität garantiert ist – ein auch im internationalen Vergleich bemerkenswertes Resultat, da der Nachweis zum ersten Mal anhand von Daten an funktionierenden Anlagen erbracht wird.

Abstract

Borehole heat exchanger (BHE) systems are widely-used in Switzerland and they provide an economically and ecologically reasonable alternative to other heating systems. In this project, experiences with BHE systems that have been operating for decades in Switzerland were registered and evaluated. The analysis allows the assessment of the long-term production's sustainability.

As a first project step, „old“ facilities were investigated and a survey was conducted among the owners. The focus was on finding out how well the borehole heat exchangers operate on the long run and how satisfied the owners are with their system. The analysis of the survey showed that practically all facilities are still operating. About 90 % of the owners are satisfied or very satisfied and would choose such a system again.

Most facilities still operate faultlessly. The few problems that arose could mostly be linked to the heat pump or the borehole heat exchanger. Half of the problems concerning the borehole heat exchanger are due to underdimensioned BHE length. It is recommended to pay attention to the professional design of the borehole heat exchanger.

The survey also shows that borehole heat exchangers can be overloaded, if an old heat pump is replaced by a new one with a higher COP. Therefore for any replacement, it should be clarified that the existing borehole heat exchanger is adequate to the evaporator capacity. The heat pump and the borehole heat exchanger have to be adjusted to each other. Important information about the professional dimensioning and operation of BHE are included in the SIA 384/6 norm.

The general satisfaction of owners of ground-source heat pump systems has also been shown by two studies recently published in Germany; Most constructors would choose a ground heat solution again. Yet the timescale of these studies is essentially smaller than the timescale for the data presented herein.

In a second project step, data of two facilities has been analyzed and resimulated numerically. Forward modelling of both facilities for an operation period of 50 years shows that the operation of BHE systems is sustainable. Furthermore, by analyzing the operating data it could be shown that the heat generation costs are clearly competitive.

In general, the facilities proved to be reliable in the long run, too, which guarantees sustainability of productivity. This result is also remarkable by international comparison, since this evidence has been provided for the first time on the basis of data from operating facilities.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Befragung zum Langzeitverhalten von Erdwärmesonden-Systemen	6
2.1	Vorgehen	6
2.2	Auswertung der Umfrage.....	7
2.2.1	Betriebsstatus	7
2.2.2	Zufriedenheit mit der Anlage und erneute Wahl des Heizsystems	8
2.2.3	Probleme und Reparaturen	9
2.2.4	Änderungen an Gebäudestruktur	11
2.2.5	Ersatz der Wärmepumpe.....	12
3.	Analyse der Betriebsdaten von Erdwärmesonden-Systemen.....	14
3.1	Vorgehen	14
3.2	Anlage 1.....	14
3.2.1	Beschreibung der Anlage 1	14
3.2.2	Messdaten	15
3.2.3	Berechnung des Betriebsverhaltens	18
3.2.4	Schlussfolgerung	21
3.3	Anlage 2.....	21
3.3.1	Beschreibung der Anlage 2	21
3.3.2	Messdaten	22
3.3.3	Berechnung des Betriebsverhaltens	23
3.3.4	Schlussfolgerung	26
3.4	Berechnung der Wärmegestehungskosten	27
4.	Schlussfolgerungen	31
5.	Literaturverzeichnis	36
6.	Anhang – Fragebogen.....	37

1. Einleitung

In der Schweiz gibt es einige Dutzend Erdwärmesonden-Anlagen, die seit Anfang der 80er Jahre in Betrieb sind. Mit dieser Studie wurde das Betriebsverhalten von Anlagen mit Langzeitbetrieb über mehrere Jahrzehnte untersucht. Dank der frühen Verbreitung der Systeme ist die Schweiz für die Studie bestens geeignet.

In einem ersten Projektteil wurde mit einer Umfrage die Betriebserfahrung von Anlagebesitzern erfasst. Daraus konnten Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von Erdwärmesonden-Anlagen und der Zufriedenheit der Anlagebesitzer gewonnen werden. Zudem wurde die Nachhaltigkeit von Erdwärmesondenanlagen bei veränderten Bedingungen untersucht. Aufgrund der langen Betriebszeiten der Anlagen hat sich in manchen Fällen der Heizbedarf verändert – beispielsweise wurde die Wohnfläche vergrössert oder das Gebäude isoliert. Auch wurden mehrere Wärmepumpen bereits ersetzt. Neue Wärmepumpen sind effizienter, haben somit einen höheren COP und ziehen bei gleichbleibendem Wärmebedarf mehr Wärme aus dem Boden. Es wird der Frage nachgegangen, wie sich diese Änderungen auf die Funktionalität der Anlage ausgewirkt haben.

In einem zweiten Projektteil wurde das Betriebsverhalten von zwei Anlagen, von denen Betriebsdaten existieren, beschrieben. Anhand der Daten wurde das Betriebsverhalten numerisch nachgerechnet und über 50 Jahre simuliert. Basierend auf den Berechnungen sind Aussagen über die Nachhaltigkeit der Systeme möglich. Weiter werden die Wärmegestehungskosten anhand der Betriebsdaten bestimmt.

Mit der Befragung der Anlagebesitzer und der Analyse von Betriebsdaten wurden Antworten auf die Fragen in Tabelle 1-1 ausgearbeitet. Daraus lassen sich Empfehlungen ableiten, welche eine möglichst nachhaltige Nutzung von Erdwärmesondenanlagen auch bei veränderten Nutzungsbedingungen gewährleisten sollen.

Tabelle 1-1: Fragen, welche mit der vorliegenden Studie beantwortet werden.

1.	Laufen Erdwärmesonden über mehrere Jahrzehnte hinweg zuverlässig und zufriedenstellend?
2.	Laufen Erdwärmesondenanlagen auch nach allfälligen Änderungen, wie dem Einbau einer neuen Wärmepumpe oder Umbauten noch gut?
3.	Was sind die "grössten" Schwachstellen beim Betrieb über mehrere Jahrzehnte und auf was muss besonders geachtet werden, um eine langjährige Funktionstüchtigkeit der Anlage zu gewährleisten?
4.	Wie nachhaltig sind Erdwärmesondensysteme?
5.	Wie hoch liegen die Wärmegestehungskosten von Erdwärmesondensystemen?

2. Befragung zum Langzeitverhalten von Erdwärmesonden-Systemen

2.1 Vorgehen

Mit der Befragung von Anlagebesitzern sollen die Fragen 1 bis 4 in Tabelle 1-1 beantwortet werden. Dazu wurde ein Fragebogen erstellt. Der Fragebogen wurde so konzipiert, dass mit möglichst wenigen Fragen die nötigen Informationen zum Langzeitverhalten der Anlagen erfasst werden. Im Anhang 6 befindet sich der vollständige Fragebogen. Die Fragen im Fragebogen lassen sich unterteilen in:

- a) Fragen zur Anlage
- b) Fragen zur Betriebsart
- c) Fragen zum Langzeitverhalten
- d) Fragen zu Problemen/ Reparaturen

Für die Befragung durfte freundlicherweise auf einen Datensatz der Grundag AG (heute Hastag AG) zurückgegriffen werden. Die Grundag AG hat 1979 mit der Installation von Erdwärmesonden in der Schweiz begonnen. Für die Befragung zum Langzeitverhalten wurden Anlagen ausgewählt, welche zwischen 1979 – 1985 erstellt wurden. Der Katalog umfasst 43 solcher "alten" Anlagen mit Anlagentyp, Standort und Kontaktadressen. Ausgewählt wurden die Anlagen aufgrund von folgenden Kriterien (in Klammern ist die Anzahl Anlagen angegeben):

- Rückmeldungen im Jahr 1992 aufgrund einer Umfrage der Grundag AG mit dem Zweck der internen Qualitätssicherung
- Verschiedene Anlagentypen
 - Einfamilienhäuser (33) und Mehrfamilienhäuser (10)
 - Mit (12) und ohne Warmwasseraufbereitung (31)
 - Art der Heizungsverteilung (Fussbodenheizung (25), Radiatoren (9), beides (9))
 - Monovalente (38) oder bivalente Betriebsweise (5)

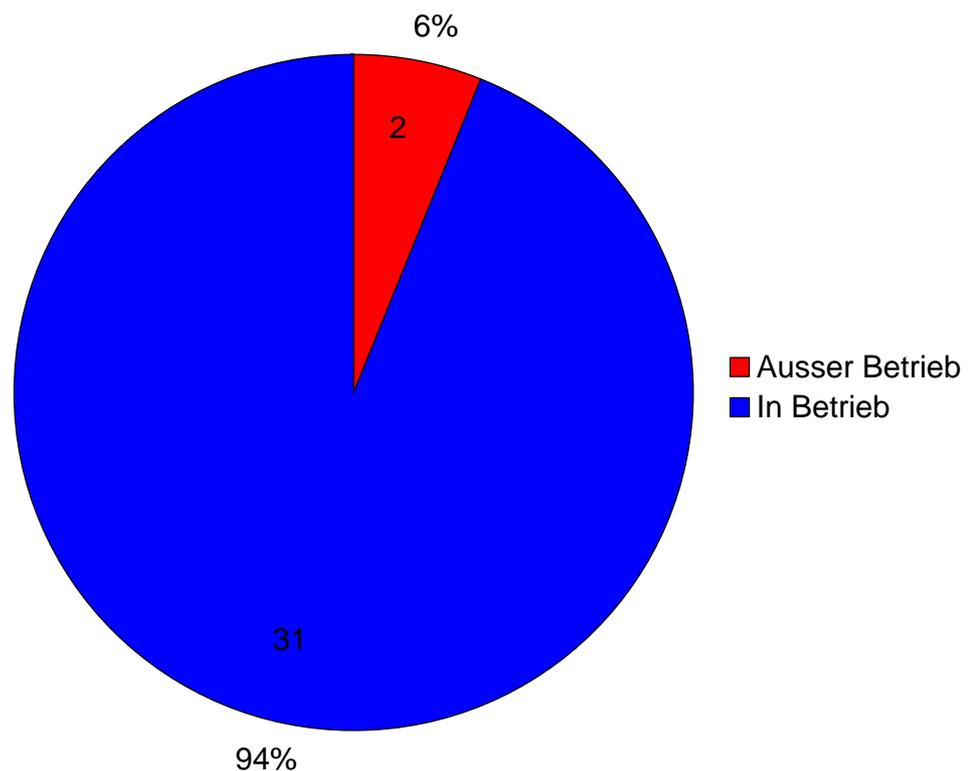
Der Fragebogen wurde an 43 Anlagebesitzer versandt. 33 Fragebogen wurden ausgefüllt zurückgeschickt. Der Rücklauf ist mit ca. 75 % sehr hoch.

2.2 Auswertung der Umfrage

2.2.1 Betriebsstatus

Die untersuchten Anlagen wurden alle von 1979 bis 1985 erstellt. Inzwischen haben die Anlagen ein Alter zwischen 25 und 31 Jahren erreicht. Obwohl die Erstellung der Anlagen in die Anfangszeit der Erdwärmesondenanlagen in der Schweiz fallen, sind von 33 Anlagen 31 noch in Betrieb.

Beide Anlagen, welche nicht mehr in Betrieb sind, waren mit Prototyp-Gasmotor-Wärmepumpen ausgerüstet, welche sehr hohe Reparatur- und Servicekosten verursachten. Dies zum einen aufgrund der nicht ausgereiften Technik und den damit verbundenen vielen kleineren Defekten und Problemen und zum anderen wegen der relativ geringen Lebensdauer der Verbrennungsmotoren. Die Ausserbetriebnahme erfolgte nach 4 respektive 6 Jahren. Es waren die einzigen mit Gas angetriebenen Wärmepumpen in dieser Untersuchung. Die Umfrage zeigt, dass alle mit Elektrowärmepumpen ausgestatteten Erdwärmesonden-Anlagen noch in Betrieb sind.

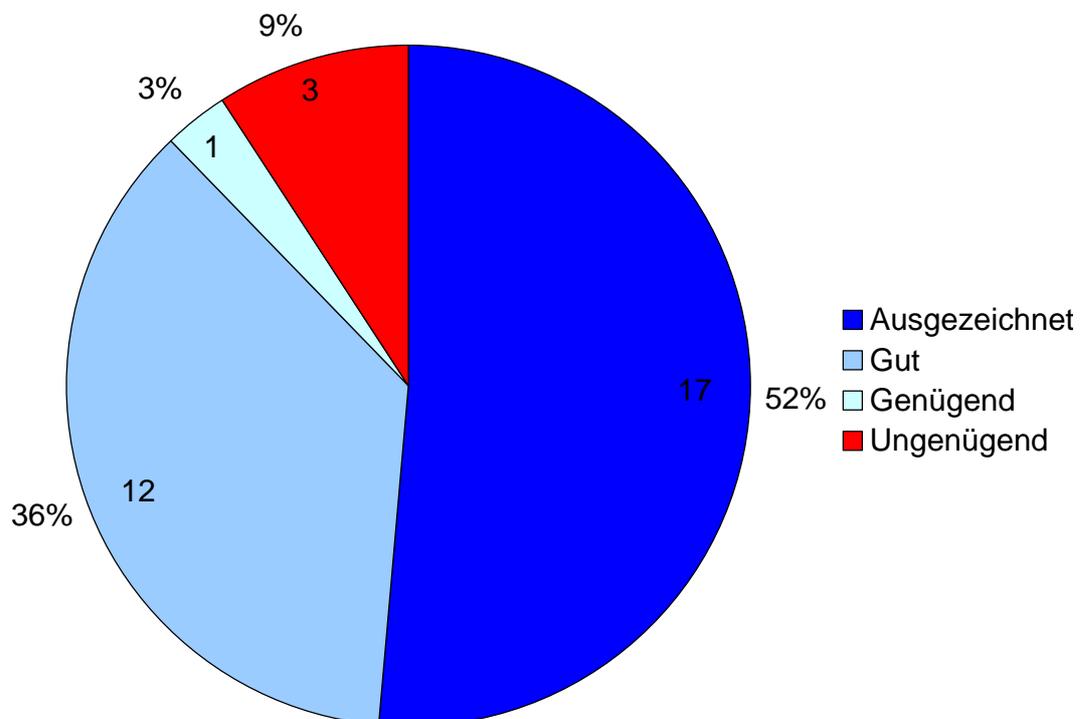


Figur 2-1: Die Umfrage zeigt, dass 94 % der untersuchten Anlagen noch in Betrieb sind. Nur 2 der 33 Anlagen wurden ausser Betrieb genommen werden. Die still gelegten Anlagen waren mit Prototyp Gasmotor-Wärmepumpen ausgerüstet, welche sehr hohe Reparatur- und Servicekosten verursachten.

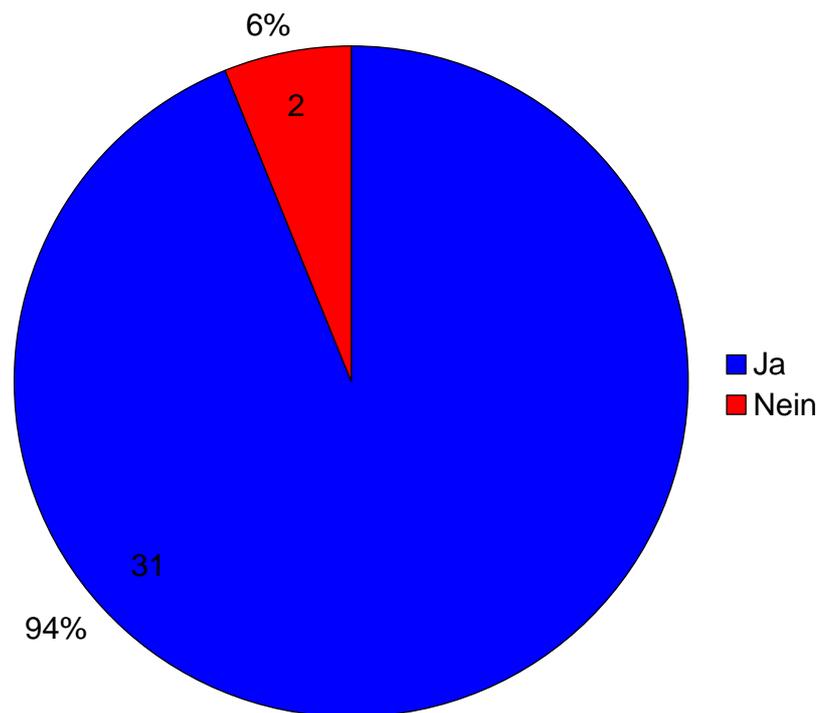
2.2.2 Zufriedenheit mit der Anlage und erneute Wahl des Heizsystems

Die meisten Besitzer sind mit ihrer Anlage zufrieden bis sehr zufrieden (siehe Figur 2-2). Lediglich drei Anlagen sind nicht zufriedenstellend: Einerseits handelt es sich um die beiden Anlagen, welche nicht mehr in Betrieb sind (siehe Kapitel 2.2.1). Andererseits gab jemand an, dass die Erdwärmesonden zu kurz dimensioniert seien.

Die Besitzer wurden weiter gefragt, ob sie sich wieder für eine Erdwärmesondenanlage entscheiden würden, falls sie die Wahl hätten. Das Ergebnis war sehr positiv: Von den 33 Anlagebesitzern würden sich 31 nochmals dafür entscheiden (siehe Figur 2-3). Sogar der Besitzer, welcher bei der Frage über die Zufriedenheit angegeben hat, er sei wegen der zu knappen Dimensionierung der Erdwärmesonden unzufrieden, würde sich wieder für eine Erdwärmesonden-Anlage entscheiden. Nur die Besitzer der beiden Anlagen, die nicht mehr in Betrieb sind, würden nicht mehr eine Erdwärmesonden-Anlage installieren lassen.



Figur 2-2: Die Umfrage zeigt, dass die meisten Besitzer mit ihrer Anlage zufrieden sind. Neben den Besitzern der still gelegten Anlagen, die mit einer Prototyp Gasmotor-Wärmepumpe ausgerüstet waren (vergleiche Figur 2-1), ist nur ein Besitzer mit seiner Anlage unzufrieden, weil die Sonden zu kurz dimensioniert sind.



Figur 2-3: Die Umfrage zeigt, dass 31 von 33 Anlagebesitzern sich wieder für Erdwärmesonden entscheiden würden (vergleiche auch Figur 2-2).

2.2.3 Probleme und Reparaturen

Bei der Umfrage wurden auch die aufgetretenen Probleme angesprochen. Bei 19 von 33 Anlagen traten Probleme oder Reparaturen auf. Die anderen 14 Anlagen laufen bis heute problemlos (siehe Figur 2-4). Figur 2-5 zeigt die Art der aufgetretenen Probleme. Dabei waren Mehrfachnennungen möglich. Am häufigsten traten Probleme bei der Wärmepumpe (10 Anlagen) und der Erdwärmesonde (9 Anlagen) auf. Um die Problematik bei Erdwärmesonden besser verstehen zu können, war hier eine Spezifikation der Probleme möglich. Es wurden die folgende Antworten gegeben, wobei Mehrfachantworten möglich waren:

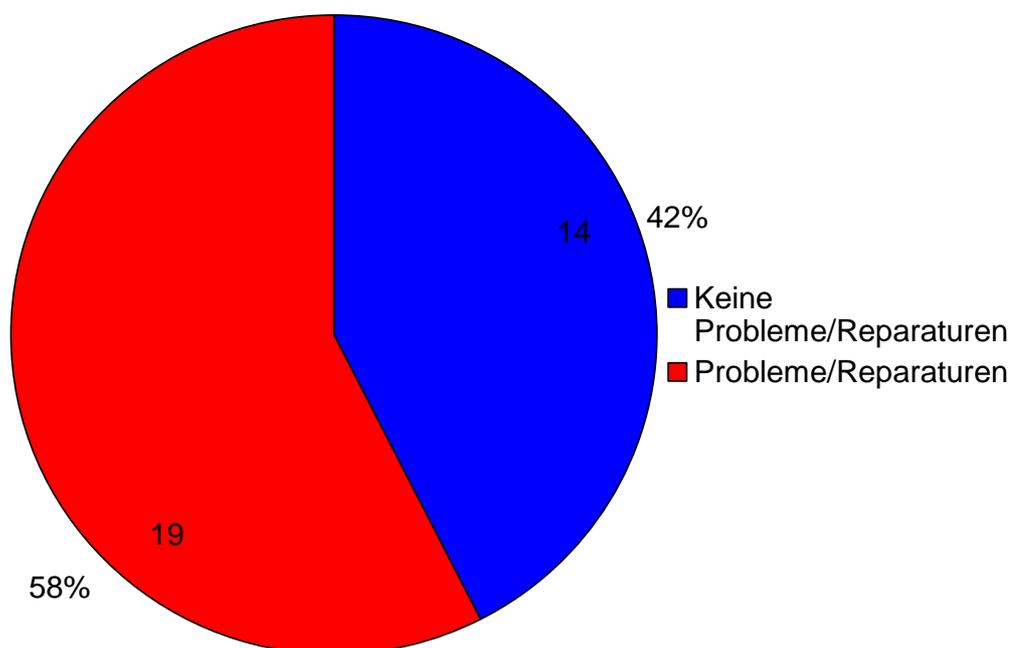
- Eisbildungen (1 Fall),
- Hebungen und Senkungen (2 Fälle),
- zu kurze Erdwärmesonde (2 Fälle), und
- Frostschutz nachfüllen (5 Fälle).

Die ersten 3 Punkte deuten auf zu knapp dimensionierte Erdwärmesonden hin. Zu Eisbildung kommt es, wenn die Erdwärmesonden zu stark belastet werden. Eine Folge davon sind

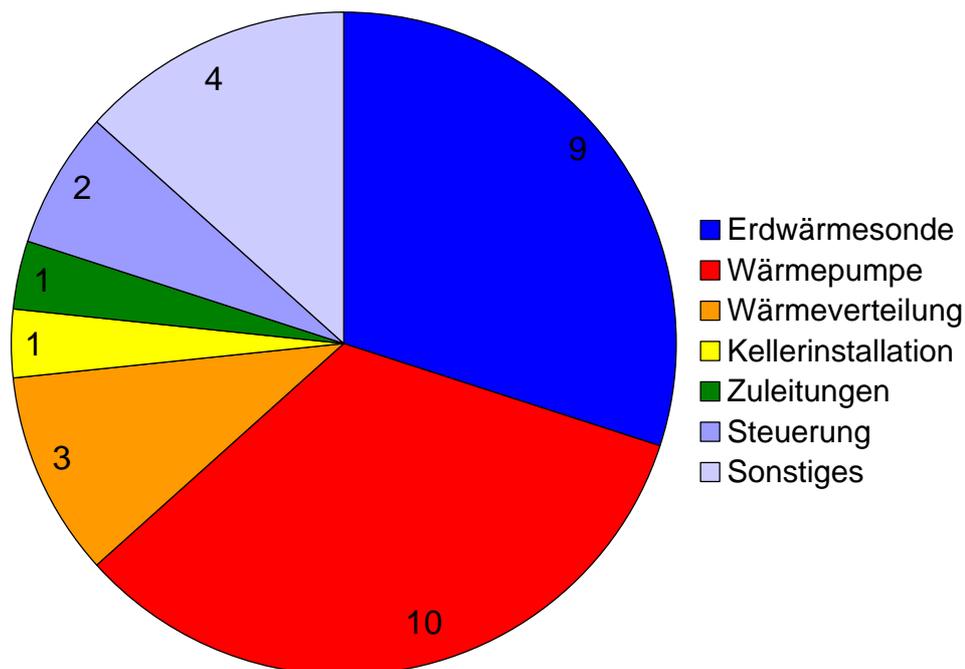
Hebungen beim Einfrieren der Sonde und der Zuleitungen und entsprechende Senkungen, wenn das Eis im Frühjahr bei Ende der Heizperiode wieder abtaut.

Das Nachfüllen von Frostschutzmittel kann bei Anlagen mit über 25 Betriebsjahren als normale Wartungsarbeiten betrachtet werden. Gründe dafür sind die natürliche Ausdehnung der Kunststoff-Erdwärmesondenrohre oder knapp ausgelegte Expansionsgefässe. Sollte jedoch regelmässig Frostschutzmittel nachgefüllt werden müssen, würde dies auf eine undichte Stelle irgendwo in der Anlage hinbedeuten. Da jedoch alle Anlagebesitzer angeben, dass sie mit ihrer Anlage zufrieden bis sehr zufrieden sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um ein sporadisches Nachfüllen handelt.

Bei den Zuleitungen und den Kellerinstallationen traten die wenigsten Störungen auf (je 1 Nennung). Im Weiteren traten Probleme bei der Steuerung (2 Nennungen) und in der Wärmeverteilung (3 Nennungen) auf. Sonstige Störungen oder Probleme (4 Nennungen) waren Ausfall der Umwälzpumpe, dass die Anlage alle 2 Jahre gewartet werden musste, zu hoher Lärmpegel und kleinere Reparaturen an den Entlüftungsventilen und ein durchgerostetes Heizungsrohr. Grössere Reparaturen mussten lediglich an drei Wärmepumpen vorgenommen werden.



Figur 2-4: Die Umfrage zeigt, dass bei 14 Anlagen auch nach rund 25 Jahren Betrieb noch keine Probleme aufgetreten sind. Figur 2-5 zeigt die Art der aufgetretenen Störungen.



Figur 2-5: Aufstellung der aufgetretenen Probleme/Reparaturen bei Erdwärmesondenanlagen. Am häufigsten traten Probleme bei Wärmepumpen und Erdwärmesonden auf. Bei den Problemen mit den Erdwärmesonden handelte es sich bei rund der Hälfte der Fälle um zu knapp dimensionierte Sondentiefen (siehe Text). Es waren Mehrfachantworten möglich.

2.2.4 Änderungen an Gebäudestruktur

Alle Anlagen bestehen schon seit mindestens 25 Jahren. In dieser Zeit sind einige Häuser renoviert und umgebaut worden. Deshalb ist die Frage interessant, wie die Anlage nach solchen Erneuerungen und Umbauten läuft. Von den 31 noch in Betrieb stehenden Anlagen wurden 11 Gebäude verändert:

- Bei 3 Gebäuden wurde die Wohnfläche vergrössert. Bei einem dieser Gebäude wurde dabei eine Zusatzheizung eingebaut.
- Bei einem Gebäude wurde die Raumtemperatur erhöht.
- Bei einem weiteren Gebäude hat sich die beheizte Wohnfläche aufgrund eines Einbaus einer separaten Heizung in einer Einlegerwohnung reduziert.
- Bei 5 Gebäuden wurde die ganze Gebäudehülle oder Teile davon (z.B. Fenster) besser isoliert.

Bei einigen wenigen Gebäuden hat sich somit die Wohnfläche oder die Raumtemperatur erhöht und damit auch der Heizbedarf vergrössert. Dadurch erhöht sich auch der Wärmeentzug aus den Erdwärmesonden und die Erdwärmesonden werden mehr belastet. Dies führt

zu tieferen Fördertemperaturen und im Extremfall zum Einfrieren der Erdwärmesonden. Die Anlagebesitzer haben jedoch keine Beeinträchtigungen des Anlagebetriebes gemeldet, obwohl einige Vergrösserungen bereits vor rund 10 Jahren erfolgten. So wird angenommen, dass die Fördertemperaturen noch im zulässigen Bereich liegen.

2.2.5 Ersatz der Wärmepumpe

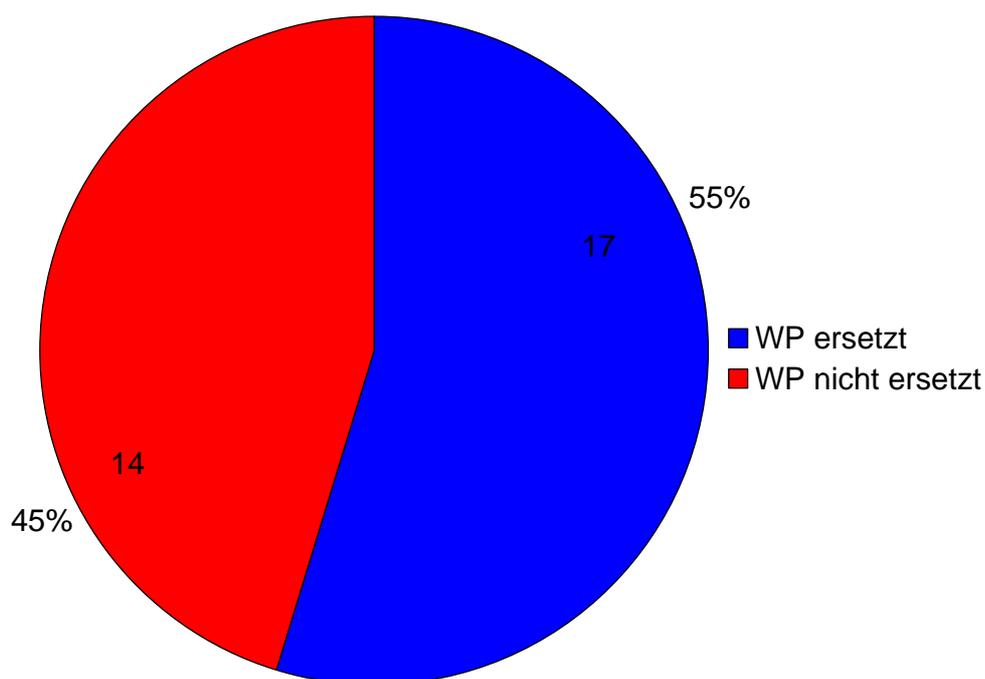
Gemäss Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) wird die Lebensdauer einer Wärmepumpe mit etwa 15 – 25 Jahren angegeben. Bemerkenswert ist, dass von den 31 laufenden Anlagen die Wärmepumpe erst bei 17 Anlagen ersetzt wurde (Figur 2-6). Die anderen laufen noch immer. Die erste Wärmepumpe wurde 1999 ersetzt. Die bisher ersetzten Wärmepumpen haben im Schnitt 21 Jahre gehalten. Die mittlere Lebensdauer aller Wärmepumpen beträgt zum heutigen Zeitpunkt 23 Jahre. Es ist davon auszugehen, dass die restlichen Wärmepumpen in den nächsten paar Jahren ersetzt werden.

Die Gründe für den Ersatz der Wärmepumpe sind in Figur 2-7 dargestellt. Dabei waren wieder mehrere Antworten möglich. Der Hauptgrund ist, dass angenommen wurde, die Lebensdauer sei abgelaufen, d.h. die Wärmepumpe wurde aus verschiedenen Gründen vor einem möglichen Defekt ersetzt. Aber auch eine bessere Effizienz, ein geringerer Geräuschpegel oder Defekte sind weitere Gründe für einen Ersatz.

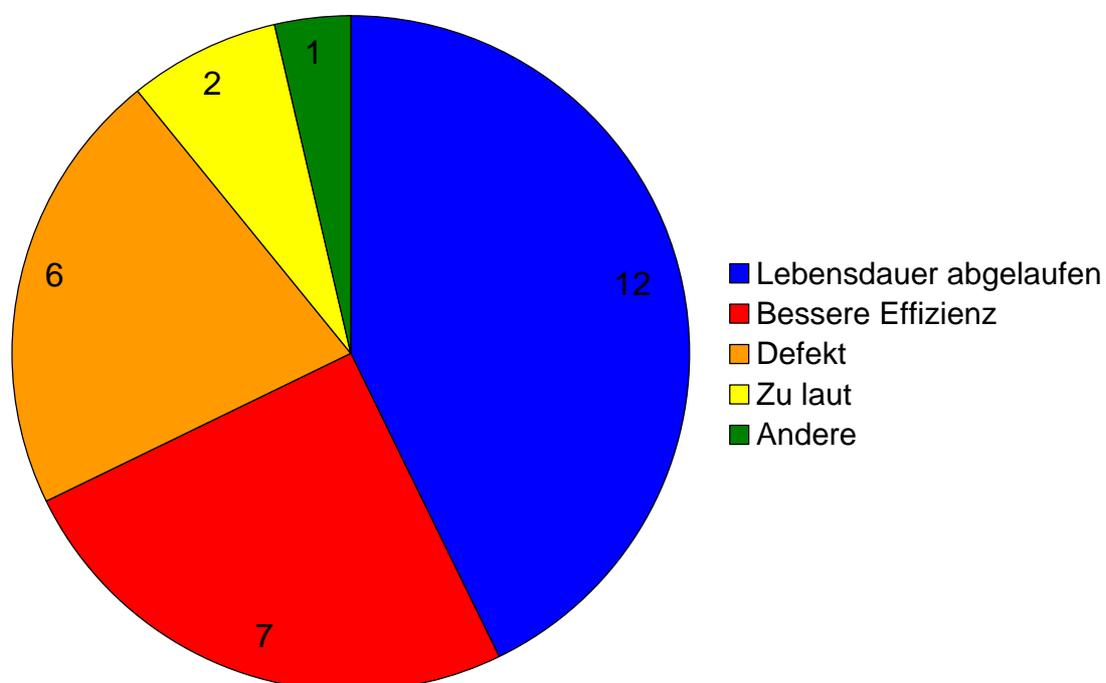
Nun ergibt sich die Frage, ob aufgrund des Ersatzes der Wärmepumpe Probleme aufgetreten sind. Bei 4 Anlagen sind nach dem Ersatz der Wärmepumpe effektive Probleme bei der Anlage aufgetreten:

- Bei einer Anlage sind die Zuleitungen vereist,
- bei zwei weiteren war das Raumklima danach ungenügend und
- bei der vierten sind Probleme bei der Steuerung aufgetreten.

Zwar ist die Stichprobe nicht sehr gross, aber bei rund 25 % der Anlagen sind nach dem Ersatz der Wärmepumpe Probleme aufgetreten. Die ersten zwei Punkte deuten darauf hin, dass aufgrund der effizienteren, neueren Wärmepumpe die alte Anlagendimensionierung nicht mehr genügt. Neuere Wärmepumpen haben höhere COP (höhere Effizienz) als die Wärmepumpen vor 20 Jahren. Dadurch wird dem Untergrund bei gleicher Heizleistung mehr Energie entzogen. Dabei kann es dazu kommen, dass die Erdwärmesonden zu stark belastet werden. Ihre Temperatur sinkt tiefer ab und die Wärmepumpe liefert nicht mehr genug Energie, um das gewünschte Raumklima zu halten. Bei massiver Überlastung kann es zum Gefrieren der Erdwärmesonden kommen. Die Probleme bei der Steuerung sind technischer Natur und können relativ leicht behoben werden.



Figur 2-6: Von den 31 laufenden Anlagen wurden lediglich bei 17 Anlagen die Wärmepumpe ersetzt. Bei den ersetzten Wärmepumpen liegt die durchschnittliche Einsatzdauer bei 21 Jahren.



Figur 2-7: Die Gründe für den Ersatz einer Wärmepumpe liegen mehrheitlich bei der Annahme einer abgelaufenen Lebensdauer, vor einem effektiven Defekt. Es waren Mehrfachantworten möglich.

3. Analyse der Betriebsdaten von Erdwärmesonden-Systemen

3.1 Vorgehen

Im zweiten Projektteil wurde das Betriebsverhalten von zwei Anlagen, von denen Betriebsdaten existieren, analysiert. Anhand der Daten wurde das Betriebsverhalten numerisch nachgerechnet und über 50 Jahre aufgezeigt. Basierend auf den Messdaten und Berechnungen sind Aussagen zu den Punkten 4 und 5 in Tabelle 1-1 zu Nachhaltigkeit und Wärmegestehungskosten der Systeme möglich.

Für die Studie wurden Betriebsdaten von verschiedenen Anlagen gesichtet. Aufgrund der detaillierten Datenlage wurden die folgenden zwei Anlagen für die Studie ausgewählt. Die Anlage 1 wurde im Jahre 2002 erbaut und die Anlage 2 bereits im Jahre 1985. Die Anlage 1 ist zwar erst seit 8 Jahren in Betrieb, aufgrund der guten Datenlage wurde sie jedoch trotzdem in die Betrachtung miteinbezogen.

Ursprünglich war die Studie mit einer bereits 1986 erstellten Anlage geplant, bei der über Jahre Messungen durchgeführt wurden. Beim Besitzerwechsel gingen leider die Informationen über die Messinstallation verloren, so dass die Messkabel zu den Messfühlern im Erdreich versehentlich abgeschnitten wurden. Die Messinstallation für die Betriebsdaten könnte zwar wieder in Betrieb genommen werden, aber nur mit unverhältnismässigem Aufwand. Es wurde deshalb auf diese Anlage verzichtet und die Untersuchung mit der Anlage 1 durchgeführt. Durch die durchgeführten Vorwärtsberechnungen über 50 Jahre sind auch mit der Anlage 1 Aussagen über das langzeitige Betriebsverhalten möglich.

3.2 Anlage 1

3.2.1 Beschreibung der Anlage 1

Anlage 1 wurde im April 2002 in Betrieb genommen. Die Anlage besitzt eine 265 m tiefe Erdwärmesonde. Das Erdwärmesonden-System dient zur Beheizung eines renovierten Bauernhauses. Die Warmwasserbereitung erfolgt separat über Solarkollektoren oder elektrisch. Die Anlage wurde in den ersten 3 Betriebsjahren mit Wasser ohne Glykollzusatz betrieben. Aufgrund eines Anbaus wurde 2006 10 % Ethylenglykollgemisch (Frostsicherheit bis -5 °C) eingefüllt. Die Anlage kann im Sommer zur direkten Kühlung (Geocooling) ohne Einsatz der Wärmepumpe betrieben werden.

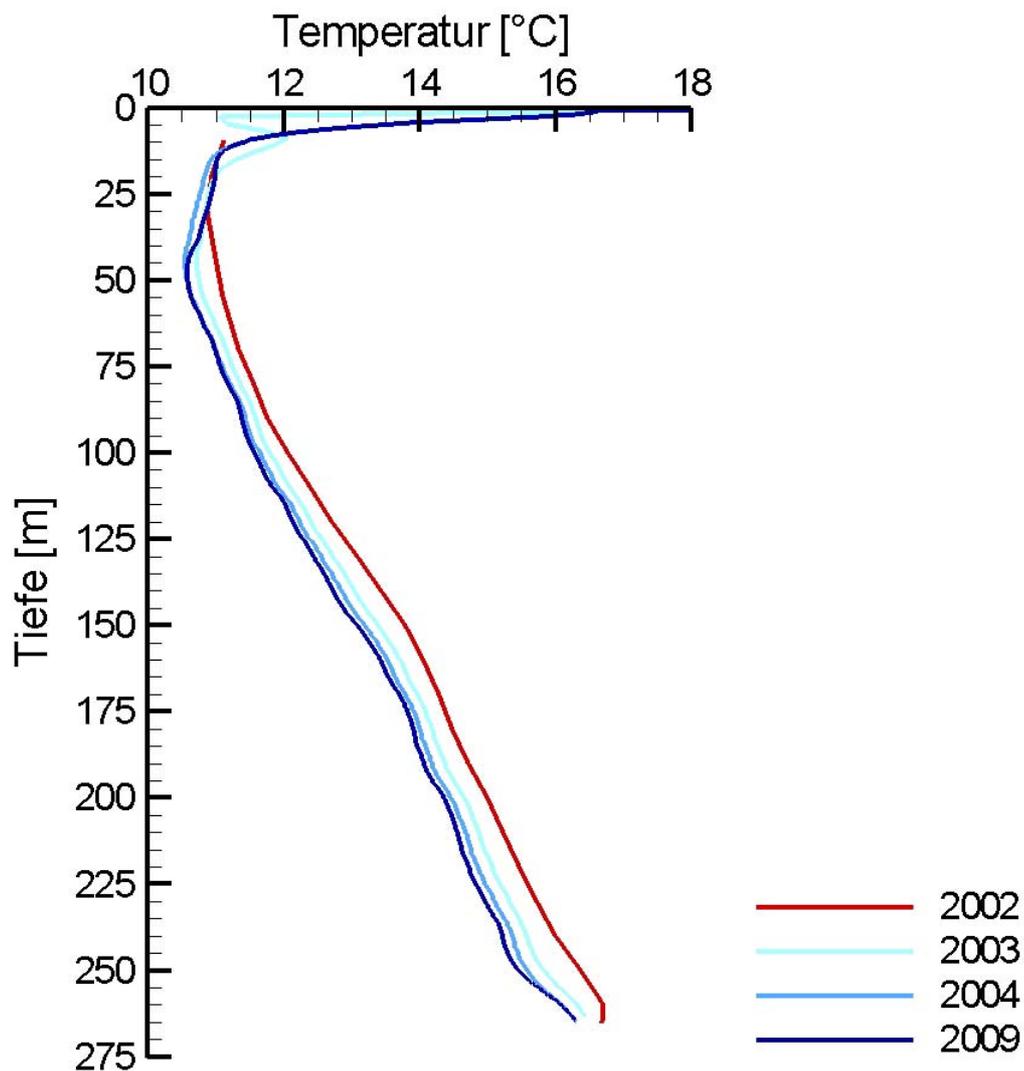
Tabelle 3-1: Beschreibung der Anlage 1.

System	Duplex-Erdwärmesonde, Ø 40 mm
Bohrmeter	265
Anzahl Bohrungen	1
Sondenfluid	Wasser-Ethylenglykolgemisch (90 %/10 %)
Betrieb	Seit April 2002
Heizbedarf	Verschiedene Ausbautappen 11 kW von 2002 bis 2004 14 kW ab 2005 (teilisolierter Anbau) 12 kW ab 2007 (Endausbau Anbau)
Warmwasserproduktion	Separat, mit Sonnenkollektoren / elektrisch
Kühlen	Direkte Kühlung möglich, 2005 und 2006 eingesetzt

3.2.2 Messdaten

Für die Anlage 1 ist ein kontinuierlich gemessener Datensatz von Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie von Durchflussdaten vorhanden. Ebenfalls vorhanden ist ein detailliertes geologisches Profil des Untergrundes und Messungen der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität an ausgewählten Bohrproben.

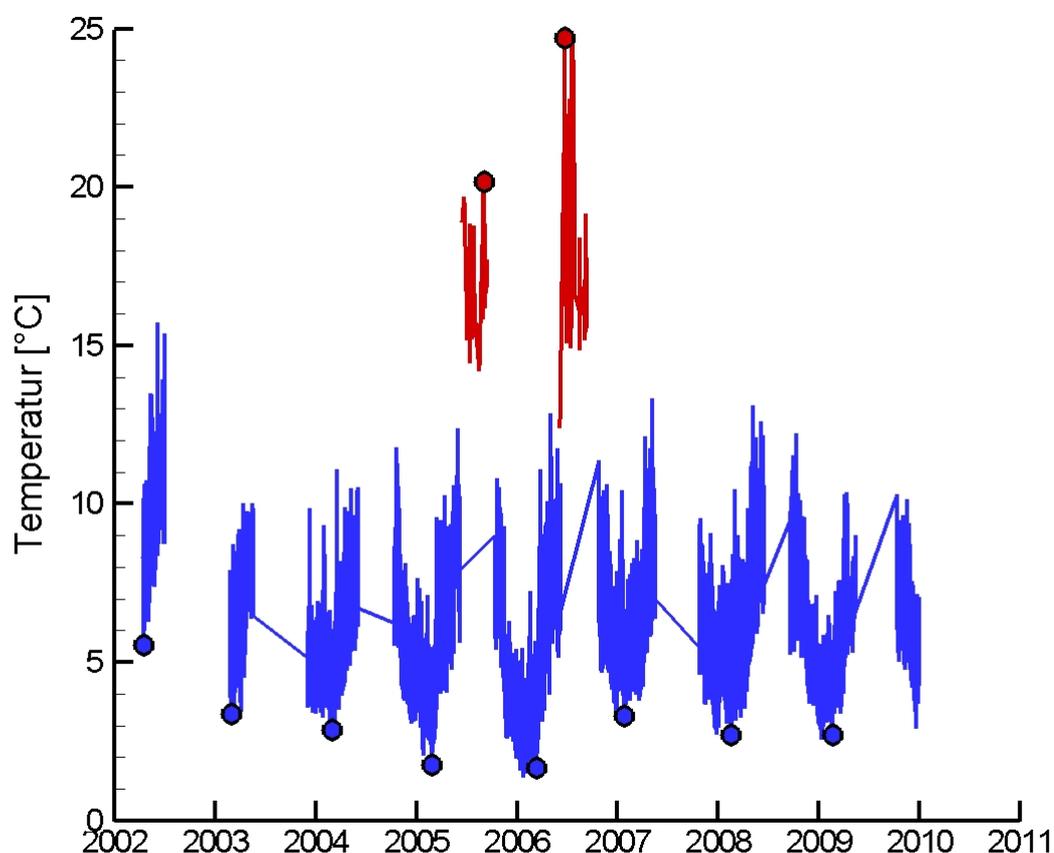
Die Erdwärmesonde ist über einen Schacht beim Sondenkopf für Temperaturprofilmessungen zugänglich. Bevor die Erdwärmesonde 2002 in Betrieb genommen wurde, wurden Temperaturmessungen über die ganze Tiefe durchgeführt. In den folgenden zwei Jahren wurde ein kontinuierliches Temperaturprofil jeweils vor dem Start der Heizperiode aufgenommen. Im Herbst 2009 wurde als Vergleichsmessung eine weitere Temperaturprofilmessung durchgeführt. Figur 3-1 zeigt die ungestörte Temperatur des Untergrundes im Vergleich mit den Temperaturprofilen vor den Heizperioden 2003/2004, 2004/2005 und 2009/2010. Die Temperatur des Untergrundes hat sich aufgrund der geothermischen Nutzung zwischen 0.5 bis 1.0 K abgekühlt. Die betragsmässig grösste Abkühlung zeigte sich im ersten Betriebsjahr. Die noch nachfolgende Abkühlung ist unbedeutend. Im Bereich von 10 m bis 35 m ist klüftige Nagelfluh mit Grundwasser vorhanden, welches geringfügig strömt. In diesem Bereich regeneriert sich die Erdwärmesonde vollständig.



Figur 3-1: Ungestörte Temperatur des Untergrundes (2002) im Vergleich mit den Temperaturprofilen vor den Heizperioden 2003/2004, 2004/2005 und 2009/2010. Der Untergrund hat sich durch die geothermische Nutzung zwischen 0.5 bis 1.0 K abgekühlt. Die betragsmässig grösste Abkühlung zeigte sich im ersten Betriebsjahr. Im Bereich von 10 bis 35 m ist leicht strömendes Grundwasser vorhanden, wodurch sich dieser Bereich vollständig regeneriert.

Die Betriebsdaten sind in Figur 3-4 dargestellt, separiert in Winter- und Sommerbetrieb. Dargestellt ist der Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf der Wärmepumpe. Dies ist die massgebliche Temperatur für die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen (SIA Norm 384/6). Für die Heizsaison 2002/2003 sind Daten erst ab Februar 2003 vorhanden. Der Temperaturverlauf widerspiegelt die Ausbautappen des Anbaus (vergleiche auch Tabelle 3-1). Während der ersten 3 Jahre nahm die minimale mittlere Sondentemperatur auf ca. 3 °C

ab. Ab 2005 wurde zusätzlich ein nicht fertig ausgebauter Anbau mitbeheizt. Dadurch erhöhte sich der Heizbedarf deutlich und die Temperatur sank dabei auf minimal 1.7 °C. 2007 war der Anbau vollständig ausgebaut und isoliert. Der Heizbedarf reduzierte sich wieder und die Minimaltemperaturen scheinen sich seither bei ca. 2.5 °C zu stabilisieren. Gekühlt wurde nur in den Jahren 2005 und 2006. Die Spitzentemperaturen liegen im Sommer bei 20 bzw. 25 °C, wobei es bei den Daten schwierig war, die hohen Temperaturen beim Anfahren der Kühlung herauszufiltern (Stillstandtemperaturen in den Zuleitungen zur Wärmepumpe). Gemäss Bauherr waren die Betriebstemperaturen für die Kühlung immer genügend tief, so dass für ein angenehmes Raumklima mit 19 °C auf das Kühlsystem gefahren werden konnte.



Figur 3-2: Messdaten der Anlage 1. Dargestellt sind die Mittelwerte zwischen Vor- und Rücklauf der Wärmepumpe. Die Messdaten sind in Heiz- (blau) und Kühlbetrieb (rot) separiert. Weiter sind die minimalen Temperaturen im Winter und die maximalen Temperaturen im Sommer als Punkte aufgeführt.

3.2.3 Berechnung des Betriebsverhaltens

Anhand der Anlagedaten wie Durchfluss und Vor- und Rücklauftemperaturen, wurde das Temperaturverhalten der Anlage nachsimuliert und mit den Messdaten verglichen. Die Berechnung läuft über 50 Jahre, wodurch Aussagen über die Nachhaltigkeit möglich sind.

Die Berechnung wurden mit einem firmeninternen Programm erstellt, welches auf g-Funktionen beruht. Die Temperaturentwicklung wird darin direkt über die stündlichen Wärme- und Kältelasten berechnet. Das Dimensionierungswerkzeug berücksichtigt zudem stündlich die Leistungskennlinien der Wärmepumpen aufgrund der unterschiedlichen Vorlauftemperaturen von Erdwärmesonden und Heizungssystem und es können beliebige Anordnungen von Erdwärmesonden in einem Feld berechnet werden.

Die verwendeten thermischen Parameter sowie die Untergrundtemperatur sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt. Die mittlere, initiale Bodentemperatur entlang der Erdwärmesonde wurde aus der Temperaturprofilmessung vor Betriebsbeginn bestimmt (vergleiche Figur 3-1). Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität wurden an Bohrproben aus der Erdwärmesondenbohrung gemessen.

Die Heizenergie und Heizleistung wurden anhand der Messdaten abgeschätzt. Die Heizleistung variierte während der ersten fünf Betriebsjahre in Abhängigkeit der Ausbaustufen (vergleiche Tabelle 3-1) und beträgt im Endausbau 12 kW. Für die Berechnung wurde der Energiebedarf pro Jahr anhand der Heizgradtage der Messstation St. Gallen skaliert.

Für die Kühlenergie und -leistung konnte ebenfalls anhand der Messdaten eine Abschätzung erfolgen. Die Kühlleistung beträgt 5.3 kW. Für die Berechnung wurde die direkte Kühlung jeweils bei Aussentemperaturen über 20 °C eingeschaltet. Bis anhin wurde die Kühlung nur während zwei Jahren eingeschaltet. Dies ist in der Berechnung berücksichtigt.

Die Energie- und Leistungsdaten sind in Tabelle 3-8 zusammengestellt. Für die Berechnung des Temperaturverhaltens bis 50 Jahre wurde von einem Durchschnittsjahr ausgegangen und die direkte Kühlung berücksichtigt.

Tabelle 3-2: Mittlere thermische Gesteinseigenschaften und Randbedingungen, gemessen am Standort der Anlage 1.

Parameter	Wert
Mittlere Bodentemperatur [°C]	13.5
Mittlere Wärmekapazität Untergrund [MJ/m ³ ·K]	2.52
Mittlere Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/m·K]	2.7

Tabelle 3-3: Jahresenergie und Leistung für Heizen und Kühlen.

Bezüger	Energiebedarf [kWh]	Maximale Leistung [kW]
Heizen	22'750	12 (Endausbau)
Kühlen (direkte Kühlung)	3'000	5.3

Tabelle 3-4: Kenndaten der Wärmepumpe.

	Temperatur Verdampfer eintritt [°C]	Temperatur Kondensatoraustritt [°C]	Heizleistung [kW]	Kälteleistung [kW]
Wärmepumpe	0	35	14	11
	10	35	18.3	15.2

Tabelle 3-5: Technische Daten der Erdwärmesonde.

Art der Sonde	Duplex-Erdwärmesonde, Ø 40 mm
Anzahl	1
Tiefe	265 m
Kältemittel	Wasser/Ethylenglykol-Gemisch (90%/10%)
Hinterfüllung	Standard (Wärmeleitfähigkeit 0.8 W/m·K)

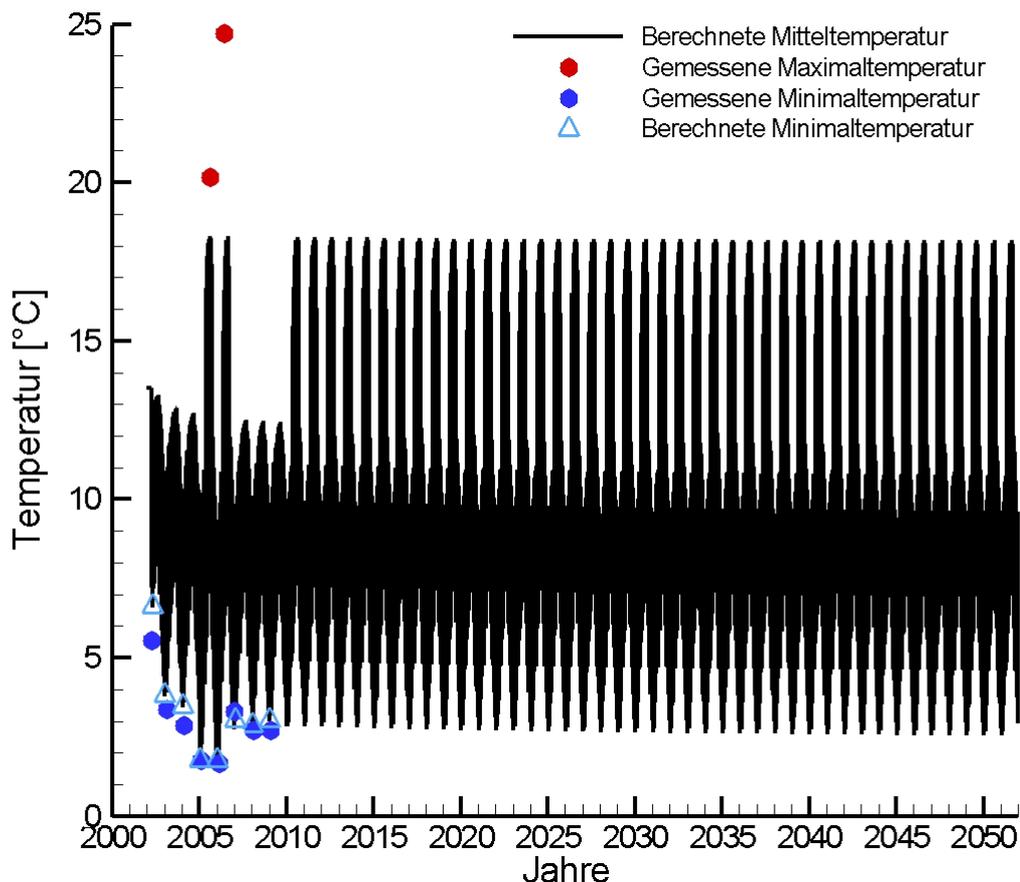
Figur 3-3 zeigt die berechnete mittlere Soletemperatur (Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf der Wärmepumpe) in der Erdwärmesonde. Als Vergleich sind zudem die berechneten und gemessenen Minimalwerte pro Jahr dargestellt. Die Werte zeigen eine gute Übereinstimmung. Die gemessenen wie auch die berechneten Temperaturen widerspiegeln den unterschiedlichen Heizbedarf aufgrund der verschiedenen Ausbautetappen des Anbaus (vergleiche Tabelle 3-1). So sind die Temperaturen für die Jahre 2005 und 2006 deutlich tiefer als für die übrigen Jahre. Grundsätzlich nehmen die Temperaturen über die ersten Betriebsjahre ab und stabilisieren sich nach ca. 5 Jahren. Die kleineren Schwankungen für die Jahre 2007 bis 2009 sind auf die unterschiedlichen Heizgradtage zurückzuführen.

In den Jahren 2005 und 2006 war die direkte Kühlung eingeschaltet, was auch bei der Berechnung berücksichtigt wurde. Die gemessenen Maximaltemperaturen liegen deutlich höher

als die berechneten. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, dass es bei den Messdaten schwierig war, die hohen Temperaturen beim Anfahren der Kühlung herauszufiltern. Gemäss Bauherr waren die Betriebstemperaturen für die Kühlung immer genügend tief, so dass für ein angenehmes Raumklima mit 19°C auf das Kühlsystem gefahren werden konnte. Diese Angaben zu den Fördertemperaturen decken sich mit der Simulation.

Der Bedarf der direkten Kühlung beträgt bei dieser Anlage ca. 10 % des Wärmebedarfs im Winter, wobei die maximale Kühlleistung ca. 50 % der Heizleistung beträgt (vergl. Tabelle 3-3). Der Vergleich mit einer Berechnung ohne direktes Kühlen zeigt, dass in diesem Fall die direkte Kühlung die Regeneration des Untergrundes während des Sommers zwar leicht unterstützt, die minimalen Temperaturen während der Heizperiode dadurch aber nur ca. 0.2 K höher liegen.

Die Berechnung zeigt das erwartete Temperaturverhalten für 50 Jahre Betrieb auf. Die mittlere minimale Temperatur beträgt nach 50 Betriebsjahren 2.5 °C. Die Anlage ist bezüglich den Anforderungen in der SIA Norm 384/6 (Auslegung auf 0/-3 °C) grosszügig dimensioniert.



Figur 3-3: Temperaturverlauf der mittleren Soletemperatur (schwarz) über 50 Jahre Betriebszeit für die Anlage 1. Dargestellt sind weiter die gemessenen und berechneten mittleren minimalen Temperaturen (blaue Kreise bzw. blaue Dreiecke) sowie die Maximalwerte während des Kühlbetriebes (rote Kreise).

3.2.4 Schlussfolgerung

Bei der Anlage 1 werden die Anlagedaten seit mehr als 7 Jahren aufgezeichnet. Berechnungen zeigen, dass die Anlage hinsichtlich den Rahmenbedingungen in der SIA Norm 384/6 grosszügig dimensioniert ist. Der Temperaturverlauf über 50 Betriebsjahre zeigt Minimaltemperaturen von ca. 2.5 °C. Die Berechnungen zeigen weiter, dass der Einfluss von direktem Kühlen von 10 – 15 % des Wärmebezuges im Winter auf die Regeneration der Anlage relativ gering ist. Direktes Kühlen im Sommer kann die Anlage leicht unterstützen, unterdimensionierte Anlagen können aber über die direkte Kühlung nicht saniert werden.

3.3 Anlage 2

3.3.1 Beschreibung der Anlage 2

Anlage 2 wurde 1985 erstellt. Es wurden zwei Bohrungen à je 60 m abgeteuft. Das Erdwärmesonden-System wurde für die Beheizung eines Einfamilienhauses erstellt, welches damals als Neubau erbaut wurde. Das Warmwasser wird separat erzeugt. Die Bohrungen wurden unterhalb des am Hang befindlichen Hauses im Abstand von 10 m abgeteuft. Die relativ langen Zuleitungen von 15 bzw. 25 m wurden als eine Art Erdregister erstellt, um die Leistungsfähigkeit zusätzlich zu erhöhen.

Im Jahre 2008 wurde die alte Wärmepumpe durch eine neue, effizientere, aber kleinere Wärmepumpe ersetzt, obwohl die alte Wärmepumpe noch voll funktionstüchtig war. Seit 1996 wird während den Sommermonaten auch gekühlt. Die Kühlung erfolgt mit einem Plattenwärmetauscher, ohne Einsatz der Wärmepumpe (direkte Kühlung oder Geocooling).

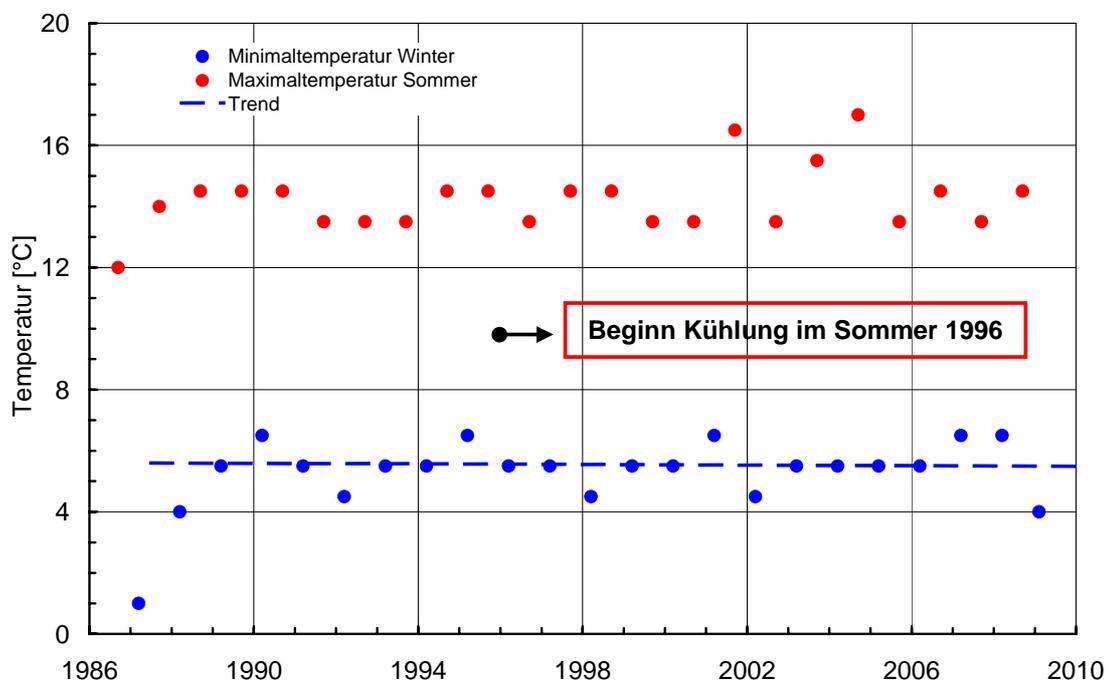
Tabelle 3-6: Beschreibung der Anlage 2.

System	Duplex-Erdwärmesonden, Ø 25 mm
Bohrmeter total	120 m
Anzahl Bohrungen	2
Zuleitung	als eine Art Erdregister verlegt
Sondenfluid	Wasser-Glykol-Gemisch (75%/25%)
Heizbedarf	11 kW, seit 1985
Warmwasserproduktion	Nein
Kühlen	Ja, direktes Kühlen seit 1996

3.3.2 Messdaten

Bei der Anlage 2 werden der Stromverbrauch sowie die Laufzeiten der Wärmepumpe und der Umwälzpumpe gemessen. Zudem sind alle Zu- und Rücklaufrohre am Verteiler der Erdwärmesonden mit Temperaturfühler bestückt. Dadurch kann die Temperatur in allen vier Erdwärmesondenkreisen überprüft werden. Etwa alle zwei Wochen wird über diese Messfühler die Sondentemperatur gemessen. Dazu wird die Anlage ausser Betrieb gesetzt und das Sondenfluid während ca. einer Stunde zirkuliert, um so die über die Erdwärmesonden gemittelte Temperatur zu erhalten. Seit 1986 wurde die Erdwärmesondentemperatur regelmässig gemessen und die minimale Temperatur im Winter und die maximale Temperatur im Sommer registriert.

Die Messdaten sind in Figur 3-4 dargestellt. Die minimalen Temperaturen im Winter zeigen einen sehr stabilen Verlauf über die Jahre. Die typische Temperaturabnahme in den ersten Betriebsjahren mit der anschliessenden Stabilisierung auf tieferem Temperaturniveau ist nicht zu erkennen. So steigen auch die Temperaturen im Sommer jeweils wieder mehr oder weniger auf den Ausgangswert zurück. Es scheint, dass sich hier der Untergrund vollständig regenerieren kann. Daraus könnte man auf Schichtwässer im Untergrund schliessen. Gemäss geologischem Bohrprofil, welches mehrheitlich Mergelschichten zeigt, gibt es aber dafür keine Indizien. Allerdings gibt es in der Nähe eine Brunnenstube und Wasserfassungen für die Gemeinde und bei einigen Bauten in der Umgebung traten Probleme mit Sickerwasser in der Baugrube auf.



Figur 3-4: Über die Erdwärmesonde gemittelte Temperatur. Die Messwerte entsprechen der Sondentemperaturen nachdem die Anlage ausser Betrieb gesetzt und das Sondenfluid während ein bis zwei Stunden zirkuliert wurde. Dargestellt sind die minimalen Temperaturen im Winter und die maximale Temperaturen im Sommer.

3.3.3 Berechnung des Betriebsverhaltens

Anhand der gemessenen Laufzeiten und des Energie- und Leistungsbedarfs wurde das Temperaturverhalten der Anlage nachsimuliert und mit den Messdaten verglichen. Für Aussagen zur Nachhaltigkeit wurde das Betriebsverhalten bis 50 Jahre weiter aufgezeigt. Wie bei Anlage 1 wurde auch hier das firmeninterne Programm eingesetzt, welches auf g-Funktionen basiert.

Die verwendeten, thermischen Parameter des Untergrundes sind in Tabelle 3-7 zusammengestellt. Die initiale, mittlere Bodentemperatur entlang der 60 m tiefen Sonden wurde anhand der maximalen Temperaturen im Sommer geschätzt. Dazu wurden nur diejenigen Betriebsjahre berücksichtigt, während derer noch nicht gekühlt wurde (1986 – 1995; vergleiche Figur 3-4 Jahre). Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität wurden durch Anpassung an die Temperaturmesswerte bestimmt. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit (Tabelle 3-7) liegt über dem in der SIA 384/6 angegebenen Richtwert für Mergelstein von 2.1 W/m·K, was auf die Regeneration durch Schichtwässer hindeuten kann.

Die Angaben zu Heizenergie und Heizleistung stammen vom Anlagebesitzer. Für die Berechnungen wurde für die Betriebsjahre von 1986 bis 2009 die effektive jährliche Heizenergie anhand gemessener Laufzeiten variiert. Für den zukünftigen Betrieb wurde von einem Durchschnittsjahr ausgegangen. Für die Kühlleistung sind Messungen vorhanden. Sie beträgt 3.7 kW. Daraus wurde die Kühlenergie berechnet, unter der Annahme, dass die Kühlung jeweils bei Temperaturen über 24 °C einschaltet. Die Energie- und Leistungsdaten sind in Tabelle 3-8 zusammengestellt.

2008 wurde die alte, noch betriebstüchtige Wärmepumpe durch eine kleinere, mit höherem COP ersetzt, was in der Berechnung berücksichtigt ist. Die Kenndaten der beiden Wärmepumpen sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst. Die Werte für die alte Wärmepumpe stammen vom Anlagebesitzer, diejenigen für die neue vom Datenblatt des Herstellers. Die technischen Daten der Erdwärmesonden sind Tabelle 3-10 zu entnehmen.

Tabelle 3-7: Mittlere thermische Gesteinseigenschaften und Randbedingungen geschätzt für den Standort der Anlage 2.

Parameter	Wert
Mittlere Bodentemperatur [°C]	14.1
Mittlere Wärmekapazität Untergrund [MJ/m ³ ·K]	2.0
Mittlere Wärmeleitfähigkeit Untergrund [W/m·K]	2.7

Tabelle 3-8: Jahresenergie und Leistung für Heizen und Kühlen.

Bezüger	Energiebedarf [kWh]	Maximale Leistung [kW]
Heizen	17'500	11
Kühlen	1'000	3.7

Tabelle 3-9: Kenndaten der alten und neuen Wärmepumpe.

	Temperatur Verdampfer eintritt [°C]	Temperatur Kondensatoraustritt [°C]	Heizleistung [kW]	Kälteleistung [kW]
Alte Wärmepumpe	0	35	11	7.1
Neue Wärmepumpe	0	35	8.9	6.9

Tabelle 3-10: Technische Daten der Erdwärmesonden.

Art der Sonden	Duplex-Erdwärmesonden, Ø 25 mm
Anzahl	2
Tiefe	je 60 m
Abstand	10 m
Zuleitung als Erdregister verlegt	geschätzt ca. 2 x 5 m Bohrmeteräquivalent
Kältemittel	Wasser/Ethylenglykol-Gemisch (75%/25%)
Hinterfüllung	Standard (Wärmeleitfähigkeit 0.8 W/m·K)

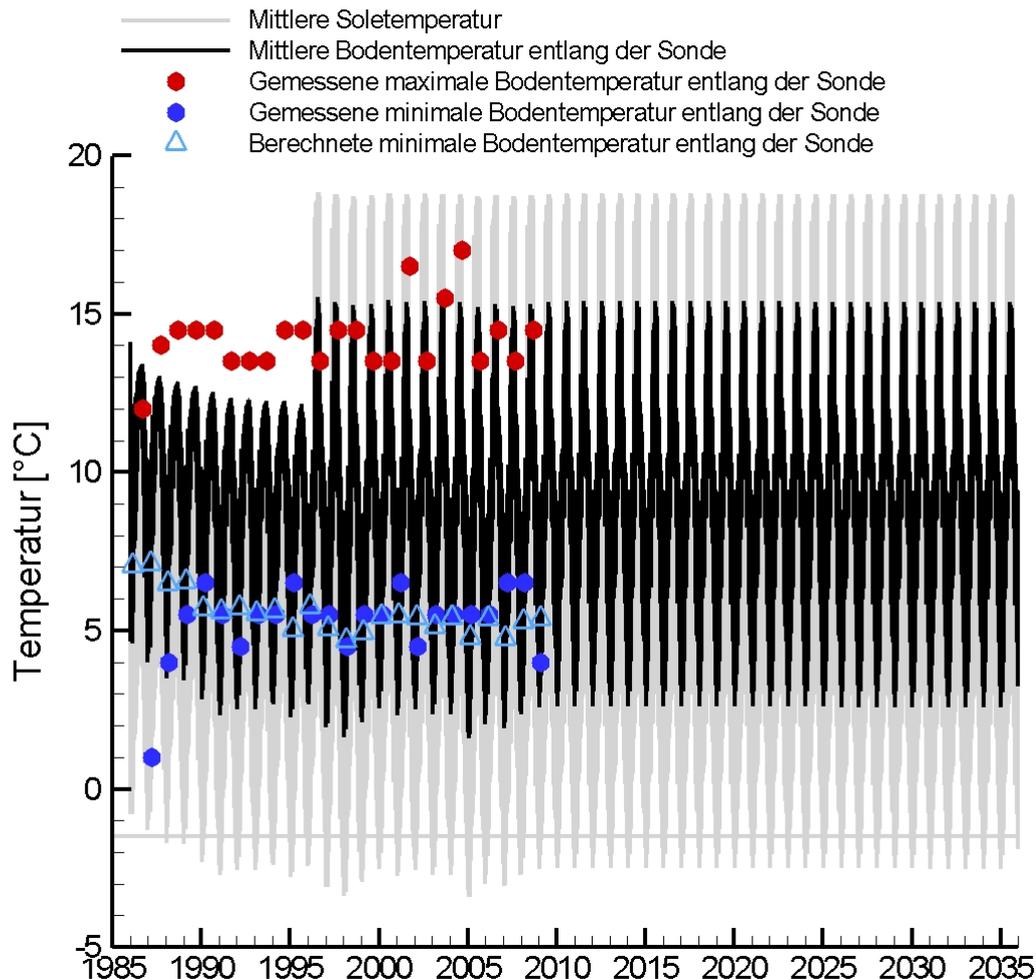
In Figur 3-5 ist der berechnete Verlauf der mittleren Soletemperatur sowie der mittleren Temperatur entlang der Erdwärmesonden über 50 Jahre Betriebszeit dargestellt. Für den Vergleich mit den Messdaten wird zudem der entsprechende, berechnete Wert aufgeführt. Es ist dies die mittlere Temperatur entlang der Erdwärmesonden jeweils 1 Stunden nach der tiefsten Betriebstemperatur pro Heizperiode (vergleiche auch Kapitel 3.3.2). Die gemessenen und die berechneten mittleren minimalen Erdwärmesondentemperaturen zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Unterschiede in den ersten beiden Jahren könnten auf einen erhöhten Bedarf durch Bauaustrocknung und den sehr kalten Winter 1986/86 zurückgehen. Allgemein zeigt die Berechnung die typischen, abnehmenden Temperaturwerte, die sich nach ca. 10

Jahren stabilisieren. Die gemessenen Temperaturen zeigen hingegen keine solche Abnahme. In den Jahren ohne Kühlbetrieb (bis 1996), erreichen die berechneten Temperaturen im Sommer nie die gemessenen Temperaturen. Die Messwerte für Sommer und Winter sind relativ konstant. Das lässt auf eine mehr oder weniger vollständige Regeneration des Untergrundes im Sommer schliessen. Dies könnte mit Schichtwasser, d.h. leicht fliessendem Wasser in den wasserdurchlässigen Schichten, zusammenhängen. Gemäss geologischem Bohrprofil gibt es aber keine Hinweise auf solche Strömungen. Die benachbarte Brunnen und Grundwasserfassungen sowie das in einigen Baugruben aufgetretene Sickerwasser könnten aber trotzdem auf eine thermisch aktiver Grundwasserströmung hindeuten, die die Regeneration unterstützt.

Wie bereits bei der Anlage 1 zeigt auch hier der Vergleich einer Berechnung mit und ohne direktes Kühlen im Sommer, dass Kühlung, welche bei solchen Anlagen im Bereich von ca. 10 % des Heizenergiebezuges im Winter liegt, die Regeneration des Untergrundes während des Sommers leicht unterstützen kann. Der Beitrag liegt aber im Bereich von wenigen Zehntel °C.

2008 wurde die alte Wärmepumpe durch eine kleinere, aber effizientere ersetzt. Da die Kälteleistungen relativ ähnlich sind, bleibt die Belastung der Erdwärmesonden ungefähr gleich (siehe Tabelle 3-9).

Allgemein zeigt die Berechnung, dass die Anlage gemäss heutigen Vorschriften nach SIA Norm 384/6 leicht unterdimensioniert wäre. Die berechnete, minimale mittlere Temperatur liegt nach 50 Jahren für ein mittleres Jahr bei -2.5 °C . Der Grenzwert von -1.5 °C gemäss SIA Norm 384/6 wird während 130 Stunden unterschritten. Im kältesten, berechneten Jahr 2005 (siehe Figur 3-5) ist die minimale mittlere Temperatur sogar -3.4 °C . Mit den Werten gemäss Tabelle 3-7 müssten die Erdwärmesonden für die Einhaltung der SIA Norm 384/6 je 67 m tief gebohrt werden, anstelle von 60 m (siehe Tabelle 3-10). Die Zuleitungen wurden dabei ebenfalls zusätzlich als Äquivalent von je 5 Sondenmeter angenommen. Die Anlage läuft aber gemäss Besitzer seit Beginn äusserst zufriedenstellend. Die vorhandenen Messdaten deuten daraufhin, dass sich der Untergrund hier sehr gut regenerieren kann, und die Berechnungen zeigen, dass die Anlage auch in den kommenden Jahrzehnten ähnliche gut laufen sollte.



Figur 3-5: Berechneter Verlauf der gemittelten Soletemperatur (grau) und der mittleren Bodentemperatur entlang der Erdwärmesonde (schwarz) über 50 Jahre Betriebszeit für die Anlage 2. Dargestellt sind zudem die gemessenen und berechneten Minimaltemperaturen (blaue Kreise bzw. blaue Dreiecke) entlang der Erdwärmesonde jeweils 1 Stunden nach der tiefsten Betriebstemperatur pro Heizperiode sowie die Maximalwerte während des Kühlbetriebes.

3.3.4 Schlussfolgerung

Dank den regelmässigen Messungen der Erdwärmesondentemperaturen lassen sich Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten einer Anlage über 25 Jahre ziehen. Aus heutiger Sicht ist die Anlage leicht unterdimensioniert. Um die Vorschriften der SIA Norm 386/4 einzuhalten müssten ca. 10 % tiefere Erdwärmesonden installiert werden. Die Langzeitmessungen zeigen jedoch, dass die Anlage einwandfrei funktioniert. Offenbar regeneriert sich der Untergrund während der Sommermonate sehr gut.

Der Ersatz der Wärmepumpe nach fast 25 Jahren durch eine neue zeigt beim Betrieb keine grossen Änderungen. Dies hat mit der Wahl der Wärmepumpe zu tun. Es wurde eine zwar

effizientere, aber kleinere Wärmepumpe eingebaut. Dadurch bleibt die Belastung der Sonde in etwa gleich. Eine Überlastung der Sonden kann vermieden werden, wenn beim Ersatz einer Wärmepumpe auf die gleiche Kälteleistung geachtet wird. Dies setzt jedoch einen passenden Wärmebedarf des Hauses voraus.

Direktes Kühlen im Sommer unterstützt die Regeneration des Untergrundes. Der Beitrag liegt jedoch im 10tel-Grad Bereich. Stark unterdimensionierte Erdwärmesonden-Anlagen können so nicht saniert werden.

3.4 Berechnung der Wärmegestehungskosten

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten wurde das übliche Verfahren mit folgenden Kostenkomponenten verwendet:

- Kapitalkosten (Verzinsung des investierten Kapitals)
- Energiekosten (Stromkosten der Wärmepumpe und Hilfsaggregate)
- Bedienungs- und Wartungskosten (Überwachung, Reparaturen, etc.)

Die Kapitalkosten werden nach der Annuitätsmethode berechnet, d.h. die Investitionen werden über die Nutzungsdauer mit Hilfe der Zinsrechnung in gleich hohe jährliche Raten (Annuitäten) umgerechnet. Die Parameter für die Berechnung werden aus der SIA Norm 384/6 übernommen (siehe Tabelle 3-11). Als Zinssatz wird 4 % angenommen.

Tabelle 3-11: Parameter für die Berechnung der Wärmegestehungskosten gemäss SIA Norm 384/6.

	Jährliche Wartungs- und Unterhaltskosten in % des Anlagewertes	Nutzungsdauer in Jahre
Erdwärmesonde und Zuleitungen	0	50
Wärmepumpe	1 - 2%	20
Erdwärmesondenkreislauf (Leitungen und Armaturen)	1 - 2%	20

Allgemein mussten für die Berechnung der Wärmegestehungskosten viele Annahmen getroffen werden, da zum Beispiel aufgrund des bereits mehrere Jahrzehnte dauernden Betriebes nicht mehr alle Angaben zu Investitionskosten vorhanden waren. Die Wärmegestehungskosten für die beiden Objekte sind in Tabelle 3-12 und Tabelle 3-13 zusammengestellt.

Für die Anlage 1 ergibt sich ein Wärmepreis von 13 Rp./kWh. Bei der Anlage 2 haben einige Anlagekomponenten ihre "Lebensdauer" bereits überschritten und sind komplett abgeschrieben. Zusätzlich sind gemäss Besitzer die Stromkosten durch Umrüstung auf eine effizientere Wärmepumpe um 30 % gefallen. Werden diese beiden Punkte berücksichtigt, ergibt sich ein momentaner Wärmepreis von 11 Rp./kWh. Beide Anlagen zeigen, dass bei Erdwärmesonden-Anlagen die Kapitalkosten bei weitem den grösste Anteil an den Jahreskosten ausmachen. Die Betriebskosten fallen relativ günstig aus, so dass eine Strompreisteuerung nur eine geringe Erhöhung der Wärmegestehungskosten bewirkt.

Bei einer Ölanlage mit ähnlicher Anlagengrösse würden die Wärmegestehungskosten bei einem Ölpreis von aktuell CHF 80.00 (Februar 2010) bei ca. 20 Rp/kWh liegen (Datenbasis: Infoblatt EW Rapperswil-Jona Sept. 2001). Hier machen die jährlichen Betriebskosten (Ölpreis) den Hauptanteil der Wärmegestehungskosten aus.

Beide Erdwärmesonden-Anlagen sind somit mit ihren Wärmegestehungskosten überaus konkurrenzfähig (vgl. auch Rybach et al., 2004). Die Umfrage bei den Anlagebesitzern in Kapitel 2 zeigt auch, dass die Lebensdauer der Anlageteile, nach heutigem Wissensstand, wesentlich über dem Amortisationssatz in der SIA Norm 384/6 (Tabelle 3-11) liegt. Bei einem durchschnittlichen Alter der betrachteten Anlagen von 25 Jahre ist die durchschnittliche Lebensdauer aller Wärmepumpe bis zum jetzigen Zeitpunkt 23 Jahren, und bei keiner Anlage musste der Erdwärmesondenkreis ersetzt werden. Die Wärmegestehungskosten von Erdwärmesondenanlagen liegen somit eher etwas tiefer, als allgemein ausgewiesen.

Tabelle 3-12: Berechnung der Wärmegestehungskosten für die Anlage 1 (siehe Kapitel 3.2). Die Parameter für die Amortisation und die Berechnung der Wartungskosten sind in Tabelle 3-11 zusammengestellt.

Eingabedaten

Quelle	Besitzer		
Investitionskosten	CHF 36'225	CHF 11'000	Wärmepumpe
		CHF 700	Umwälzpumpe
		CHF 17'225	Bohrung/Erdwärmesonde
		CHF 4'200	Anschlüsse (WP, Zuleitung)
		CHF 1'200	Regelung/Elektrik
		CHF 400	Grabarbeiten
		CHF 1'000	Planung
		CHF 500	Diverses (Geologe)
Wartungskosten	CHF 171	Nach SIA Norm 384/6 berechnet, Angaben gemäss Besitzer CHF 0/Jahr	
Stromverbrauch	4'650 kWh / a	Angaben gemäss Besitzer	
Produzierte Wärmeenergie	22'750 kWh / a	Angaben gemäss Besitzer	

Berechnung der Wärmegestehungskosten

Kapitalkosten	CHF 2'189	74%	(Anteil an den Jahreskosten)
Wartungskosten	CHF 171	6%	
Stromkosten	CHF 609	21%	
Jahreskosten total	CHF 2'969		
Wärmegestehungskosten	13 Rp. / kWh		

Tabelle 3-13: Berechnung der Wärmegestehungskosten für die Anlage 2 (siehe Kapitel 3.3). Die Parameter für die Amortisation und die Berechnung der Wartungskosten sind in Tabelle 3-11 zusammengestellt.

Eingabedaten

Quelle	Besitzer		
Investitionskosten	CHF 28'268	CHF 8'000	Wärmepumpe (ersetzt, obwohl noch funktionstüchtig)
		CHF 500	Umwälzpumpe
		CHF 11'328	Bohrung/Erdwärmesonden
		CHF 3'680	Anschlüsse (WP, Zuleitung)
		CHF 1'570	Regelung/Elektrik
		CHF -	Grabarbeiten (Eigenleistung)
		CHF -	Planung (Eigenleistung)
		CHF 3'190	Diverses (Pufferspeicher, Geologe)
Wartungskosten	CHF 138	Nach SIA Norm 384/6 berechnet, Angaben gemäss Besitzer CHF 20/Jahr	
Stromverbrauch	6'500 kWh / a	Angaben gemäss Besitzer	
Produzierte Wärmeenergie	17'500 kWh / a	Angaben gemäss Besitzer	

Berechnung der Wärmegestehungskosten

Kapitalkosten	CHF 1'774 <i>CHF 1'116^{*)}</i>	64 %	(Anteil an den Jahreskosten)
Wartungskosten	CHF 138	5 %	
Stromkosten	CHF 848 <i>CHF 600^{*)}</i>	31 %	
Jahreskosten total	CHF 2'759		
Wärmegestehungskosten	16 Rp. / kWh 11 Rp. / kWh^{*)}		

**)Kursive: Wärmegestehungskosten für Kapitalkosten ab dem 20. Betriebsjahr, nach Ablauf der Amortisationszeit (vgl. Tabelle 3-11) einiger Anlagekomponenten, und durch Reduktion der Stromkosten beim Ersatz der Wärmepumpe durch eine effizientere (siehe Text).*

4. Schlussfolgerungen

Erdwärmesondensysteme sind in der Schweiz sehr verbreitet und sind eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative zu anderen Heizungen. In diesem Projekt wurden die Betriebserfahrungen mit Erdwärmesonden-Systemen, welche seit Jahrzehnten in der Schweiz in Betrieb stehen, ausgewertet und in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit bewertet.

Im ersten Projektteil wurde eine Umfrage bei Besitzern von "alten" Anlagen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag darin, herauszufinden, wie Erdwärmesondenanlagen über längere Zeit laufen und wie zufrieden die Besitzer mit ihrer Anlage sind. Die Umfrage ergab ein sehr gutes Resultat: 94% der Anlagen sind noch in Betrieb und 88% der Besitzer sind zufrieden bis sehr zufrieden mit ihrer Anlage. Die meisten Anlagen funktionieren immer noch einwandfrei. Allerdings besteht ein gewisses Risiko darin, dass es durch den Ersatz der alten Wärmepumpen durch neue Wärmepumpen mit verbessertem COP zu einer Überlastung der Erdwärmesonden kommen kann.

In Deutschland sind kürzlich zwei Studien erschienen, in welchen unter anderem auch den Betriebserfahrungen bei Erdwärmepumpen-Anlagen nachgegangen wurde (Kölbel et al. 2009, Sawillion, 2009). Allerdings ist der Betrachtungszeitraum wesentlich kürzer, als in der vorliegenden Untersuchung. In den deutschen Studien ging es mehr um die Erfassung einer möglichst grossen Zahl neuer Anlagen (über 1'000). Insbesondere wurden die Beweggründe der Bauherren zur Wahl der Geothermie-Lösung erfragt. Die generelle Zufriedenheit der Besitzer von Erdwärmepumpen-Anlagen haben auch diese zwei Studien aufgezeigt. Die meisten Bauherren würden sich wieder für die Erdwärme-Lösung entscheiden.

In einem zweiten Projektschritt wurden Messdaten von zwei Anlagen analysiert und numerisch nachsimuliert. Die Vorwärtssimulation beider Anlagen für eine Betriebszeit von 50 Jahren zeigt, dass der Betrieb von Erdwärmesonden-Anlagen nachhaltig ist. Die Analyse zeigt zudem, dass die Wärmegestehungskosten sehr konkurrenzfähig sind.

Gesamthaft erwiesen sich die Anlagen auch im Langzeit-Betrieb als zuverlässig, womit die Nachhaltigkeit der Produktivität garantiert ist. Dies ist auch im internationalen Vergleich ein bemerkenswertes Resultat, da der Nachweis zum ersten Mal anhand von Daten an effektiv betriebenen Anlagen erbracht wird.

Aus der Auswertung der Fragebogen zum Langzeitverhalten und der Analyse des Betriebsverhaltens der untersuchten zwei Anlagen lassen sich folgende Schlüsse in Bezug auf die eingangs erwähnten Zielfragen der Studie ziehen:

1.	Laufen Erdwärmesonden über mehrere Jahre hinweg zuverlässig und zufrieden stellend?
	Von den untersuchten 33 Anlagen, welche zwischen 1979 – 1985 erstellt wurden, sind 31 immer noch in Betrieb. 30 von diesen 33 Besitzer sind mit ihrer Anlage zufrieden bis sehr zufrieden. Somit lässt sich sagen, dass Erdwärmesonden auch über eine längere Zeit von 25 Jahren hinweg sehr zuverlässig und zufriedenstellend laufen.

2.	Laufen Erdwärmesondenanlagen auch nach allfälligen Änderungen, wie dem Einbau einer neuen Wärmepumpe oder Umbauten noch gut?
	<p>Bei 17 Anlagen wurde die Wärmepumpe ersetzt. Bei 4 Anlagen sind dadurch Probleme aufgetreten, die teilweise auf eine Überlastung der Erdwärmesonden aufgrund der neueren, effizienteren Wärmepumpen hindeuten.</p> <p>Zu bemerken ist der Umstand, dass bei drei Anlagen Vereisungen sowie Bodenhebungen und Senkungen aufgetreten sind. Die ersetzten Wärmepumpen weisen einen höheren COP auf, was zu einer grösseren Belastung der Erdwärmesonde führt. Es ist zu erwarten, dass bei zunehmendem Ersatz der Wärmepumpen durch solche mit verbessertem COP, Erdwärmesonden unterdimensioniert sein können und vermehrt Probleme wie Vereisungen mit daraus resultierenden Hebungen/Senkungen auftreten könnten.</p> <p>11 der Gebäude wurden renoviert oder umgebaut (grössere Wohnfläche, höhere Raumtemperatur, bessere Isolation). Die Anlagebesitzer meldeten jedoch keine direkt daraus resultierenden Probleme beim Anlagebetrieb.</p>

3.	Was sind die "grössten" Schwachstellen beim Betrieb über mehrere Jahre und auf was muss besonders geachtet werden, um eine langjährige Funktionstüchtigkeit der Anlage zu gewährleisten?
	<p>Die meisten Probleme traten bei der Wärmepumpe und der Erdwärmesonde auf. Traten Probleme bei den Erdwärmesonden auf, beruhten diese zur Hälfte auf unterdimensionierten Sondenlängen. Die restlichen 50 % betrafen das Nachfüllen von Frostschutzmittel, was bei Anlagen mit über 25 Betriebsjahren als normale Wartungsarbeiten betrachtet werden kann.</p> <p>Es empfiehlt sich, auf eine fachgerechte Auslegung und Ausführung der Erdwärmesonde zu achten. Wichtige Hinweise dazu sind in der SIA Norm 384/6 enthalten, die seit Anfangs 2010 in Kraft ist. Darin sind die Bedingungen für die Dimensionierung und Ausführung von Erdwärmesondensystemen beschrieben.</p> <p>Allgemein ist auf eine richtige Abstimmung der Erdwärmesonde mit der eingesetzten Wärmepumpe zu achten. Dazu gehört auch eine richtige Auslegung der Hydraulik.</p>

4.	Wie nachhaltig sind Erdwärmesondensysteme?
	<p>Nach mindestens 25 Betriebsjahren laufen noch 31 der 33 Anlagen. Die 2 Anlagen, die nicht mehr betrieben werden, waren mit Prototyp-Gasmotor-Wärmepumpen ausgestattet, welche wegen der Schadensanfälligkeit und der hohen Wartungskosten ausser Betrieb genommen wurden. Von den Standard-Elektrowärmepumpen Anlagen sind noch alle in Betrieb. Über 90 % der Besitzer sind mit ihren Anlagen zufrieden.</p> <p>Wie oben erwähnt, liegt allerdings ein gewisses Risiko darin, dass mit dem Ersatz der alten Wärmepumpen durch neue Wärmepumpen mit verbessertem COP eine Überbelastung und ein Gefrieren der Erdwärmesonde einhergehen könnte. Durch den zukünftigen Ersatz von weiteren alten Wärmepumpen könnten solche Fälle vermehrt auftreten.</p> <p>Es ist wichtig, dass die Wärmepumpe mit den Erdwärmesonden abgestimmt ist. Bei einem Ersatz soll abgeklärt werden, ob die vorhandenen Erdwärmesonden der Verdampferleistung der Ersatzwärmepumpe genügen. Dazu soll die SIA Norm 384/6 zu Rate gezogen werden. Wird die Norm nicht erfüllt, muss entweder der Energiebedarf des Gebäudes verringert oder die Wärmequelle (Erdwärmesonden) vergrössert werden.</p> <p>Bei einer Unterdimensionierung können Schäden entweder über eine entsprechend programmierte Steuerung verhindert werden, was aber ein zusätzliches Heizsystem voraussetzt oder die Wärmequelle wird erweitert. Dies kann durch zusätzliche Erdwärmesonden oder Erdwärmekörbe geschehen. Bei grösseren Anlagen kann auch über einen Rückwärmer (Luftwärmetauscher) die Temperatur der Erdwärmesonden angehoben werden.</p> <p>Direktes Kühlen im Sommer kann die Anlage unterstützen, unterdimensionierte Anlagen können aber alleine über die direkte Kühlung kaum saniert werden.</p>

5.	Wie hoch liegen die Wärmegestehungskosten von Erdwärmesondensystemen?
	<p>Die Betriebsdaten der zwei untersuchten Anlagen ergeben Wärmegestehungskosten von 11 – 13 Rp./kWh. Beim Ölpreis von CHF 80.00 (Februar 2010) wären die Wärmegestehungskosten einer entsprechenden Ölheizung bei ca. 20 Rp./kWh.</p> <p>Bei Erdwärmesonden-Anlagen machen die Kapitalkosten bei weitem den grössten Anteil der Jahreskosten aus. Eine Erhöhung der Energiekosten (Strom) hat dadurch einen relativ geringen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten.</p> <p>Die Studie zeigt weiter, dass die Lebensdauer der einzelnen Anlagekomponenten höher ist, als die Amortisationssätze aus der SIA Norm 384/6, welche für die Berechnung verwendet wurden. Die effektiven Wärmegestehungskosten liegen somit sogar noch etwas tiefer.</p>

5. Literaturverzeichnis

Kölbel, T., Münch, W.; König, R., Leucht, M., Campillo-Bermudo, G. (2009): Marktanalyse Erdwärme. bbr Sonderheft, p. 2-8, Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

Rybach, L., Bassetti, S., Rohner, E., Sellami, S. (2004). Erfolgskontrolle und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Messkampagnen zu P&D Anlagen. Bundesamt für Energiewirtschaft, Schlussbericht.

Sawillion, M. (2009): Ergebnisse der Evaluierung von 150 bestehenden Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlagen. Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, GeoTHERM Offenburg/D

SIA Norm 384/6. Erdwärmesonden.

6. Anhang – Fragebogen

 <p>GEOTHERMAL ENERGY HYDROGEOLOGY ENGINEERING NUMERICS</p>	<p>S W I S S G E O T H E R M A L E X P E R T G R O U P</p>	G E O W A T T A G	Tel	+41 (0)44 242 14 54
		Dohlenweg 28	Fax	+41 (0)44 242 14 58
		CH - 8050 Zürich	info@geowatt.ch	www.geowatt.ch

Geowatt AG
 Dohlenweg 28
 8050 Zürich
 Fax: 044 242 14 58

Fragebogen Langzeitstudie Erdwärmesonden

Vorhandene Angaben Ihrer Anlage: Bitte durchlesen und gegebenenfalls korrigieren

Besitzer: _____

Standort/Adresse: _____

Anzahl Erdwärmesonden: _____

Gesamtlänge Erdwärmesonden: _____

Inbetriebnahmedatum der Anlage: _____

Wärmeträgerflüssigkeit:

Wasser-Glykolgemisch Reines Wasser neu: _____

Modell Wärmepumpe: _____

Leistung Wärmepumpe (B0W35): _____

Heizsystem:

Fussbodenheizung Radiatoren Decken-/Wandheizung

monovalent (nur mit Wärmepumpe) bivalent (zusätzlich ein anderes System)

Pufferspeicher

vorhanden nicht vorhanden neu: _____

Warmwasser-Aufbereitung:

Wärmepumpe Sonnenenergie Elektroboiler sonstige: _____

Warmwasserverbrauch: _____

Wohnfläche: _____

Wärmebedarf Haus: _____



Fragen zum Langzeitverhalten**Allgemeines:**

- 1) Ist die Anlage noch in Betrieb?
- Nein. Grund: _____
- Ja.
- 2) Wie zufrieden sind Sie mit der Anlage?
- Ausgezeichnet
- Gut
- Genügend
- Ungenügend
- 3) Würden Sie sich noch einmal für eine Erdwärmesonde entscheiden?
- Nein, weil: _____
- Ja.

Probleme:

- 4) Sind bei der Anlage Probleme/Reparaturen aufgetreten?
- Nein.
- Ja: Wo? (bitte Zutreffendes ankreuzen)
- Erdwärmesonde
 - Eisbildungen
 - Hebungen/ Senkungen
 - Frostschutz nachfüllen
 - anderes: _____
 - Zuleitung ab Erdwärmesonde zur Wärmepumpe
 - Wärmepumpe
 - Kellerinstallation
 - Wärmeverteilung
 - Steuerung
 - Sonstiges: _____
 - Grössere Reparaturen: _____

Änderungen

- 5) Hat sich der Heizbedarf des Hauses geändert (durch Sanierung, Wärmedämmung/ Isolation, neue Fenster, Ausbau, Anschluss Warmwasserboiler an Wärmepumpe, Anschluss Swimmingpool/Whirlpool, etc.)?

Nein.

Ja:

Geändert am Haus: _____

Neuer Wärmebedarf (falls bekannt): _____

Heutige Wohnfläche: _____

Geändert seit: _____

Heutige Anzahl Personen im Haushalt: _____

- 6) Wie wird zur Zeit das Warmwasser produziert?

Mit: Wärmepumpe Elektoboiler
 Sonnenenergie sonstige

- 7) Wurde das Heizsystem im Haus geändert?

Nein.

Ja. Was: _____

- 8) Wurde eine weitere Erdwärmesonde installiert?

Nein.

Ja. Grund: _____

Anzahl neuer EWS: _____

Gesamtlänge neuer EWS: _____

- 9) Wurde die Wärmepumpe ersetzt?

Nein.

Ja.

Typ/Leistung: _____ / (B0W35) _____

Leistung: grösser als vorher kleiner als vorher

Grund für den Ersatz:

defekt Lebensdauer abgelaufen bessere Effizienz

zu laut andere: _____

Datum des Ersatzes: _____

10) Gab es Probleme explizit durch den Ersatz der Wärmepumpe?

Nein.

Ja. Welche:

Hebungen/ Senkungen im Garten

Vereisungen der Zuleitungen

Raumklima ungenügend

anderes: _____

11) Was ist die tiefste jemals gemessene Sondentemperatur im Winter? _____

12) Wird mit der Erdwärmesonde in den Sommermonaten auch gekühlt?

Nein.

Ja. Seit wann? _____

Zufriedenheit:

Ausgezeichnet

Gut

Genügend

Ungenügend

Kommentare:

Möchten Sie den Schlussbericht zum Langzeitverhalten von Erdwärmesonden zugesandt erhalten?

Ja

Nein

Ihre e-mail Adresse, falls Sie den Bericht per e-mail erhalten möchten:
