

Evaluierung von Planungsinstrumenten zur Auslegung geothermischer Großanlagen

Holger Kaiser, Stephan Oehlert

Gerber Ingenieurgesellschaft Geothermie mbH

Keywords: Geothermische Großanlagen, numerische Simulation, ganzheitliche Planungsinstrumente

Zusammenfassung

Für geothermische Anlagen größer 30 kW gibt der Stand der Technik zur Auslegung analytische oder numerische Berechnungsmethoden vor. Analytische Berechnungen können bei vereinfachten Annahmen für Anlagen mit geringer Komplexität gute Ergebnisse zur Auslegung liefern. Bei komplexen Anlagen, bei unsymmetrischen Anordnungen der Erdwärmesonden oder Energiepfählen oder Grundwasser beeinflussten geothermischen Anlagen sind numerische Lösungen zwingend erforderlich, um eine korrekte Auslegungsergebnisse zu erhalten .

Werden innovative Großimmobilien mit geothermischen Systemen ausgestattet, ist bei der Simulation ein ganzheitlicher Ansatz notwendig, der nicht nur den Untergrund betrachtet, sondern die Interaktion des Untergrunds mit dem Gebäude sowie der Anlagentechnik berücksichtigt. Die relevanten Einflussgrößen sind in solchen Fällen durch die Auslegungssoftware zu berücksichtigen, um unnötig hohe Kosten bei Bauherren und Betreibern durch Überdimensionierung und Zusatzkosten bei Unterdimensionierung zu vermeiden.

Hier wird beispielhaft dargestellt wie bei einer ganzheitlichen Planung in den einzelnen Projektphasen bei geothermischen Großanlagen vorzugehen ist. Hierbei wird herausgestellt, welchen Einfluss unterschiedliche Berechnungsmethoden auf die Auslegung von einer großen Erdwärmesondenanlage (Beispiel) haben. Die Auslegung einer Erdwärmesondenanlage eines innovativen Gebäudes mit Kühldecken, Betonkerntemperierung einer reversiblen Wärmepumpe mit Naturkühlung sowie integrierter Wärmerückgewinnung wird mittels unterschiedlicher Softwarelösungen durchgeführt.

Zur Berechnung der Beispiele werden folgende Programme verwendet.

- EED (analytisches Programm)
- TRNSPILE/PILESIM (numerisches Programm mit konduktiver Berechnung des Untergrunds)
- FEFLOW (numerisches Programm mit konduktiver und konvektiver Berechnung des Untergrunds)

Die Ergebnisse der Berechnungen werden miteinander und mit den gemessenen Werten verglichen. Entscheidungshinweise für das Vorgehen bei der Planung und Optimierung von geothermischen Großanlagen werden gegeben.

1. Einleitung

Die VDI 4640 gibt für die Planung von geothermischen Anlagen mit einer Heizleistung kleiner 30 KW einige Vorgaben zur Auslegung von Erdwärmesonden. Auch die Leitfäden der Bundesländer greifen fast ausschließlich auf den genannten Bereich zurück. Bei größeren Anlagen, bei Anlagen mit zusätzlicher Kühlung, erhöhtem Grundwassereinfluss oder unsymmetrischen Anordnungen der

geothermischen Anlagenteile sind überschlägige Abschätzungen mittels genannter „spezifischer Entzugsleistungen“ allenfalls zur Vorplanung zu verwenden.

Zur Auslegung von Erdwärmesonden (EWS), Energiepfählen (EP) oder horizontalen Erdkollektoren (HEK) müssen Klimadaten, Gebäudedaten in Energien und Lasten für den Heizfall und den Kühlfall, Temperaturniveaus in den Gebäudeheiz- und -kühlsystemen, Parameter der Wärmepumpentechnik, Kenngrößen der Bohrung und der Erdwärmeabsorber, sowie die hydrogeologischen Verhältnisse genau bekannt sein. Einfache geothermische Anlagen können mit analytischen Lösungen berechnet werden. Daneben wird in der VDI 4640 Blatt 2 darauf hingewiesen, dass größere geothermische Anlagen mit hoher Komplexität, also bei unsymmetrischen Anordnungen der Erdwärmeabsorber, bei gegenseitiger Beeinflussung oder bei Einfluss von Grundwasser, und somit Konvektion, auf den auszulegenden Erdwärmeabsorber, die Berechnung mit numerischen Methoden durchgeführt werden müssen.

Die Genauigkeit der Auslegung erhöht sich im Ablauf der Projektplanung. In wie weit können aber numerische Programme als Planungsinstrumente bis zur Ausführungsplanung wirklich die Genauigkeit der Auslegung erhöhen? Bei welchen Randparameter ist der Einsatz von analytischen Softwareprogrammen nur zur Vorabschätzung einzusetzen? Welche Softwarelösungen sind zur Berechnung von innovativen Gebäuden, die auf Energieeffizienz ausgelegt sind, geeignet?

2. Planungsphasen

In den verschiedenen Planungsphasen gibt es mit der Detailtiefe der Planung unterschiedliche Anforderungen an die Auslegung von geothermischen Anlagen mit Simulationssoftware.

2.1 Grundlagenermittlung bis Entwurfsplanung

In den Anfängen eines Bauvorhabens müssen sich geothermische Anlagen in den meisten Fällen finanziell mit konventionellen Systemen wie Gasbrennwerttechnik, Kältemaschinen oder Fernwärme messen. Bei geeigneter Systemtechnik im Gebäude und guten Eigenschaften im Untergrund fällt heutzutage ein wirtschaftlicher Vergleich bei mittleren und großen Gebäuden in vielen Fällen zu Gunsten der geothermischen Lösung aus. Sicherlich spielen auch gesetzliche Vorgaben wie das EEG eine Rolle, dass geothermische Anlagentechnik nach Angaben des Bundesverband Wärmepumpe seit einigen Jahren vermehrt eingesetzt wird.

Zur Dimensionierung der Geothermieanlagen stehen zu diesem Stand der Planung noch keine detaillierten Ergebnisse aus geothermischen Untersuchungen, wie zum Beispiel Thermal Response Tests (TRT), Berechnungen der Arbeitszahlen der Wärmepumpe gemäß VDI 4650 oder eine detaillierte Gebäudesimulation gemäß DIN 18599 vor bereit.

Thermische Eigenschaften der Geologie können überschlägig aus Tabellen wie in der VDI 4640 gewonnen werden. Die Leitfähigkeitswerte der Sedimente und Gesteine weisen jedoch eine sehr hohe Varianz auf, sodass sich standortabhängig aus dem empfohlenen Mittelwerten eine sehr hohe Fehlerquelle ergibt. Für eine Vorausschätzung der Heizleistung und der Kühlleistung kann auf Grundlage der DIN EN 12831 oder der der VDI 2078 durchgeführt werden. Ermittlung von Volllaststunden oder monatliche Aufteilung der Energien ist ohne Berechnung nicht möglich. Hier kann überschlägig ein Verfahren mit Gradtagszahlen (VDI 2067) angewendet werden.

Mit diesen Werten können analytische Programme schon erste überschlägige Ergebnisse liefern. Gegenüber numerischen Programmen sind die analytischen Algorithmen sehr viel schneller in der Modellerstellung und in der Berechnung der Modelle. Es können einfach Variantenberechnungen durchgeführt werden, um Worst-Case-Szenarien zu entwickeln.

2.1 Genehmigungsplanung und Ausführungsplanung

In der Genehmigungsplanung ist es in den vergangenen Jahren dazu gekommen, dass einzelne Untere Wasserbehörden und Bergbehörden, numerische Berechnungen als Teil des Wasserrechtsverfahrens und des bergrechtlichen Verfahrens verlangen. Mit den Berechnungen soll gezeigt werden, dass der thermische Einfluss der geothermischen Anlage nicht im erheblichen Maße auf den Untergrund umliegender Grundstücke wirkt (BBergG). Außerdem soll gezeigt werden, dass der thermische Einfluss in für die Bodenökologie nicht schädlichem Rahmen bleibt (WHG). Da Aufgrund der Komplexität der geobiologischen und geochemischen Prozesse Temperaturgrenzen nur schwer zu definieren sind, wird aktuell an diesem Thema im erheblichen Maße geforscht (z.B. Brielmann et. al. 2009).

Neben der thermischen Simulation des Untergrunds werden von den Unteren Wasserbehörden TRT gefordert (z.B. Senatsverwaltung Umwelt, Berlin). Dabei sollte dies nicht als kostenintensive Pflicht angesehen werden, da gemäß VDI 4640 TRT bei mittleren und großen geothermischen Anlagen empfohlen werden. TRTs helfen die thermischen Eigenschaften des Untergrunds genauer zu bestimmen (Gehlin 1998). Aufgrund des mobilen Aufbaus der Testgeräte (Eklöf & Gehlin 1996), kann die Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des thermischen Bohrlochwiderstands standortunabhängig durchgeführt werden. Über eine teufenabhängige Messung können unterschiedliche thermisch wirkenden Schichten ermittelt werden (Brandt & Hanschke 2001). Jedoch wird nur eine effektive Wärmeleitfähigkeiten ermittelt, die neben der Wärmeleitung bei Grundwassereinfluss auch einen konvektiven Anteil aufweist. Dieser Anteil ist nur schwer aus dem TRT zu bilanzieren (Rohner 2009). Ein Verfahren ist z.B. die inverse Berechnungen des TRTs mit hydrogeologischen Informationen über den Untergrund im Umfeld des TRTs (Brandt, Hanschke & Kaiser 1998).

Bei der Ausführungsplanung tragen numerische Verfahren zur genaueren Auslegung von geothermischen Anlagen bei. In Abhängigkeit der Komplexität der Anlage weisen die Ergebnisse aus numerischen Simulationen deutliche Unterschiede zu analytischen Berechnungen auf. Besonders beim Einfluss von Grundwasser können die Unterschiede erheblich sein (z.B. van Meurs 1986, Chiasson 1992, Signorelli 2004).

2.1 Objektüberwachung

In der Projektphase der Objektüberwachung, wird neben der Wartung von Wärmepumpen auch die energetische Bilanzierung von geothermischen Anlagen durchgeführt. Mit der Bilanzierung kann sowohl die energetische Effizienz als auch die Wirtschaftlichkeit der geothermischen Anlage ermittelt werden. Das Zusammenspiel von Gebäude und geothermischen Absorber kann mit Monitoring optimiert werden (Oehlert 2007). Für die Optimierung in den ersten Jahren ist eine detaillierte Berechnung der geothermischen Systems hilfreich.

3. Variantenberechnungen mit unterschiedlichen Softwarelösungen

Für geothermische Anlagen größer 30 kW ist gemäß VDI 4640 ist eine Berechnung durchzuführen um die korrekten Auslegung der Größe des Erdwärmeabsorbers nachzuweisen. Hierzu werden analytische und numerische Lösungen genannt. Der Einsatz ist abhängig von der Komplexität der Aufgabenstellung und der vorhandenen Eingangsparameter und Randbedingungen.

3.1 analytische Softwarelösungen zur Auslegung von geothermischen Anlagen

In der VDI 4640 werden zur Auslegung von mittleren und großen geothermischen Anlagen analytische Programme erwähnt, mit denen genauere Ergebnisse erzielt werden können als

Tabellenwerte oder Nomogramme (Reuß & Sanner 2001). Zu den Programmen gehören zum Beispiel EED (Sanner & Hellström 1996), GeoHand Light (Veser 2008) oder EWS (Huber & Schuler 1996). Der Einsatz von analytischen Programmen ist seit Jahren gängige Praxis (Reuß & Sanner 2001). Mit Ihnen können mit vereinfachten Annahmen einfache Berechnungen durchgeführt werden.

3.2 numerische Softwarelösungen zur Auslegung von geothermischen Anlagen

Im Rahmen der Bemessung von Erdwärmesonden- und Energiepfahlanlagen wird seit einigen Jahren über den Einsatz von numerischen Simulationen diskutiert. Obwohl numerische Simulationen bei Anlagen > 30kW durch die VDI 4640 vorgeschlagen werden, sind in der Praxis analytische Verfahren zur Dimensionierung auch von komplexen geothermischen Anlagen in Verwendung. Zum Einen liegt dies an der geringen Anzahl von numerischen Spezialprogrammen. Zum Anderen ist die Bearbeitungszeit für numerische Berechnungen um ein Vielfaches höher als bei analytischen Verfahren.

Dafür kann die Genauigkeit der Auslegung erhöht werden, sodass eine Unterdimensionierung oder Überdimensionierung vermieden wird (Pannike 2005). Neben den auf Finite Elemente (FE) basierenden FEFLOW (Hanschke 2002), Fracture (Kohl & Hobkirk 1995), Modflow (noch in der Entwicklung), Pilesim (Pahud 1999), SBM (Claesson, Eskilson & Hellström 1999), Spring (Brehm 1989) und Trnspile (Pahud & Hellström 1996) gibt es auch Programme wie Shemat (Clauser 2003), die auf Finite Differenzen (FD) basieren. Einige davon können zwar keinen realen konvektiven Wärmetransport simulieren, sind aber in der Lage, gekoppelt an die Berechnung des thermischen Verhaltens des Erdwärmeabsorbers, rudimentäre Gebäudeberechnungen durchzuführen.

4. Beispielrechnungen

Zur Darstellung, in welchen Fällen es empfehlenswert ist, numerische Simulationsprogramme einzusetzen und somit in der Ausführungsplanung noch Veränderungen zu den Planungsphasen davor zu erwirken, wurden drei Gebäudekonzepte mit geothermischen Anlagen beispielhaft entwickelt, die in ihrer Art auch im täglichen Projektgeschäft vorkommen könnten. Hierbei wurde folgende Teilbereiche in ihrer Komplexität verändert:

- Hydrogeologie
- Anordnung
- Gebäudetechnik

In Variante 1 wurde die geringste Komplexität der Randparameter angenommen. Es wurde davon ausgegangen, dass eine homogene geologische Schichtung vorliegt. Es ist keine Grundwasserbewegung vorhanden. Die Sondenanordnung ist symmetrisch. Die Wärmepumpentechnik kann nur durch feste Leistungszahlen ausgedrückt werden, da nur Systemtemperaturen jedoch keine energetische Berechnung des Gebäudes vorliegen. Die Gebäudetechnik wird von der geothermischen Anlage mit Wärme und Kälte versorgt. Hierzu liegen Spitzenheiz- und Kühllasten sowie überschlägige Volllaststunden vor, die über einen Schlüssel auf monatliche Werte aufgeteilt werden können.

Die Variante 2 wurde gegenüber dem Fall 1 in dem geologischen Aufbau verändert. Der Untergrund weist neben wärmeleitenden Schichten auch eine Grundwasser leitende Schicht auf. Diese wurde über einen teufenabhängigen TRT erfasst. Es liegen hydrogeologische Daten über den umliegenden Untergrund vor.

Variante 3 weist die höchste Komplexität auf. Ein Grundwasser beeinflusstes, unsymmetrisches Erdwärmesondenfeld. Die Gebäudedaten liegen mit stündlichen Werten aus einer Gebäudesimulation vor. Zu Variante 3 liegen gemessene Werte aus einem Bauvorhaben vor.

Dieses wurde energetisch über Monitoring ab Inbetriebnahme erfasst. Es wurden Wärmemengen und Temperaturen im Gebäude und in den Erdwärmesonden erfasst. Außerdem wurden die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe erfasst. Die Ergebnisse aus den Simulationen können also entweder energetisch oder thermisch mit den gemessenen Werten verglichen werden.

Für die Berechnungen wurden 3 unterschiedliche Programme verwendet. Zum einen das analytische Programm EED 3.0, zum zweiten das Programm PileSim2, dass auf einen semi-numerischen Ansatz basiert und das Finite Elemente Programm FEFLOW 5.4. In der nachfolgende Tabelle sind einige Unterschiede der Programme noch einmal zusammengefasst.

	EED 3.12	PileSim2 V 3.07	FEFLOW 5.4
Berechnungsverfahren	analytisch	Semi-numerisch	Numerisch (FE)
Eingangsparameter	u.a. Homogene Wärmeeigenschaften des Untergrunds, Symmetrische Anordnung des Sondenfelds	u.a. Variable Wärmeeigenschaften des Untergrunds (3 Schichten), Variable Sondenanordnungen, Gebäudebedarf mit täglicher Auflösung, Wärmepumpentechnik	u.a. Variable Wärmeeigenschaften des Untergrunds, Variable Sondenanordnungen, Gebäudebedarf mit minütlicher Auflösung, Wärmepumpentechnik
Art der Ergebnisse	Mittlere Temperaturen im Erdwärmesondenkreislauf über die Simulationszeit, Anzahl Sonden für bestimmte Grenztemperaturen	Rücklauftemperaturen im Erdwärmesondenkreislauf sowie Leistungen und Energien im Untergrund	Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Erdwärmesondenkreislauf sowie Leistungen und Energien im Untergrund
Vorteile	Schnelle Berechnungsmethode, schnelle Modellerstellung, Variantenberechnungen, Vorgaben für thermische Eigenschaften des Untergrundes und des Erdwärmesondensystems	Rudimentäre dynamische Gebäudesimulation, Wärmepumpentechnik, Variable Sondenanordnung, schnelle Modellerstellung	Variable Sondenanordnung, Konvektion und Konduktion berechenbar,
Nachteile	Nur Wärmeleitung, Nur vorgegebene Sondenanordnungen, statische monatliche Gebäudedaten	Langsame Berechnungsmethode, Nur Wärmeleitung	Langsame Modellerstellung, Langsame Berechnungsmethode, statische Gebäudedaten

Tab. 1: Eigenschaften der verwendeten Simulationsprogramme

Da die Ausgaben der Programme unterschiedlich sind, wurden für den Vergleich die Simulationen so ausgewertet, dass als Ergebnis die Sondenanzahl mit einer nachhaltigen Betriebssicherheit genommen wurden.

4.1 Variante 1 – Geringste Komplexität der Eingangsparameter

Die Eingangsparameter für die Variante sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	Variante 1
Heizleistung	100 kW
Kühlleistung	100 KW
Geologie	100 m Sand, gesättigt
Wärmeleitfähigkeit	1,73 – 5,02 W/mK (2,4 W/mK)
Arbeitszahl Heizen	4
Arbeitszahl Kühlen	5
Grenztemperatur Heizen	-2°C
Grenztemperatur Kühlen	+22°C
Heizenergie/a	120 MWh
Kühlenergie/a	80 MWh

Tab. 2: Randparameter der Variante 1

Diese noch nicht sehr detaillierten Angaben liegen häufig in den ersten Planungsphasen vor. Aufgrund der Komplexität der Eingangsparameter für die Simulationsprogramme wurden hier nur die wichtigsten Werte aufgeführt. Die nicht aus dieser Tabelle hervorgehenden Eingangsparameter, wie z.B. die Sondenanordnung oder die monatliche Aufteilung der Energien wurden in dem jeweilige Programm optimiert.

Mit den genannten Eingangsparametern wurden Modelle mit den drei Programmen erstellt. Die Ergebnisse aus den Berechnungen der Variante 1 sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	EED 3.12	PileSim2 V3.07	FEFLOW 5.4
Ermittelte Sondenanzahl	18	18	18

Tab. 3: Ergebnisse der Variante 1

Es ist zu erkennen, dass es keine Abweichung zwischen den Programmen gibt. Hervorzuheben ist, dass die Bearbeitungszeit zum Erstellen der Modelle und die Rechenzeit der Modelle zum Ergebnis zu Gunsten des analytischen Programms erheblich variierten. Eine Berechnung mit EED ist somit aufgrund der geringen Komplexität des Modells und der erheblichen zeitlichen Vorteile anzuraten.

4.2 Variante 2 – Einfluss von Grundwasser

In der Variante 2 wurden gegenüber der ersten Variante die geologischen Verhältnisse verändert. In der folgenden Abbildung ist der nun zu erkennen, dass der Untergrund über die Länge von 100 m

dreigeteilt ist. Das mittlere Drittel wurde mit thermischen Eigenschaften von Mittelsand mit einer Grundwasserströmung belegt, die beiden Schichten ober- und unterhalb mit thermischen Eigenschaften von Geschiebemergel. Diese Profil ist z.B. in der norddeutschen Tiefebene wieder zu finden.

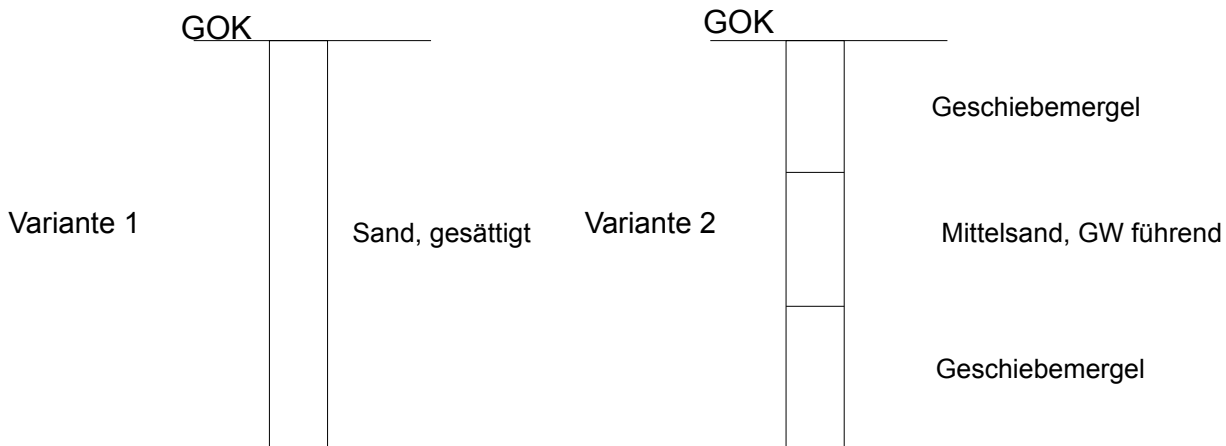


Abb. 1: Veränderung des Untergrundaufbaus von Variante 1 und 2

Für den Geschiebemergel wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 1,8 W/mK angenommen, für den Mittelsand eine effektive Wärmeleitfähigkeit von 5,6 W/mK. In FEFLOW wurden dieser Wert auf einen konduktiven Anteil und einen konvektiven Anteil aufgeteilt. Die Grundwasserströmung wurde über eine inverse Berechnung ermittelt.

Ergebnisse sehen wie folgt aus:

	EED 3.12	PileSim2 V3.07	FEFLOW 5.4
Ermittelte Sondenanzahl	18	16	13

Tab. 4: Ergebnisse der Variante 2

Es ist zu erkennen, dass die numerische Berechnung des Untergrund mit seinem konvektiven Anteil in dieser Variante in erheblichem Maße von den rein konduktiven Berechnungen abweicht. Bei der Auslegung könnte in diesem Fall die erhöhten Kosten einer numerischen Simulation durch die geringere Sondenanzahl kompensiert werden. Der Einsatz von FEFLOW, anderen FE oder FD Programmen, die konvektiven Wärmetransport berechnen können wäre in diesem Fall empfehlenswert.

4.3 Variante 3 – Einfluss von unsymmetrischer Anordnung von Erdwärmesonden

In vielen Fällen werden Erdwärmesondenfelder nach symmetrische Anordnungen geplant und fertiggestellt. Jedoch kommt es in der Planung auch nicht selten vor, dass aufgrund der Bauablaufplanung oder standortspezifischen Gegebenheiten die Erdwärmesonden eine asymmetrische Anordnung aufweisen müssen. Die Variante 3 betrachtet einen solchen Fall.

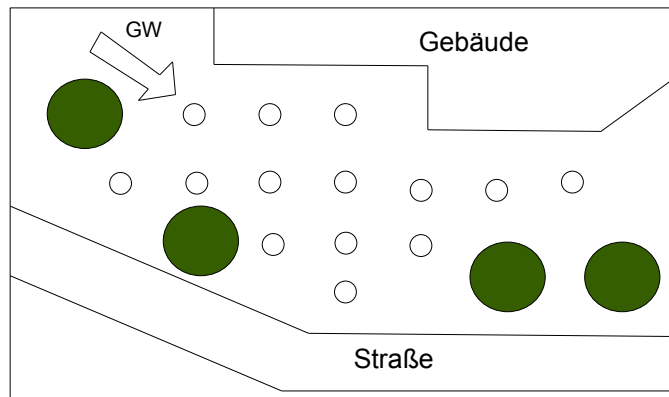


Abb. 2: Anordnungen der Erdwärmesonden (kleine Kreise) in Variante 3

In diesem Fall wurde die Anzahl der Sonden definiert, jedoch die Tiefe nicht begrenzt. Die Ergebnisse aus den Simulationen ergaben folgende Werte.

	EED 3.12	PileSim2 V3.07	FEFLOW 5.4
Sondenlänge	130 m	118 m	105 m

Tab. 5: Ergebnisse der Variante 3

Auch in dieser Variante ist zu erkennen, dass der Einfluss der simulierten Konvektion einen Unterschied zwischen den Ergebnissen erzeugt. Da das Feld mit EED nur in einer vereinfachten symmetrischen Anordnung berechnet werden konnte, sollte bei ähnlichen Fällen der Einsatz von FE und FD Programmen überlegt werden.

4.4 Vergleich der gemessenen Werten mit simulierten Werten aus FEFLOW

Da davon ausgegangen werden kann, dass Berechnungen, ob auf analytische oder numerische Verfahren basierend, Fehler beinhalten, sollten diese Ergebnisse immer mit gemessenen Werten verglichen werden. Die Eingangsparameter und Randbedingungen für Variante 3 entsprachen einem realen Fall, sodass die Ergebnisse, wie schon erwähnt, mit gemessenen Werten verglichen werden konnten. In dem Fall gab es einen tiefenabhängigen TRT und eine Gebäudesimulation nach DIN 18599. Für den Vergleich mit den betriebenen Werten lagen gemessene Gebäudedaten vor. Das FE Modell wurde an dem TRT verifiziert und die gemessenen Gebäudewerte wurden auf das Modell als Randbedingungen 4 Art geprägt. Die Ergebnisse von FEFLOW im Vergleich mit den gemessenen Werten aus einem Monat sind im folgenden Diagramm abgebildet.

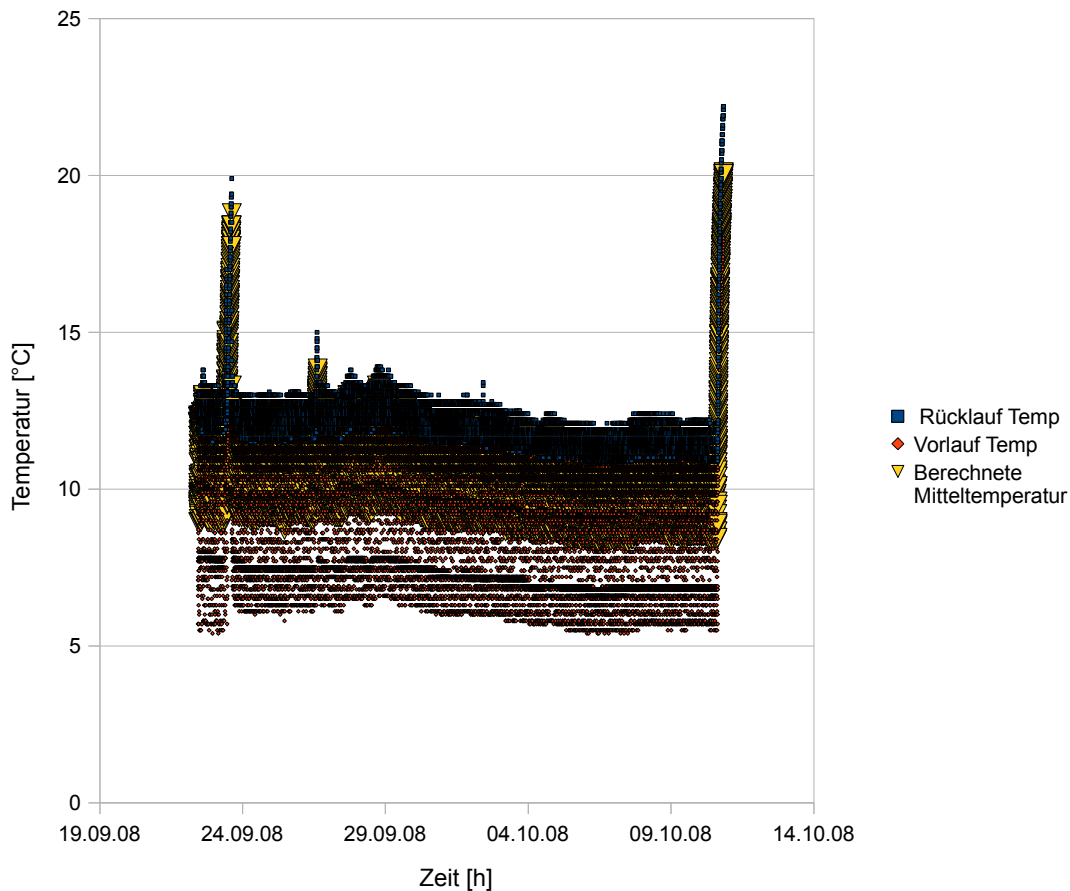


Abb. 3: Vergleich von simulierten Werten und gemessenen Werten

Zu erkennen ist, dass die berechneten Werte sich zu einem Großteil der Zeit innerhalb der Vor- und Rücklauftemperaturen befinden. Eine statistische Auswertung der Daten ergab, dass etwa 93 % der berechneten Mittelwerte den gemessenen Mittelwerten aus Vor- und Rücklauf entsprachen. Somit konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von numerischer Software wie FEFLOW bei guter Datengrundlage den gemessenen Werten entspricht. Die geringere Sondenanzahl gegenüber der durch EED ermittelten hat nicht zu einer Unterdimensionierung geführt. Die Einsparungen der Erdwärmesonden und somit auch der Investitionskosten, haben sich als sinnvoll erwiesen. Wieviel näher die Ergebnisse der Simulation mit FEFLOW an den gemessenen Werten gelegen hätte, wäre das Programm mit einem Gebäudesimulationprogramm gekoppelt worden, kann an dieser Stelle nicht ermittelt werden. Jedoch kann vermutet werden, dass sich eine vollständig dynamische Simulation den gemessenen Werten angeglichen hätte.

5. Ergebnisse

Die Berechnungen zeigen, dass bei komplexen Anlage erhebliches Einsparungspotential mit numerischen Softwarelösungen gegenüber analytischen Ansätzen zu erreichen ist. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass Reduzierungen der Investitionskosten von bis zu 30 % und mehr möglich sind, wenn numerische Berechnungsmethoden eingesetzt werden. Nicht immer ist jedoch ein numerischer Ansatz notwendig. Die Auswahl der Simulationssoftware ist in Abhängigkeit der Anforderung zu treffen. Liegt eine geringe Komplexität in Geologie und Hydrogeologie vor und ist der Betrieb des Gebäudes ebenfalls durch Einfachheit charakterisiert,

sind die Ergebnisse aus analytische Berechnungsmethoden den von numerischen annähernd gleich. Von Grundlagenermittlung bis zur Entwurfsplanung liegt in den meisten Fällen keine detaillierte Parametern zur numerische Simulation vor. Hier sind in jedem Fall für mittlere und große geothermische Anlagen analytische Berechnungsverfahren den Tabellenwerten oder einfachen Berechnungsverfahren vorzuziehen. Gegenüber numerischen Berechnungsverfahren weisen die Berechnungen mit EED einen erheblichen geringeren Zeiteinsatz auf, sodass analytische Programme in den ersten Planungsphasen eingesetzt werden sollten.

In der Ausführungsplanung sollte in jedem Fall geprüft werden, ob numerische Simulationen mit genaueren Eingangsparametern exakterer Lösungen liefern können. Dies ist nicht nur aus Kostengründen sondern auch zum Erhalt der Anlagentechnik und Steigerung des Verständnis des Zusammenspiels des Gebäudes mit dem geothermischen Systems unerlässlich.

Auch die Leistungsphase 9, das Monitoring der Anlage, hilft zur Sicherung der Langlebigkeit der Anlagentechnik. Das Erfassen von Temperaturen und Wärmemengen sichert die Energieeffizienz von geothermischen Anlage. Ermitteltes Potential aus der Auslegung lässt sich durch Monitoring verifizieren. Das gewonnen Verständnis der Anlagentechnik aus Simulation und Monitoring kann nochmals zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz führen.

Grundlagenermittlung der Randparameter ist in jedem Fall notwendig um die jeweilige Detailtiefe und Genauigkeit der Berechnungen zu erreichen. Unerlässlich ist hier bei mittleren und großen geothermischen Anlagen der Einsatz von Thermal Response Tests. Die genaue Berechnung der Leistungen und Energien der Gebäudetechnik für das jeweilige Gebäude wird in der Praxis meist aufgrund der Komplexität und des Aufwandes vernachlässigt. Hierauf sollte in Zukunft ein größeres Augenmerk liegen. Ganzheitliche Simulationssoftwareverfahren, in denen Gebäudetechnik, Anlagenbetriebsweisen, Wärmepumpentechnik, variable geothermische Anlagen und die Komplexität aus den thermische Untergrundverhältnissen gemeinsam in dynamischen Verfahren berechnet werden können, sind weiter zu entwickeln. Damit kann die Attraktivität innovativer Großgebäude mit geothermischer Technik auf Grund der Kostenreduktion in den Investitionskosten sowie der nachgewiesenen Betriebssicherheit weiter gesteigert werden.

Quellenangaben

Brandt, W., Hanschke, T., Kaiser, H.: *Zum Stand der Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Norddeutschland* (1998)

Brandt, W., Hanschke, T.: *Oberflächennahe Erdwärmennutzung in Mecklenburg-Vorpommern* (2001)

Brehm, D.R.: *Entwicklung, Validierung und Anwendung eines dreidimensionalen strömungsgekoppelten finite Differenzen Wärmetransportmodells*. Giessener Geologische Schriften 43, 120 S. (1989)

H. Brielmann et al.: *Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems*. FEMS Microbiol Ecol. (2009)

Clauser, C.: *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers - SHEMAT and Processing SHEMAT*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. (2003)

Chiasson, A.D.: *Advances in modeling of ground-source heat pump systems*, Exchange Organizational Behavior Teaching Journal, (1992)

EKLÖF, C. & GEHLIN, S.: *TED - a mobile equipment for thermal response test*. - 62 p., Master's thesis 1996:198E, Luleå University of Technology (1996)

Eskilson, P.: *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. 264 S., PhD-thesis Lund-MPh-87/13, Lund University of Technology (1987)

- GEHLIN, S.: *Thermal Response Test - In-situ measurements of thermal properties in hard rock* . - Lic. thesis 1998:37, Luleå University of Technology, Luleå (1998)
- Huber, A. und Schuler, O.: *Programm- Modul EWS. 3. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen - Systeme zum Heizen und Kühlen* , Schloss Rauschholzhausen, Fachinformationszentrum Karlsruhe - Gesellschaft für wissenschaftlich- technische Information mbH. (1998)
- Claesson, J., Eskilson, P., Hellström, G.: *PC Design Model for Heat Extraction Boreholes* . Proc. 3rd WS on SAHPGCS Göteborg, CITη 1990:3, 99-102 (1990)
- Signorelli, S., Bassetti, S. Pahud, D. and Kohl, T. *Numerical evaluation of thermal response tests Geothermics*, vol. 36, pp. 141-166. (2007)
- Kaiser, H.: *Entwurf eines Zusatzmoduls "Oberflächennahe Geothermie" für FEFLOW 5.1 als Grundlage zur effizienten Bemessung von mittleren und großen Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie* (2005)
- Kohl, T., Hopkirk, R.J.: *FRACture" a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock Geothermics*, **24**, pp. 345- 359. (1995)
- Hanschke, T.: *Einsatz von FEFLOW für die Berechnung des Nutzungspotentials der oberflächennahen Geothermie anhand von Beispielobjekten aus der Stadt Rostock* , 5.Fachtagung der WASY GmbH Berlin, 2002, pp. 11-14. (2002)
- Pahud, D.: *PILESIM – LASEN Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers*, Bundesamt für Energie, (1999)
- Pahud, D., Hellstrom, G.: *The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS* . Proc. Eurotherm Seminar 49, Eindhoven, 127-136 (1996)
- Pannike, S.: *Ausbreitung der Kältefahnen oberflächennaher Erdwärmesonden in Lockergesteinen Grundwasser*, (2005)
- Reuß, M.: *lea eces annex 21 thermal response test*, *Symposium „10 Jahre Thermal Response Test in Deutschland“*, GTV, 2009, pp. 1-7. (2009)
- REUß, M. & SANNER, B.: *Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen: Basis einer nachhaltigen Erdwärmenutzung, VDI-Richtlinie 4640 und Berechnungsverfahren, Erdwärme zum Heizen und Kühlen. Potenziale, Möglichkeiten und Techniken der oberflächennahen Geothermie. – Kleines Handbuch der Geothermie*,. Bd. 1, 2. Aufl., Geothermische Vereinigung (Hrsg.); Geeste. (2001)
- Rohner, E.: *TRT in Kombination mit hochaufgelösten Temperatur- Tiefenprofile zur Qualitätssicherung, Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, (2009)
- Sanner, B., Hellström, G.: *"Earth Energy Designer", eine Software zur Berechnung von Erdwärmesondenanlagen*. Proc. 4. Geothermische Fachtagung Konstanz, GtV, 326-333 (1996)
- Signorelli, S.: *Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. PhD thesis ETH No. 15519, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, p. 159. (2004)
- van Meurs, G.A.M.: *Seasonal Heat Storage in Soil*, thesis, Dept. of Applied Physics, University of Technology Delft, P.O.Box 5046, 2600 GA Delft, Netherlands. (1986)
- Veser, S.: *GEO-HANDlight – Manual Computation Method for the Preliminary Design of Geothermal Heat Pumps (GHP)*, (2008)

VDI 4640 : *Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpen.* - VDI 4640, Richtlinie Blatt 2, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf; Beuth Verlag, Berlin (1998)

VDI 4650 *Berechnungen von Wärmepumpen - Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen - Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung.* VDI 4650 Blatt 1. Ausgabe: 2009 Beuth Verlag, Berlin (2009)

Postadresse: Gerber Ingenieurgesellschaft Geothermie mbH Landwehrstr. 55, 64293 Darmstadt
E-Mail-Adresse: mail@gerber-geothermie.de