

Schlussbericht, 19. November 2015

Simulationen gemessener Erdwärmesondenfelder



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Verfasser

Daniel Pahud, LESBAT – HEIG-VD – HESSO

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Anschrift

Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment, HEIG-VD, Av. des Sports 20, CH-1401 Yverdon-les-Bains

Tel. 024 557 61 44, Fax 024 557 73 87, info@lesbat.ch, www.lesbat.ch

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Zielstellung..... | 5 |
| 3 | Methoden..... | 5 |
| 3.1 | Simulationsmodell..... | 6 |
| 3.2 | Wahl der Simulationsparameter..... | 6 |
| 3.3 | Vergleich Simulation - Messungen..... | 7 |
| 4 | Ergebnisse | 8 |
| 4.1 | Vorliegende Messungen von Erdwärmesondenfeldern | 8 |
| 4.2 | Vergleich Simulation - Messungen..... | 8 |
| 4.3 | Sensitivitätsanalyse | 13 |
| 4.4 | Langzeitanalyse | 16 |
| 4.5 | Analyse des Wärmeentzugs- und -eintragsprofils | 18 |
| 5 | Fazit | 20 |
| 6 | Verdankungen..... | 21 |
| 7 | Referenzen | 21 |
| 8 | Liste der Abbildungen und Tabellen | 22 |
| 9 | Liste der Anhänge..... | 22 |

1 Einleitung

Seit vielen Jahren werden Anlagen mit Erdwärmesonden realisiert, und die eingesetzten Technologien (Erdwärmesonden und Wärmepumpen) sind ausgereift und bewährt. Der Erfolg dieser Erdwärmeanlagen kann anhand der Gesamtlänge neuer, jedes Jahr verlegter Erdwärmesonden gemessen werden. Eine Vorstellung kann man sich anhand der durch die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz veröffentlichten Statistik machen (siehe Abbildung 1).

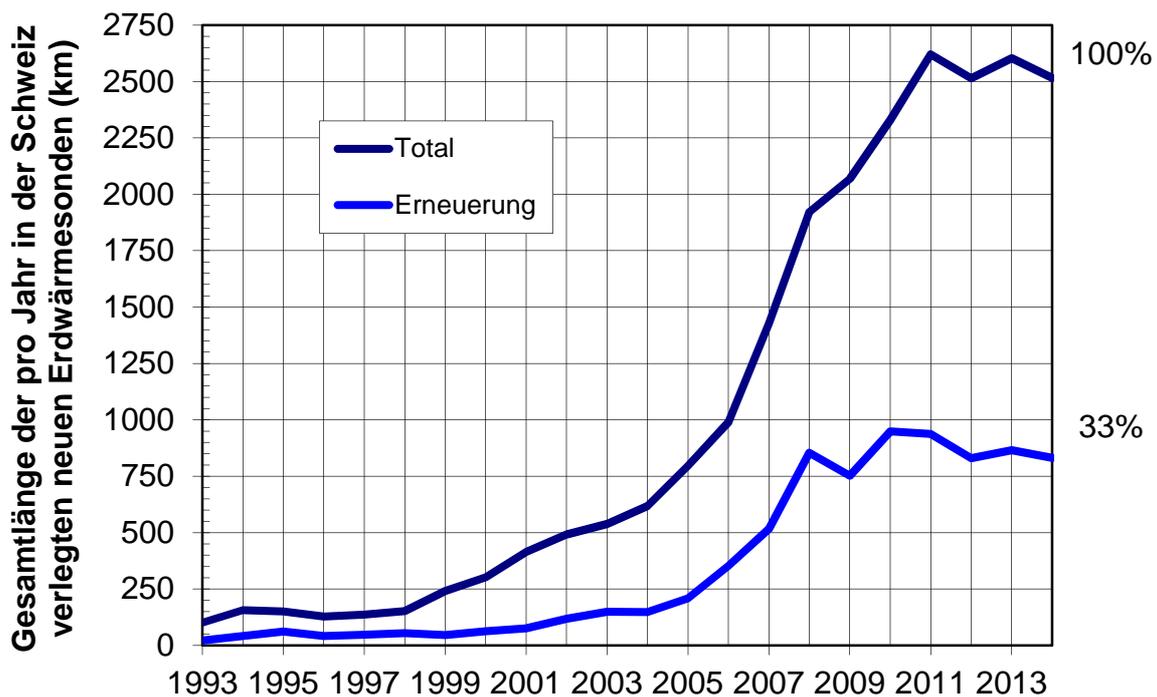


Abbildung 1: Gesamtlänge der pro Jahr in der Schweiz verlegten neuen Erdwärmesonden (Quelle: FWS)

Der Ausbau und die Verbreitung solcher Anlagen führen einerseits zum Bau immer grösserer Erdwärmesondenfelder und andererseits zur Verdichtung kleiner Anlagen, die in bestimmten Zonen immer mehr zunehmen.

Immer häufiger wird über eine Übernutzung der geothermischen Ressource und negative Einflüsse zwischen benachbarten Anlagen diskutiert. Studien wurden durchgeführt, unter anderem eine durch die Stadt Zürich in Auftrag gegebene, die 2014 abgeschlossen wurde [1].

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, über bewährte Simulationstools zu verfügen, da sie nicht nur für die Auslegung eines Erdwärmesondenfeldes, sondern auch für Projektionen in die Zukunft oder im Raum verwendet werden. Mit den dadurch gelieferten Ergebnissen muss es möglich sein, verlässliche und zufriedenstellende Antworten für die laufenden Diskussionen zu geben. Ihre Gültigkeit muss in immer komplexeren Situationen überprüft werden.

2 Zielstellung

Das Hauptziel besteht darin, bestehende Erdwärmeeinrichtungen zu simulieren und die Ergebnisse den Messungen gegenüberzustellen. Dabei geht es darum zu beobachten, in welcher Form durch die Berechnungen Messungen reproduziert werden können, und herauszubekommen, ob die nach den aktuellen Verfahren durchgeführten Simulationen bei der Voraussage des thermischen Verhaltens des Untergrundes und der Sonden eine Sicherheitsmarge enthalten.

Dies setzt vor allem voraus, über Messungen von Erdwärmeeinrichtungen zu verfügen, die mit einer hohen zeitlichen Auflösung (Stundenmessungen) über einen langen Betriebszeitraum (mehrere Jahre) durchgeführt werden. Ausserdem ist es unerlässlich, falls keine detaillierten Messungen der Anlage seit ihrer Inbetriebnahme vorliegen, mindestens die jährlich übertragenen Energien zu kennen, um die Vorgeschichte der Nutzung der Anlage herleiten zu können.

Folgende Kriterien werden nach Möglichkeit zur Auswahl der Anlagen verwendet:

- reine Heizungsanlage,
- Anlage mit mehreren Erdwärmesonden,
- Vorliegen mehrerer Messjahre, idealerweise rund zehn Jahre,
- technische Daten der Anlage, inklusive Daten der Erdwärmesonden und des Untergrundes, sind bekannt und liegen vor.

3 Methoden

Zuerst geht es darum, ein geeignetes Programm zur Simulation eines oder mehrerer Erdwärmesondenfelder auszuwählen, das ausreichend verbreitet ist und als Referenz für die meisten Berechnungsprogramme für Anlagen mit Erdwärmesonden verwendet wird.

Weiterhin muss das Simulationsprogramm richtig parametrisiert werden, das heisst, mit den gleichen Parametern wie in der Planungsphase der Anlage. Dabei geht es nicht darum, die Simulationsparameter zu kalibrieren, um die Messungen zu reproduzieren.

Schliesslich werden die Simulationsergebnisse mit den Messungen verglichen. Die in das Erdwärmesondenfeld übertragenen Leistungen werden in das Simulationsprogramm eingegeben, und die simulierten werden mit den gemessenen Wärmeträgertemperaturen verglichen.

3.1 Simulationsmodell

Das für die Studie gewählte Programm ist TRNSBM, das nichts anderes als das Programm SBM (Superposition Borehole Model) [2] ist, das in die Software TRNSYS (Transient System Simulation) [3] integriert wurde. SBM wurde an der Universität Lund in Schweden entwickelt und ermöglicht die Simulation einer willkürlichen Zahl willkürlich angeordneter Erdwärmesonden (siehe Abbildung 2).

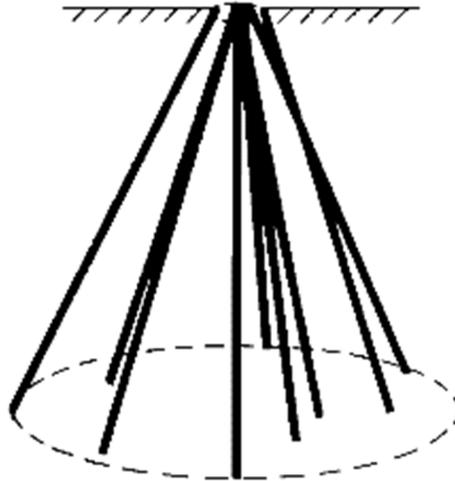


Abbildung 2: Das SBM-Programm ermöglicht die Simulation einer willkürlichen Zahl willkürlich angeordneter Erdwärmesonden

Das SBM-Programm wurde wiederholt erprobt und führte zu zahlreichen g-Funktionen, die durch verschiedene Auslegungsprogramme für Erdwärmesonden verwendet werden (EED Earth Energy Designer, EWS Erdwärmesonden, etc.).

In dieser Studie wird die mit TRNSYS Version 16 und plus kompatible Version 2012 von TRNSBM [4] verwendet, die mit den Messungen einer Anlage mit drei Erdwärmesonden bestätigt wurde. Sie ist präziser als die Vorgängerversion, da alle Berechnungen als „double precision“ ausgeführt werden. Ausserdem bietet ihr Einsatz in TRNSYS die Möglichkeit, die Wärmekapazität des Wärmeträgers und der Sonden sowie die Wärmeübertragungen der oberirdischen Anschlussleitungen zwischen den Sonden und dem oder den Verteilern zu berücksichtigen.

3.2 Wahl der Simulationsparameter

Die Berechnungsparameter bezüglich des Untergrundes, der Erdwärmesonden und der Wärmeleistungen der Wärmepumpe werden mit ihren Planungswerten vorgegeben und müssen der SIA-Norm 384/6 „Erdwärmesonden“ entsprechen [5]. Dadurch schliessen die Berechnungsparameter die durch die Norm vorgesehenen Sicherheitsmargen ein. Diese sind je nach Genauigkeitsgrad der vorliegenden Informationsquelle oder der Analyse zur Bestimmung der beiden wichtigsten Parameter für die thermische Charakterisierung des Untergrundes (Wärmeleitfähigkeit und natürliche Temperatur des Untergrundes) mehr oder weniger gross.

3.3 Vergleich Simulation - Messungen

Durch die Messungen, sofern sie mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit durchgeführt werden, kann der tatsächliche Betrieb einer Anlage widergespiegelt werden. Dieser hängt von den Merkmalen des Untergrundes und der Sonden, aber auch von der Verwendung der Sonden im System und damit ihrer Einbindung in das Energiekonzept des Systems ab. All dies sind Daten, die in ein Simulationsprogramm für eine korrekte Auslegung der Sonden einzugeben sind.

In dieser Studie ist die Nutzung der Sonden durch die Messungen vorgegeben. Das bedeutet, dass das Stundenprofil der im Sondenkreislauf übertragenen Wärmeleistungen ausgehend von den Messungen erstellt und in das Simulationsprogramm eingegeben wird. Mit diesem kann das Stundenprofil der Temperaturen des Wärmeträgers, der den Sondenkreislauf durchfließt, simuliert und mit den durchgeführten Messungen verglichen werden. Die Wärmeträgertemperatur, ganz gleich, ob sie simuliert oder gemessen ist, ist das arithmetische Mittel der Eingangs- und Ausgangstemperatur des Sondenfeldes. Das zur Simulation und zum Vergleich zwischen den Messungen und der Simulation verwendete Verfahren ist in Abbildung 3 dargestellt.

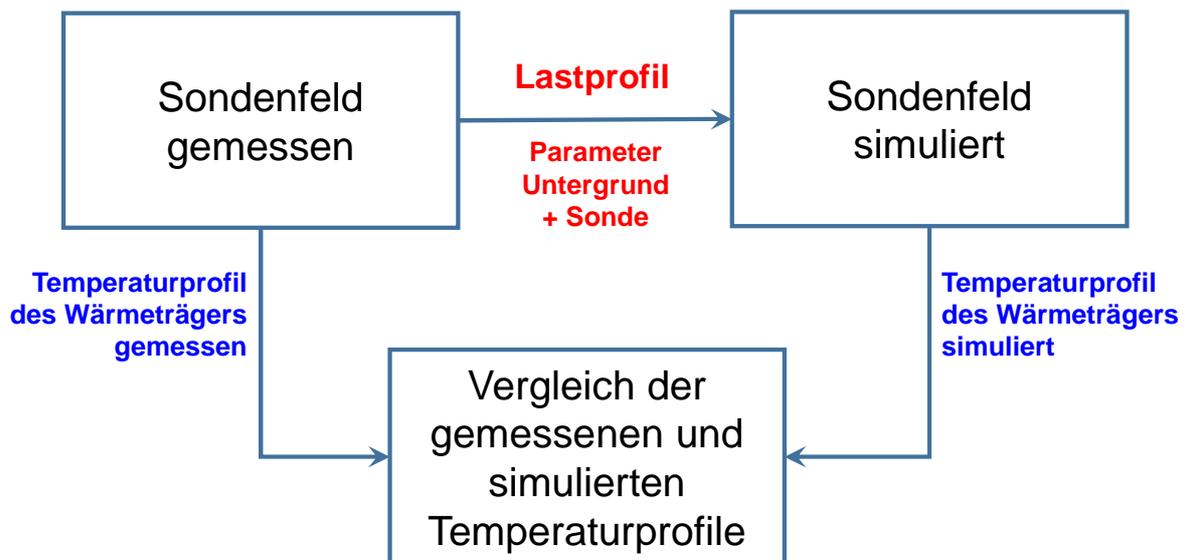


Abbildung 3: Die Simulation des Temperaturprofils des Wärmeträgers stützt sich auf das Profil der durch die Erdwärmesonden übertragenen Wärmeleistungen und die den Untergrund und die Sonden beschreibenden Parameter.

4 Ergebnisse

4.1 Vorliegende Messungen von Erdwärmesondenfeldern

Für die Studie konnten die Messungen von einem Dutzend Erdwärmesondenfelder und einem Energiepfehlfeld ausgewertet werden.

Mit Ausnahme des Energiepfehlfeldes, auf dem sich 300 Energiepfähle mit 30 m Länge befinden, weisen die Erdwärmesondenfelder Merkmale im folgenden Spektrum auf:

- Anzahl Erdwärmesonden: 3 – 62
- Sondenlänge: 80 – 250 m
- Abstand zwischen den Sonden: 5 – 9 m
- Anzahl Betriebsjahre der Sondenfelder: 2 – 11 Jahre

Anzumerken ist ausserdem, dass die angetroffenen geologischen Formationen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2 und 4 W/(mK) haben. Es wurde kein erheblicher Grundwasserabfluss festgestellt.

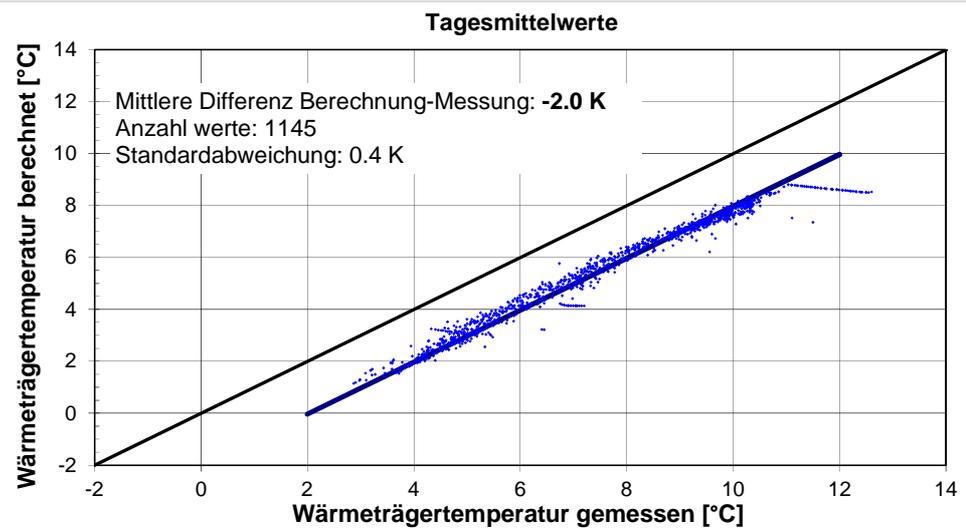
Ausserdem ist festzuhalten, dass ein Teil der Erdwärmeanlagen auf der Grundlage eines Thermal Response Tests (TRT) ausgelegt wurden. Bezüglich ihres Einsatzes ist festzustellen, dass die Erdwärmesonden in einigen Anlagen für den reinen Wärmeentzug und in anderen zur Wärmespeicherung verwendet werden. Schliesslich ist die Strömung des Wärmeträgers in den Erdwärmesonden in einigen Anlagen laminar und in anderen turbulent. Alle Erdwärmesonden sind U-förmige Rohrsysteme (Doppel-U-Sonden). Der thermische Kontakt zwischen den Rohren und dem Untergrund wird durch die Verpressung eines Füllmaterials in das Bohrloch sichergestellt.

4.2 Vergleich Simulation - Messungen

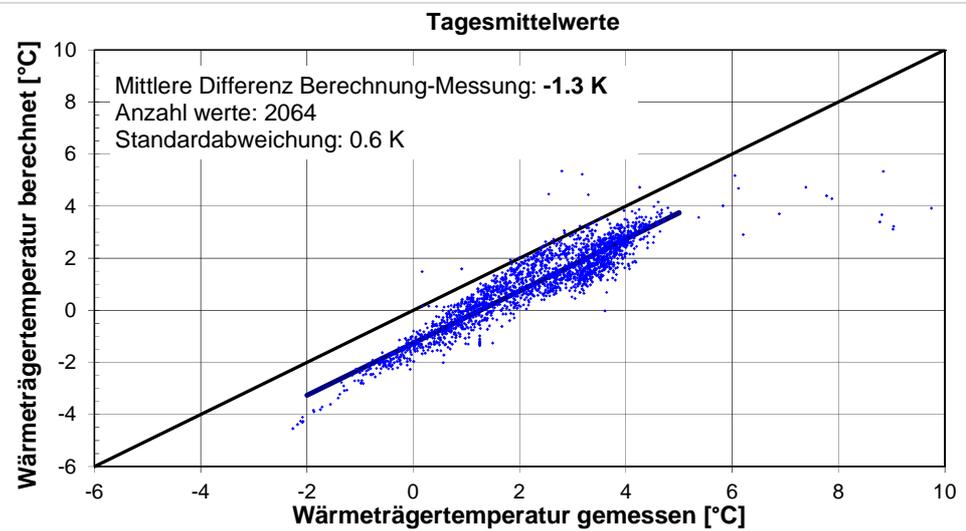
Zuerst werden die Sondenfelder auf der Grundlage der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Parameter simuliert. Bei den Simulationen werden, wie dies bei den meisten Simulationsprogrammen der Fall ist, weder die Wärmekapazität des Wärmeträgers und der Sonden noch die horizontalen Anschlüsse zwischen den Sondenköpfen und den Verteilern berücksichtigt. Alle unter diesen Bedingungen erstellten Simulationsparameter stellen die **Nennparameter** dar.

Zum Vergleich der Simulationen mit den Messungen wird die durchschnittliche Tagestemperatur des Wärmeträgers verwendet. Diese ist das durch die übertragene Wärmeleistung gewichtete Mittel (als Absolutwert) der durchschnittlichen Eingangs- / Ausgangstemperatur des Sondenfeldes. Ein qualitativer Vergleich ist anhand der Grafiken der 11 analysierten Anlagen möglich. (Die detaillierte Analyse jeder Anlage ist im Anhang dieses Berichtes angefügt).

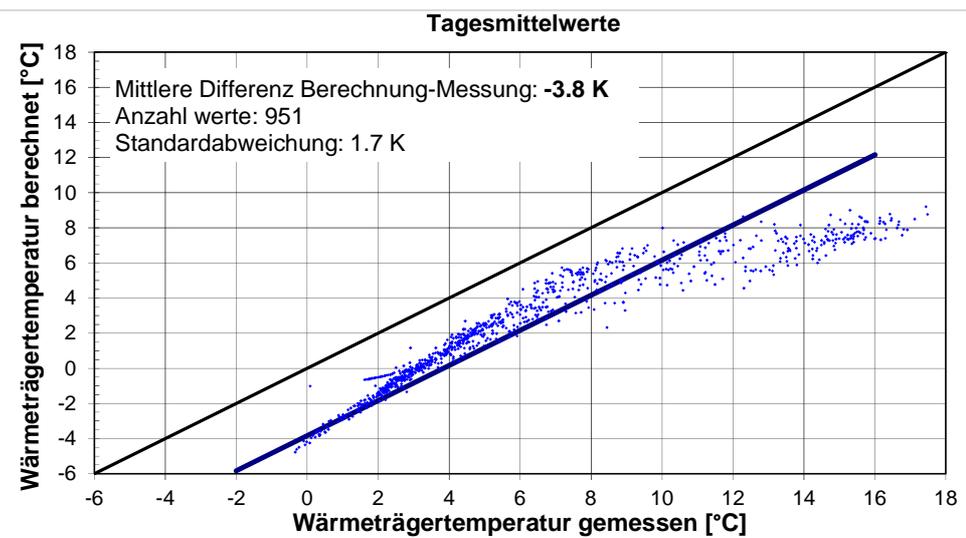
Anlage 1

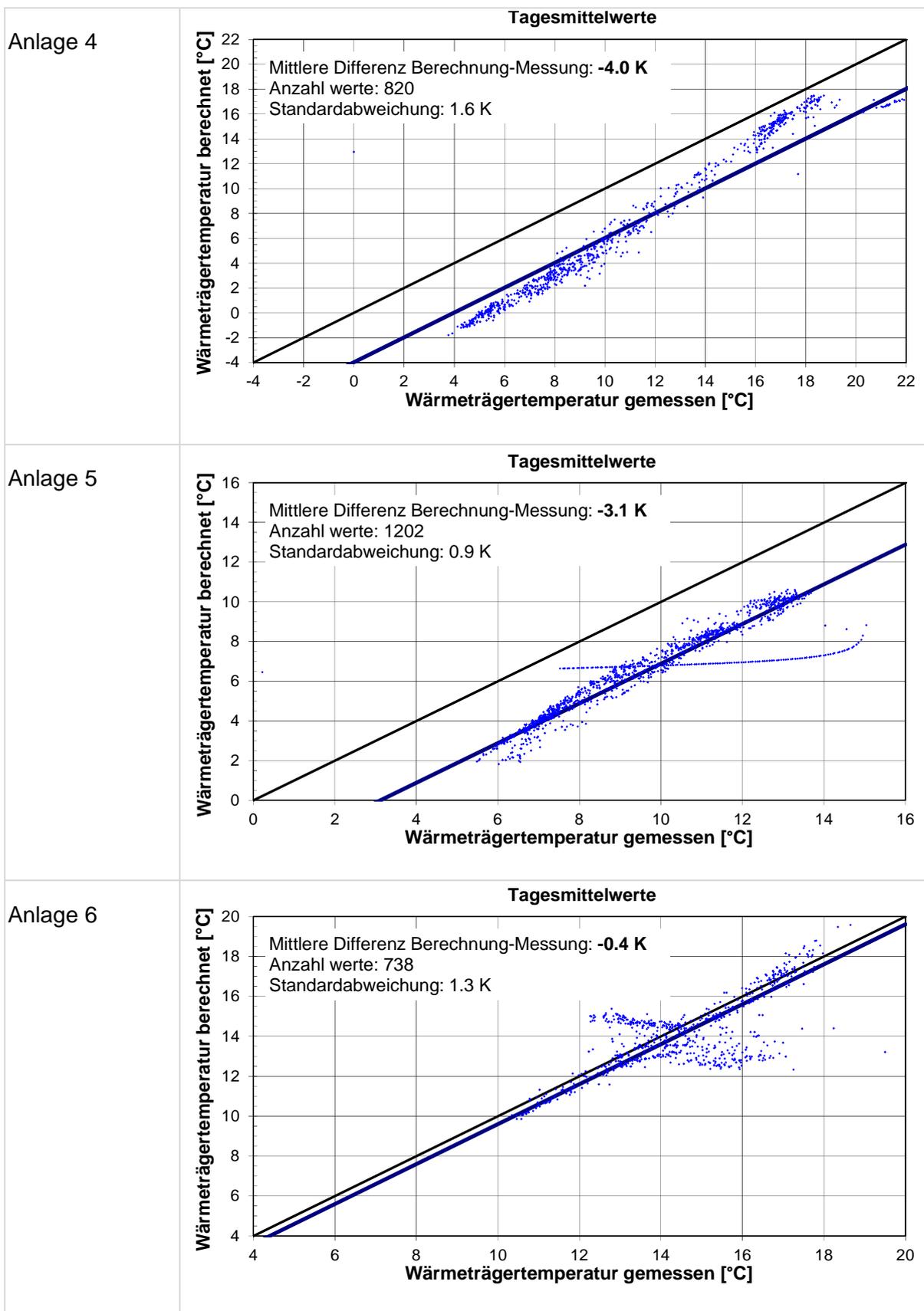


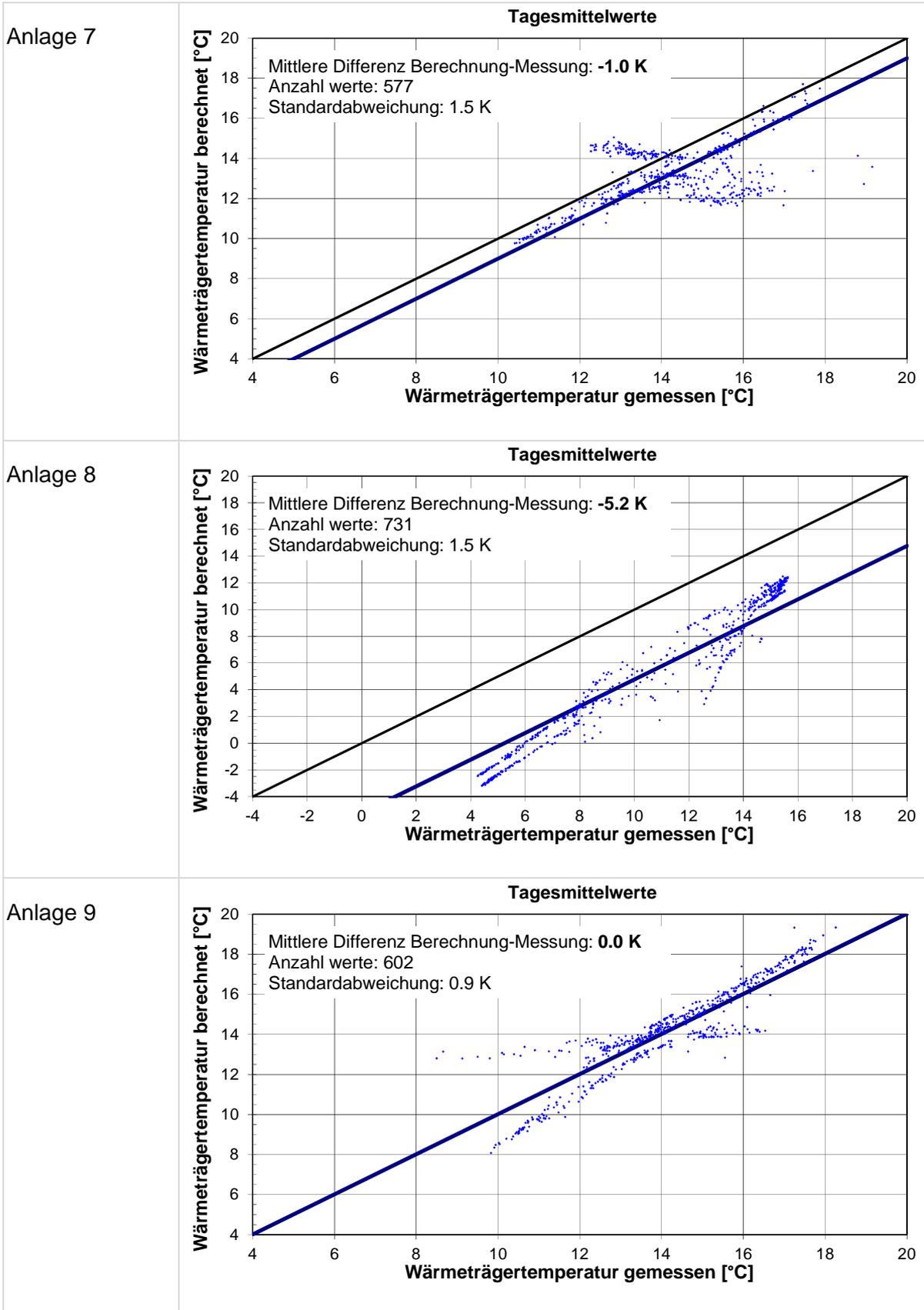
Anlage 2



Anlage 3







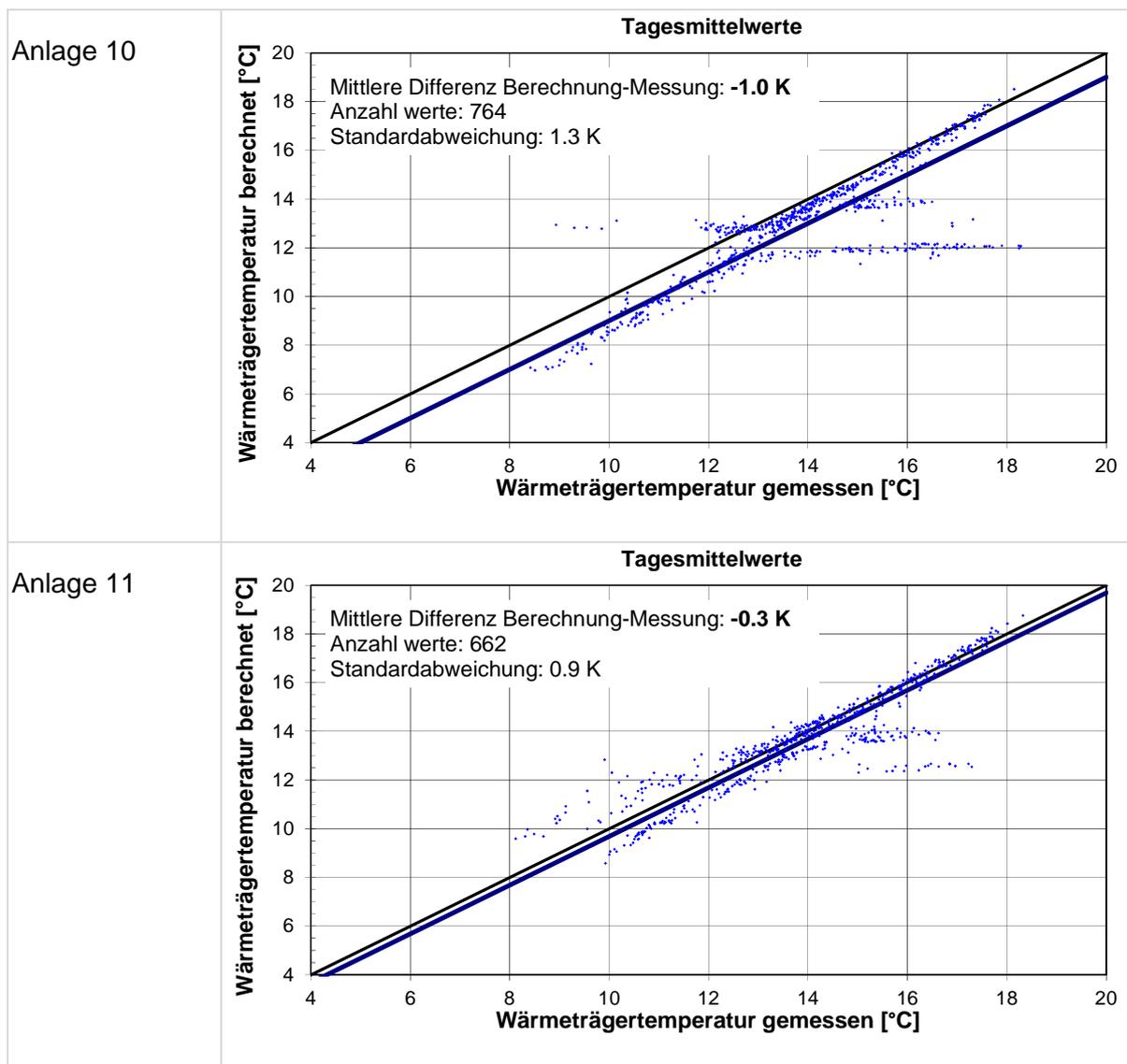


Abbildung 4: Vergleich Simulation – Messungen der Wärmeträgertemperaturen in Tageswerten für die 11 analysierten Anlagen

Bei einigen Anlagen heben sich Punkte ab und reihen sich in einer Richtung aneinander, die nicht der Tendenz aller Punkte entspricht (Anlagen 1 und 5). Sie entsprechen typischerweise einer Messlücke, die durch eine einfache Interpolation geschlossen wurde. Ausserdem sind Wolken aus Punkten auffällig, die sich von der beobachteten Tendenz abheben (zum Beispiel Anlagen 6 und 7). Diese Abweichungen werden für sehr geringe übertragene Tagesenergien beobachtet, und die Differenz zwischen der Messung und Berechnung kann auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden (siehe Anhänge 6 und 7).

Im Allgemeinen ist die Temperaturdifferenz zwischen Simulations- und Messwerten in Wärmeentzugsperioden immer negativ und dies bei allen analysierten Anlagen. Dies bedeutet, dass die Simulationen beim Entzug einer gegebenen Wärmeleistung immer die Abnahme der Wärmeträger-

temperatur in den Erdwärmesonden überschätzen. Mit dem Simulationsmodell kann unter Verwendung der Nennparameter ein Erdwärmesondenfeld, welches nur zur Beheizung verwendet wird (reiner Wärmeentzug aus dem Untergrund), konservativ ausgelegt werden. Für die Erdwärmesondenfelder variiert die Temperaturdifferenz zwischen 0 und -4 K. Nur bei der Anlage 8 ist die Differenz höher (-5.2 K). Dort handelt es sich um Energiepfähle, und diese Abweichung entsteht dadurch, dass einerseits die Wärmekapazität des Wärmeträgers und der Pfähle und andererseits der Wärmeaustausch der horizontalen Anschlussleitungen zwischen den Pfählen und den Verteilern nicht berücksichtigt wurden (Nennfall). Diese Größen und Prozesse haben in Realität aber einen Einfluss (siehe nächster Abschnitt).

Die meisten Anlagen werden auch mit Wärmeeintrag betrieben (Anlagen 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 und 11). Durch eine detailliertere Analyse (siehe Anhänge) kann darauf geschlossen werden, dass auch die Simulationen bezüglich der Messungen für eine Sondenauslegung zur Kühlung (Wärmeeintrag in den Untergrund) konservativ sind. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass die Simulationen beim Eintrag einer gegebenen Wärmeleistung immer die Zunahme der Wärmeträgertemperatur in den Erdwärmesonden überschätzen.

4.3 Sensitivitätsanalyse

Die durchschnittliche Differenz zwischen den simulierten und gemessenen Tagestemperaturen wird als Indikator verwendet, um die Berücksichtigung folgender Auswirkungen zu quantifizieren:

- Wärmekapazität des Wärmeträgers und der Sonden sowie Wärmeübertragungen der horizontalen Anschlüsse zwischen den Sondenköpfen und Verteilern (Nennfall+C+H),
- bei der Anfangstemperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes getroffene Sicherheitsmargen werden entfernt und die Wirkungen mit den vorhergehenden vereinigt (Nennfall+C+H+T+L).

In Tabelle 1 ist die Temperaturdifferenz für alle Anlagen angegeben. Da die Sondenfelder der Anlagen 6 bis 11 inklusive des Energiepfahlfeldes als Wärmespeicher betrieben werden, wird die Temperaturdifferenz nur beim Wärmeentzug bewertet. Für jede Anlage wurde die Strömungsart des Wärmeträgers angegeben und vermerkt, ob ein Thermal Response Test (TRT) existiert. Mit diesem können die Schlüsselparameter des Untergrundes mit einer geringen (TRT) bzw. vernachlässigbaren (e-TRT: erweiterter TRT) Sicherheitsmarge ermittelt werden.

| Durchschnittliche Differenz Simulation – Messung (Wärmeentzug) | Nennfall | Nennfall+C+H | Nennfall+C+H+T+L |
|---|---------------|--|--|
| Anlage 1 Turbulent, kein TRT | -2.0 K | -1.5 K Auswirkung von +0.5 K | -0.3 K Auswirkung von +1.2 K |
| Anlage 2 Laminar, kein TRT | -1.3 K | +0.1 K Auswirkung von +1.4 K | +1.4 K Auswirkung von +1.3 K |
| Anlage 3 Laminar, kein TRT | -3.8 K | -3.3 K Auswirkung von +0.5 K | -1.9 K Auswirkung von +1.4 K |
| Anlage 4 Laminar, kein TRT | -4.0 K | -2.5 K Auswirkung von +1.5 K | -1.5 K Auswirkung von +1.0 K |
| Anlage 5 Turbulent, kein TRT | -3.1 K | -2.7 K Auswirkung von +0.4 K | -1.5 K Auswirkung von +1.2 K |
| Anlage 6 Turbulent, e-TRT | -0.4 K | -0.2 K Auswirkung von +0.2 K | -0.2 K ¹⁾ |
| Anlage 7 Turbulent, e-TRT | -0.6 K | -0.5 K Auswirkung von +0.1 K | -0.5 K ¹⁾ |
| Anlage 8 (Energiepfahl) Laminar, TRT | -6.0 K | -0.8 K Auswirkung von +5.2 K | -0.4 K Auswirkung von +0.4 K |
| Anlage 9 Turbulent, e-TRT | -1.2 K | -1.2 K Auswirkung von +0.0 K | -1.2 K ¹⁾ |
| Anlage 10 Turbulent, e-TRT | -1.2 K | -1.2 K Auswirkung von +0.0 K | -1.2 K ¹⁾ |
| Anlage 11 Turbulent, e-TRT | -1.1 K | -0.8 K Auswirkung von +0.3 K | -0.8 K ¹⁾ |

¹⁾ Die Sicherheitsmargen für die Anfangstemperatur und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wurden vernachlässigt, weil ein e-TRT durchgeführt wurde.

Tabelle 1: Differenz der durchschnittlichen Tagestemperatur zwischen den Simulationen und den Messungen bei Wärmeentzug

Die Sicherheitsmargen bei den Untergrundparametern sind im Falle einer Anlage nützlich (Anlage 2). Es ist schwierig, daraus eine Statistik herzuleiten, aber die folgenden beiden Bemerkungen können formuliert werden:

- Mit den Simulationen kann die Abnahme der Wärmeträgertemperatur in den Sonden mit einer Sicherheitsmarge vorhergesagt und damit ein Erdwärmesondenfeld zum Wärmeentzug konservativ ausgelegt werden.
- Wenn ein TRT oder ein e-TRT durchgeführt wird, wird das Erdwärmesondenfeld erheblich genauer ausgelegt. Die Überschätzung der Temperaturabnahme, die zwischen 0.4 und 1.2 K liegt, ist konservativ und nahe der Messgenauigkeit.

Man kann ausserdem bemerken, welchen Stellenwert die kapazitiven Effekte der Pfähle und der Wärmeaustausch der horizontalen Anschlussleitungen an der Oberfläche bei Energiepfählen einnehmen (Anlage 8).

In Tabelle 2 ist die Temperaturdifferenz für alle Anlagen bei Wärmeeintrag angegeben. Nur die Anlagen 6 bis 11 sind betroffen.

| Durchschnittliche Differenz Simulation – Messung (Wärmeeintrag) | Nennfall | Nennfall+C+H | Nennfall+C+H+T+L |
|--|----------|------------------------------|-----------------------------|
| Anlage 6 Turbulent, e-TRT | +0.2 K | +0.1 K Wirkung von -0.1 K | +0.1 K ¹⁾ |
| Anlage 7 Turbulent, e-TRT | -0.6 K | -0.6 K Wirkung von 0.0 K | -0.6 K ¹⁾ |
| Anlage 8 (Energiepfahl) Laminar, TRT | -4.4 K | +0.6 K Wirkung von +5.0 K | +0.6 K Wirkung von 0.0 K |
| Anlage 9 Turbulent, e-TRT | +0.5 K | +0.6 K Wirkung von +0.1 K | +0.6 K ¹⁾ |
| Anlage 10 Turbulent, e-TRT | -0.3 K | -0.1 K Wirkung von +0.2 K | -0.1 K ¹⁾ |
| Anlage 11 Turbulent, e-TRT | +0.1 K | +0.2 K Wirkung von +0.1 K | +0.2 K ¹⁾ |

¹⁾ Die Sicherheitsmargen für die Anfangstemperatur und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wurden für ein e-TRT vernachlässigt.

Tabelle 2: Differenz der durchschnittlichen Tagestemperatur zwischen den Simulationen und Messungen bei Wärmeeintrag

Eine negative Temperaturdifferenz bedeutet dieses Mal, dass der simulierte Temperaturanstieg des Wärmeträgers geringer als der gemessene ist. In diesem Fall sind die Simulationen nicht konservativ und die entsprechenden Felder der Tabelle 2 sind grau hinterlegt. Aber man kann bemerken, dass die durchschnittliche Differenz Simulation – Messung bei den 5 simulierten Sondenfeldern als Absolutwert unter 1 K liegt. Sie liegt damit im Bereich eines Messfehlers und kann als zumutbar angesehen werden.

4.4 Langzeitanalyse

Die vor allem für reinen Wärmeentzug geplanten Anlagen 1 bis 5 wurden für eine Laufzeit von fünfzig Jahren simuliert. Die Langzeitentwicklung der Wärmeträgertemperatur im Sondenkreislauf wird für die beiden folgenden Fälle berechnet:

- Nennwerte der Parameter für die Anlage und den Wärmebedarf: Diese Situation gehört zur Planungsphase und stützt sich auf Auslegungshypothesen. Die Simulationsparameter für den Untergrund und die Sonden entsprechen dem Nennfall. Der Nennwärmebedarf wird auf die Sonden auf der Grundlage der Nennmerkmale der Wärmepumpe übertragen, die durch ihren Betriebspunkt B0W35 festgelegt wurden. Diese Hypothese ist konservativ, weil die Wärmepumpe tatsächlich mit weniger günstigen Temperaturbedingungen funktioniert. Sie führt zu einer Überdimensionierung der Sonden, was nicht nur zu einer zusätzlichen Sicherheitsmarge, sondern auch zu einer Reserve für künftige Wärmepumpengenerationen führt.
- Kalibrierte Werte der Parameter für die Anlage und den Wärmebedarf: Diese Situation entspricht praktisch den tatsächlichen Leistungen der Anlage, insofern als sie in den künftigen Jahren in derselben Art und Weise betrieben wird. Die für die Simulation des Untergrundes und der Erdwärmesonden verwendeten Parameter sind kalibriert, um die Messungen zu reproduzieren. Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wird gegebenenfalls erhöht. Der kalibrierte Wärmebedarf wird auf der Grundlage der Messungen der jährlich aus den Sonden entzogenen Energie, der Spitzenentzugsleistung und ihrer Höchstdauer bestimmt.

Ein Standardprofil für den Wärmeentzug ist zu erstellen und bei den Simulationen in den beiden oben beschriebenen Fällen einzugeben. Es ist so einfach wie möglich mit konstanten monatlichen Entzügen definiert. Diese werden am Ende jedes Monats durch einen Spitzenentzug überlagert (siehe Anhänge für nähere Einzelheiten). Es ist so aufgebaut, dass die Spitzenentzugsleistungen und die jährlich dem Untergrund entzogene Energie reproduziert werden.

Durch die zwischen den beiden Fällen festgestellten Differenzen kann der Einfluss der Auslegungshypothesen auf die Langzeitentwicklung der Wärmeträgertemperatur eingeschätzt werden.

In Tabelle 3 sind die erreichten Mindesttemperaturen des Wärmeträgers nach 50 Jahren aufgeführt.

| Mindesttemperatur des Wärmeträgers nach 50 Jahren | Projektion aufgrund von Nennwerten | Projektion aufgrund von kalibrierten Werten | Differenz |
|--|---|--|------------------|
| Anlage 1 Turbulent, kein TRT | -5.6°C | -1.8°C | 3.8 K |
| Anlage 2 Laminar, kein TRT | -13.2°C | -8.5°C | 4.7 K |
| Anlage 3 Laminar, kein TRT | -8.2°C | -0.7°C | 7.5 K |
| Anlage 4 Laminar, kein TRT | -5.5°C | -0.5°C | 5.0 K |
| Anlage 5 Turbulent, kein TRT | -6.2°C | -0.4°C | 5.8 K |

Tabelle 3: Simulation der Mindesttemperatur des Wärmeträgers nach 50-jährigem Systembetrieb auf der Grundlage der Nennwerte und der kalibrierten Werte der Anlagen

Bemerkenswert ist die hohe Differenz zwischen dem Nennfall und dem kalibrierten Fall bezüglich der Vorhersage der Mindesttemperatur des Wärmeträgers nach 50 Jahren. Die Parameter zum Untergrund und den Sonden sind nur teilweise für diese Differenz verantwortlich. Der andere Teil wird durch den tatsächlichen Einsatz der Sonden und damit den Wärmebedarf bezüglich der Spitzenleistung und jährlichen Energie sowie die Wärmeleistungen der Wärmepumpe verursacht, die in Abhängigkeit von ihrer Leistungszahl (COP) als Leistungen und entzogene Energien an die Sonden weitergegeben wird.

Es ist anzumerken, dass die Simulationen mit Wärmelastprofilen an Erdwärmesonden durchgeführt wurden, die mit einem konstanten COP erstellt wurden. Deshalb sind die niedrigsten negativen Temperaturen nicht realistisch, aber sie deuten auf eine Unterdimensionierung des Sondenfeldes in Bezug auf den gewünschten Betrieb hin.

Die beiden simulierten Fälle stellen zwei Extremfälle dar, die zu langfristigen Wärmeträgertemperaturen führen, die zwischen 4 und 8 K variieren können. Dadurch wird deutlich, wie sich der Einsatz eines Erdwärmesondenfeldes, das ohne eine massgebliche jährliche Wiederaufladung genutzt wird, auf die langfristige Abnahme der Wärmeträgertemperatur auswirkt.

Es wurden jedoch Vorhersagen mit einem extrem vereinfachten Wärmelastprofil gemacht, und es geht darum zu erfahren, ob diese Vereinfachung ihrerseits zu einem Fehler bei der Abnahme der Mindesttemperatur des Wärmeträgers führt. Dieser Frage wird im nächsten Abschnitt nachgegangen.

4.5 Analyse des Wärmeentzugs- und -eintragsprofils

Der zu deckende Wärmebedarf und seine Vorgeschichte haben einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmeträgertemperatur in den Erdwärmesonden. In diesem Abschnitt wird der in Stundenwerten gemessene Wärmebedarf als Referenzwert herangezogen und zur Erzeugung eines vereinfachten Profils verwendet, das durch monatliche Wärmeentzüge oder -einträge und eine Spitzenleistung am Ende jedes Monats gekennzeichnet ist.

Das zur Erzeugung des vereinfachten Wärmeprofiles verwendete Verfahren ist in Abbildung 5 dargestellt.

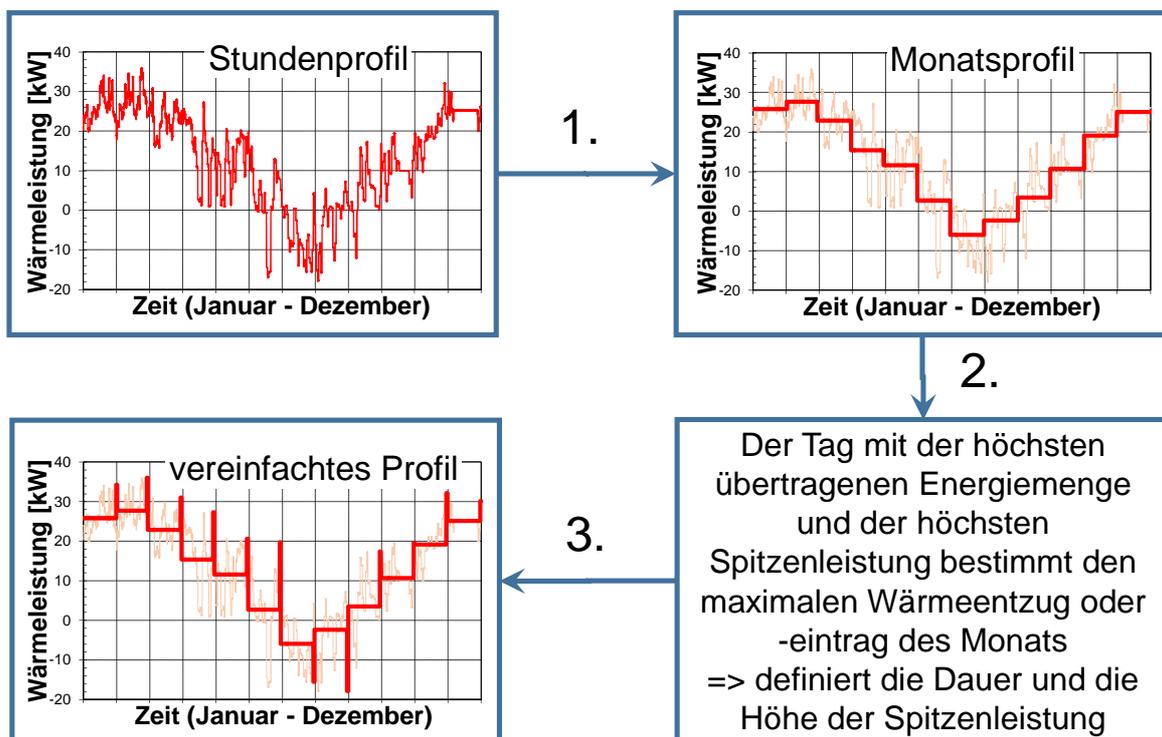


Abbildung 5: Für die Erstellung eines vereinfachten Wärmeentzugs- und -eintragsprofil verwendetes Verfahren.

Folgende Schritte sind in Abbildung 5 aufgezeigt:

1. Durch die monatlichen Wärmeentzüge kann anhand eines konstanten Leistungsentzugs die monatliche Nettoenergie neu berechnet werden, die in den Untergrund übertragen wurde.
2. Dabei wird der Tag des Monats mit der höchsten übertragenen Tagesenergie gesucht. Wenn die Monatsbilanz ein Netto-Wärmeentzug ist, handelt es sich um den Tag mit der höchsten entzogenen Energie. Anderenfalls ist es der Tag mit der höchsten eingetragenen Energie.
3. Dem Tag, an dem die übertragene Energie am höchsten ist, entspricht eine Höchstleistung. Diese definiert die Leistung des Spitzenentzugs. Mit der Dauer des Spitzenentzugs muss es ihrerseits möglich sein, auf der Grundlage des Spitzenentzugs und der Leistung des

monatlichen Entzugs die maximale Tagesenergie neu zu berechnen. Für jeden Monat wird auf diese Weise ein Spitzenentzug berechnet. Am Ende des Monats wird der monatliche Entzug durch diesen überlagert.

Bei jeder Anlage wird die Simulation der kalibrierten Variante mit dem Stundenprofil und mit dem vereinfachten Profil simuliert. Durch den Vergleich der jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen kann eingeschätzt werden, wie die Wärmeträgertemperaturen mit dem vereinfachten Wärmeprofil reproduziert werden. In Tabelle 4 sind die erhaltenen Abweichungen für jede Anlage in Intervallen gegeben, da der Vergleich der Extremwerte für jedes Jahr angestellt wird, für das ein Profil in Stundenwerten vorliegt.

| Einfluss eines vereinfachten Wärmeprofiles | Abweichung zur jährlichen Mindesttemperatur | Abweichung zur jährlichen Höchsttemperatur |
|---|--|---|
| Anlage 1 | von -0.2 bis -0.1 K | - |
| Anlage 2 | von -0.8 bis -0.1 K | - |
| Anlage 3 | von 0.0 bis +0.1 K | von -0.2 bis 0.0 K |
| Anlage 4 | von -0.8 bis -0.7 K | +0.3 K |
| Anlage 5 | von -0.3 bis +0.1 K | - |
| Anlage 6 | von -0.5 bis +0.6 K | von +0.3 bis +0.6 K |
| Anlage 7 | von -0.4 bis +0.1 K | +0.6 K |
| Anlage 8 | von -0.1 bis +0.0 K | von +0.0 bis +0.5 K |
| Anlage 9 | von -0.4 bis +0.6 K | von +0.0 bis +0.4 K |
| Anlage 10 | von -1.3 bis -0.2 K | von +0.8 bis +1.0 K |
| Anlage 11 | von -0.2 bis +0.7 K | +0.8 K |

Tabelle 4: Einfluss eines vereinfachten Wärmeprofiles auf die jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen des Wärmeträgers

Wenn ein einziger Wert angegeben ist, bedeutet dies, dass bei der Einschätzung der Temperaturdifferenz nur ein Jahr berücksichtigt werden konnte. Eine negative Differenz bei der Mindesttempe-

ratur bedeutet, dass das vereinfachte Wärmeprofil zu einer niedrigeren Mindesttemperatur des Wärmeträgers als die führt, die mit einem Wärmeprofil in Stundenwerten erhalten wird. Ebenso bedeutet eine positive Differenz, dass die Höchsttemperatur mit dem vereinfachten Wärmeprofil höher liegt.

Der bei einem vereinfachten Wärmeprofil bei den Extremtemperaturen eingeführte Fehler liegt im Bereich des Zumutbaren. Er tendiert dazu, konservativ zu sein und liegt fast immer unter 1 K.

Es bestätigt sich damit, dass die massgeblichen Temperaturdifferenzen, die im vorhergehenden Abschnitt (4.4 Langzeitanalyse) beobachtet wurden, durch die Art des Einsatzes der Sonden verursacht wurden.

5 Fazit

Durch das Vorliegen von Messungen von 11 Erdwärmesondenfeldern konnte beobachtet werden, wie die Messungen durch die Simulation ihres Wärmeverhaltens reproduziert werden können. Ein Modell zur Simulation von Sondenfeldern, das insbesondere für die Berechnung der g-Funktionen verwendet wird, wurde für die Studie ausgewählt, wobei auf die Planungswerte abgestellt und auf die Einhaltung der SIA-Norm 384/6 „Erdwärmesonden“ geachtet wurde.

Durch die Wärmesimulationen wird ermöglicht, die Messungen gut zu reproduzieren. Die Abnahme der Wärmeträgertemperatur in den Sonden wird mit einer Sicherheitsmarge vorhergesagt, wodurch ein für den reinen Wärmeentzug vorgesehenes Erdwärmesondenfeld konservativ ausgelegt werden kann. Wenn ein TRT oder ein e-TRT (erweiterter Thermal Response Test) durchgeführt wird, ist die Sicherheitsmarge geringer und die Überschätzung der Temperaturabnahme, die zwischen 0.4 und 1.2 K liegt, ist nahe der Messgenauigkeit. Beim Wärmeeintrag ist die Temperaturdifferenz Messung – Simulation zumutbar und bleibt als Absolutwert unter 1 K.

Eine für ein Zeitfenster von 50 Jahren durchgeführte Langzeitanalyse zeigte, dass der Einsatzgrad eines für den reinen Wärmeentzug vorgesehenen Sondenfeldes eine entscheidende Bedeutung für die langfristige Temperaturabnahme des Wärmeträgers hat. Die Art und Weise, wie die Erdwärmesondenfelder genutzt werden, insbesondere die Spitzenleistung und die entzogene jährliche Energie, haben einen grossen Einfluss auf die Wärmeleistungen des Feldes. Deshalb ist es für die Vorhersage langfristiger Wärmeleistungen eines Erdwärmesondenfeldes von entscheidender Bedeutung, über einen möglichst realistischen Wärmebedarf zu verfügen.

Bezogen auf ein genaues Wärmeprofil in Stundenwerten ermöglicht ein vereinfachtes Wärmeprofil, das mit durchschnittlichen monatlichen Entzügen und einer Spitzenleistung am Ende jedes Monats erstellt wurde, die jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen des Wärmeträgers mit einer im Allgemeinen konservativen Differenz unter 1 K neu zu berechnen.

Die Auslegung eines Erdwärmesondenfeldes - sei es für eine Nutzung mit Wärmeentzug für Beheizung oder mit Wärmeeintrag für Kühlung - basiert auf der Vorhersage der Extremtemperatur des Wärmeträgers in den Sonden. Der Vergleich der simulierten und gemessenen Werte hat gezeigt, dass die Simulationen immer pessimistischer als die Realität sind. Dies ist eigentlich ein gutes Zei-

chen für die Zukunft von bestehenden Anlagen. Andererseits unterscheiden sich die Extremtemperaturen des Wärmeträgers massiv von der durchschnittlichen Temperatur des Untergrundes in der von den Sonden beeinflussten Zone. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass Erdwärmesonden vor allem Wärmetauscher mit dem Untergrund sind. Deshalb bedeutet eine extreme Wärmeträgertemperatur nicht, dass der Untergrund keine Energie liefern kann und die Anlage abgeschaltet werden muss, selbst dann nicht, wenn die zulässigen Mindesttemperaturen unterschritten sind. Ein vereinfachtes Wärmeprofil, mit dem die Extremtemperaturen mit einer hohen Genauigkeit gemessen werden können, weist darauf hin, dass diese in erster Linie von den Spitzenleistungen und der jährlichen Nettoenergie abhängen, die das Sondenfeld befriedigen soll.

Es gibt also zwei Wege, eine zu niedrige Wärmeträgertemperatur zu begrenzen: eine thermische Wiederaufladung des Sondenfeldes, die sich auf die Abnahme der jährlich durch die Sonden übertragenen Nettoenergie auswirkt, und eine Reduzierung der pro Sondenmeter entzogenen Spitzenleistung. Letzteres kann durch eine Wärmepumpe mit einer kleineren Heizleistung oder eine Erhöhung der Sondenmeter erreicht werden kann.

6 Verdankungen

Das LESBAT dankt ganz herzlich allen Personen und Ingenieurbüros, die im Rahmen dieses Projektes kontaktiert wurden und die zum guten Verlauf der Studie beigetragen haben.

7 Referenzen

- [1] Wagner R. und Weisskopf T (2014): Erdsondenpotential in der Stadt Zürich. Schlussbericht. Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Stadt Zürich.
- [2] Eskilson P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [3] Klein S. A. et al. (2007): TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- [4] Pahud D. (2012): The Superposition Borehole Model for TRNSYS 16 or 17 (TRNSBM). User Manual for the April 2012 Version. Internal Report. ISAAC - DACD- SUPSI, Switzerland.
- [5] SIA-Norm 384/6 (2010): Erdwärmesonden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

8 Liste der Abbildungen und Tabellen

| | |
|--|----|
| Abbildung 6: Gesamtlänge der pro Jahr in der Schweiz verlegten neuen Erdwärmesonden (Quelle: FWS)..... | 4 |
| Abbildung 7: Das SBM-Programm ermöglicht die Simulation einer willkürlichen Zahl willkürlich angeordneter Erdwärmesonden | 6 |
| Abbildung 8: Die Simulation des Temperaturprofils des Wärmeträgers stützt sich auf das Profil der durch die Erdwärmesonden übertragenen Wärmeleistungen und die den Untergrund und die Sonden beschreibenden Parameter. | 7 |
| Abbildung 9: Vergleich Simulation – Messungen der Wärmeträgertemperaturen in Tageswerten für die 11 analysierten Anlagen | 12 |
| Tabelle 5: Differenz der durchschnittlichen Tagestemperatur zwischen den Simulationen und den Messungen bei Wärmeentzug..... | 14 |
| Tabelle 6: Differenz der durchschnittlichen Tagestemperatur zwischen den Simulationen und Messungen bei Wärmeeintrag | 15 |
| Tabelle 7: Simulation der Mindesttemperatur des Wärmeträgers nach 50-jährigem Systembetrieb auf der Grundlage der Nennwerte und der kalibrierten Werte der Anlagen..... | 17 |
| Abbildung 10: Für die Erstellung eines vereinfachten Wärmeentzugs- und -eintragsprofil verwendetes Verfahren | 18 |
| Tabelle 8: Einfluss eines vereinfachten Wärmeprofils auf die jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen des Wärmeträgers | 19 |

9 Liste der Anhänge

| | |
|------------|-----------|
| Anhang 1: | Anlage 1 |
| Anhang 2: | Anlage 2 |
| Anhang 3: | Anlage 3 |
| Anhang 4: | Anlage 4 |
| Anhang 5: | Anlage 5 |
| Anhang 6: | Anlage 6 |
| Anhang 7: | Anlage 7 |
| Anhang 8: | Anlage 8 |
| Anhang 9: | Anlage 9 |
| Anhang 10: | Anlage 10 |
| Anhang 11: | Anlage 11 |