

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Erweiterung der Pro- gramms WPcalc mit dem Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS

ausgearbeitet durch
Martin Stalder (Projektleiter)
Ingenieurbüro
Engelgasse 22, 8911 Rifferswil
m.stalder@energienetz.ch
Arthur Huber
Huber Energietechnik
Jupiterstrasse 22, 8032 Zürich
und
Stefan Albrecht
Albrecht Informatik
Scherrerstrasse 10, 8400 Winterthur

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Einbindung des im Auftrag des BFE entwickelten Programms EWS für die Simulation von Erdwärmesonden [Huber/Schuler 1997] in das Programm WPcalc. Hierzu mussten folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Übersetzen des WPcalc Turbopascal-Codes in Delphi
- Anpassen der Programmoberfläche von WPcalc
- Definieren einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Programmoberfläche, WPcalc-Code und EWS-Modul.
- Durchführen von Anpassungen an den Programmcodes von EWS und WPcalc.

Da Delphi und Turbopascal von der Syntax her sehr ähnlich sind, hat die Übersetzung des WPcalc-Codes keine erheblichen Probleme verursacht.

Die Integration von EWS gestaltet sich hingegen komplexer. An WPcalc kann jeweils nur stündlich ein neuer Wert für die Erdwärmesondentemperatur übergeben werden. Wenn die Wärmepumpe in Betrieb ist, ist die Erdwärmesondentemperatur jedoch eine sehr instationäre Grösse. Das Problem wurde folgendermassen gelöst:

- WPcalc übergibt an EWS die mittlere Wärmeentzugsleistung und die Laufzeit der WP während der vorangegangenen Stunde.
- Aus diesen Leistungsdaten berechnet EWS die genaue Sondenbilanz der vorangegangenen Stunde und ermittelt eine relevante mittlere Sondentemperatur für die aktuell zu simulierende Stunde. Dieser Wert wird dann an WPcalc zurückgegeben.

Näheres in den Abschnitten 2.3 bis 2.5.

Die Programmoberfläche wurde erweitert. Für die Simulation mit EWS können folgende Parameter eingegeben werden: Sondenanordnung, Bohrtiefe, Gesteinstyp (2 Schichten), Sondentyp, Fluid, Temperaturdifferenz.

Tests mit dem Programm haben gezeigt, dass das neue Programm (WPcalc / EWS) realistische Sondentemperaturen liefert. Die Abweichungen zu einer stand-alone Simulation (Gleiche Sondenparameter, gleiches Wärmebezugsprofil) mit EWS sind im Mittel kleiner als 0.1 K. Die gewählte Lösung zur Integration von EWS in WPcalc liefert somit eine mit Bezug auf die im allgemeinen nur näherungsweise bekannten geothermischen Stoffwerte des Erdbodens für die Bedürfnisse des Programms ausreichende Genauigkeit.

EWS sollte auf jeden Fall von Anfang an in ein neu zu überarbeitendes WPcalc integriert werden.

Abstract:

Target of the project is the integration of the program EWS for the simulation of vertical borehole heat exchangers, developed by Huber energy engineering, into the program WPcalc. For this the following work had to be done:

- Translate the WPcalc Turbopascal codes into Delphi.
- Adapt to the program surface of WPcalc.
- Define a communication interface between program surface, WPcalc code and EWS module.
- Realizing some adjustments at the program codes of EWS and WPcalc.

Since Delphi and Turbopascal from the syntax are very similar, the translation of the WPcalc code caused no substantial problems.

The integration of EWS becomes however more complex. At WPcalc, only once per hour a new value for the borehole temperature can be transferred. If the WP is in operation, the borehole temperature is however a very intermittent value. The problem has been solved as follows:

- WPcalc transfers the average heat extraction and the run time of the heat pump at EWS during the preceding hour.
- From these performance data EWS calculates the exact borehole balance of the preceding hour and determines a relevant average borehole temperature for the actual simulation hour. This value is then returned at WPcalc.

Details in chapters 2,3 to 2.5.

The program surface was extended. For the simulation with EWS the following parameters can be input: borehole arrangement, drilling depth, type of rock (2 layers), type of probe, fluid, temperature difference.

Tests with the program showed, that the new program (WPcalc / EWS) supplies realistic borehole temperatures. The deviations to a stand alone simulation with EWS is on the average smaller than 0,1 K. The chosen solution for the integration of EWS in WPcalc supplies a sufficient accuracy for the needs of the program.

EWS should be integrated in any case in a newly revised WPcalc.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	1
ABSTRACT:	2
1. PROJEKTZIELE	4
2. DURCHGEFÜHRTE ANPASSUNGEN AN WPCALC UND EWS	4
2.1 Übersetzen des Turbopascal-Codes in Delphi	4
2.2 Anpassen der Programmoberfläche	4
2.3 Definition der Kommunikationsschnittstelle zwischen WPcalc und EWS	5
2.4 Ermitteln der Ausgangswerte der Erdwärmesonde	6
2.5 Ermitteln der relevanten mittleren Sondentemperatur	6
3. PROGRAMMTESSTES, VALIDIERUNG DER EINBINDUNG	6
3.1 Kriterien zur Beurteilung der Einbindungsgüte von EWS	6
3.2 Vorgehensweise	6
3.3 Einschwingverhalten	7
3.4 Genereller Verlauf übers Jahr	9
3.5 Stündlicher Verlauf der Erdwärmesondentemperatur	10
3.6 Vergleich mit separater EWS Simulation	10
3.7 Fazit	11
4. ERKENNTNISSE AUS DEN DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN	11
4.1 Beurteilung der Einbindung in WPcalc	11
4.2 Möglichkeiten einer Verbesserung der Genauigkeit	11
4.3 Erkenntnisse für zukünftige Programmentwicklungen	11
5. LITERATURVERZEICHNIS	12
ANHANG	13
A1 Das Erdwärmesodenmodul EWSMOD und dessen Einbindung	13
A1.1 Anpassungen am Sondenmodul EWSMOD	13
A1.2 Aufruf des Sondenmoduls EWSMOD im Hauptprogramm	13
A1.3 Schätzung der Quellentemperatur	15
A2 Inputvariablen der für die Validierung verwendeten Anlagen	17

1. Projektziele

Hauptziel war die Erstellung einer lauffähigen Testversion von WPcalc-EWS. Um dieses Ziel zu erreichen, waren folgende Arbeiten durchzuführen:

- Übersetzen des WPcalc Turbopascal-Codes in Delphi
- Anpassen der Programmoberfläche von WPcalc
- Definieren einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Programmoberfläche, WPcalc-Code und EWS-Modul.
- Durchführen von Anpassungen an den Programmcodes von EWS und WPcalc.
- Durchführen erster Funktionstests

2. Durchgeführte Anpassungen an WPcalc und EWS

2.1 Übersetzen des Turbopascal-Codes in Delphi

Das Simulationsmodul von WPcalc ist in Turbopascal geschrieben worden, das EWS-Modul besteht zur Zeit in einer Version, die in Delphi implementiert wurde. Delphi ist von der Sprachsyntax her (so lange es sich nicht um Programmoberfläche handelt) mit dem Turbopascal verwandt.

Delphi hat aber gegenüber dem Turbopascal den Vorteil, dass es unter 32 Bit läuft und weniger Speicherbeschränkungen unterliegt.

Es wurde deshalb entschieden, dass als Vorarbeit für die Integration von EWS der WPcalc Code auf Delphi umgeschrieben wird.

Das Übersetzen des Pascal-Codes in Delphi funktionierte gut. Einzig die Einleseprozedur für die Simulationsparameter musste umgeschrieben werden. (Beim lesen einer geöffneten Datei erlaubt Delphi keinen Reset. Hierfür muss die Datei geschlossen und wieder geöffnet werden.)

Vergleiche mit der Turbopascal Version haben gezeigt, dass die Delphi Version, abgesehen von der höheren Rechengenauigkeit, identische Resultate liefert.

2.2 Anpassen der Programmoberfläche

Bei der Auswahl der Quellenmedien kann jetzt neu "Erdwärmesonde, Simulation mit EWS-Programm" ausgewählt werden. Diese Auswahl führt dann zu einer separaten Eingabemaske, in der die für die Simulation notwendigen Parameter eingegeben werden können.

ERDSONDENTEMPERATUR MIT EWS-PROGRAMM* SIMULIERT

Sondengeometrie

Bohrtiefe: m Gesamte Sondenlänge: m
Vorschlagswert: m

Anordnung:

Sondentyp:

Wärmeträgerkreislauf

Wärmeträger: Volumenstrom: m³/h
Temperaturdifferenz: K

Erdschichten

Schicht 1 (Lockergestein)

Gestein: Schichthöhe: m

Schicht 2 (Festgestein)

Gestein:

ZURÜCK

Bild 1: Neue Eingabemaske für Simulation mit EWS-Modul

Für die EWS Simulation können folgende Parameter variiert werden:

- Bohrtiefe
- Sondenanordnung (Einzelsonde, 2 Sonden, 1x3 Sonden, 2x2 Sonden, 2x3 Sonden)
- Sondentyp (Doppel-U 25 mm, Doppel-U 32 mm, Doppel-U 40 mm)
- Fluid (Wasser, Monoethylenglykol 25%, Monoethylenglykol 33%, Monopropylenglykol 25%, Monopropylenglykol 33%)
- Temperaturdifferenz über der Sonde

- Erdschichten. Angabe von 2 Schichten mit unterschiedlichem Gestein (Lockergestein, Festgestein)

Es werden folgende Hilfswerte angezeigt:

- Vorschlagswert für die gesamte Sondenlänge (Berechnet aus typischen Sondenentzugsleistung bei 2°C Sondentemperatur und einer Belastung der Sonde von 50 W/m)
- Volumenstrom (Berechnet aus der Temperaturdifferenz und der Sondenentzugsleistung)

2.3 Definition der Kommunikationsschnittstelle zwischen WPcalc und EWS

EWS ist so programmiert, dass es wie eine Funktion aufgerufen werden kann. Simulationsparameter, die nicht übergeben werden, werden intern durch Defaultwerte ersetzt. Dies ist sehr praktisch, da nur die Parameter übergeben werden müssen, die angepasst werden sollen.

Ein Problem für die EWS-Simulation bestand darin, dass nur stündlich eine Erdwärmesondentemperatur an WPcalc übergeben werden kann. Wenn die Wärmepumpe in Betrieb ist, ändert sich die Erdwärmesondentemperatur jedoch stark. Zudem ist für die jeweilige Stunde nicht im Voraus bekannt, wieviel Wärme der Erdwärmesonde entzogen wird.

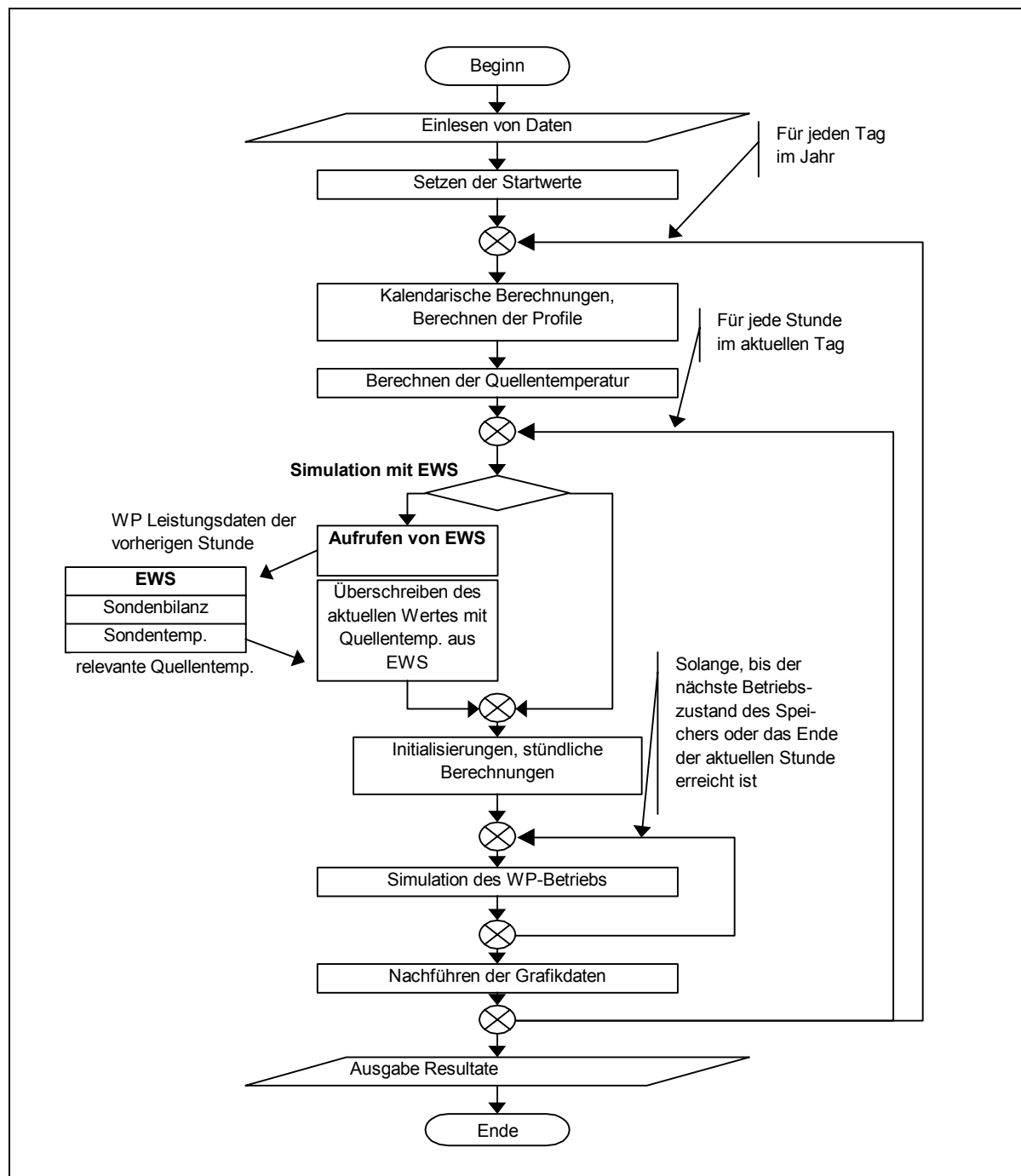


Bild 2: Einbindung von EWS

Das Problem wurde folgendermassen gelöst:

- WPcalc übergibt an EWS die mittlere Wärmeentzugsleistung und die Laufzeit der WP während der vorangegangenen Stunde.
- Aus diesen Leistungsdaten berechnet EWS die genaue Sondenbilanz der vorangegangenen Stunde und ermittelt eine relevante mittlere Sondentemperatur für die aktuell zu simulierende Stunde. Dieser Wert wird dann an WPcalc zurückgegeben.

2.4 Ermitteln der Ausgangswerte der Erdwärmesonde

Im Programm EWS wird der eingeschwungene Zustand der Erdwärmesonde ermittelt, in dem man das Verhalten der Sonde für mehrere Jahre simuliert. Dies ist wegen der Struktur von WPcalc und der langen sich daraus ergebenden Rechenzeiten für die Integration in WPcalc nicht sinnvoll (Ein Berechnungstool wird von Ingenieuren nur akzeptiert, wenn die Simulationszeiten innerhalb weniger Minuten liegt).

Um trotzdem einen Realistischen Anfangszustand der Erdwärmesonde zu erhalten, wird EWS von WPcalc ein geschätzter Jahreswärmeentzug übergeben. Aufgrund dieses Wertes führt EWS eine Simulation ohne WPcalc durch, in der die Ausgangsparameter der Sonde ermittelt werden.

Ebenfalls wird in dieser „Vorsimulation“ die Auskühlfunktion der Sonde unter Last (Sprungantwort) ermittelt. Diese Funktion wird gebraucht, um die relevante mittlere Sondentemperatur der jeweiligen Stunde in der WPcalc-Simulation zu ermitteln.

Mit diesen Anfangsparametern wird dann ein Jahresrun mit WPcalc durchgeführt.

2.5 Ermitteln der relevanten mittleren Sondentemperatur

Wie bereits oben erwähnt, kann an WPcalc nur jeweils jede Stunde eine Sondentemperatur übergeben werden. Auch wird keine Iteration zwischen dem WP-Betrieb und EWS durchgeführt. Das heisst, in EWS muss für die aktuelle Stunde eine repräsentative Temperatur für die belastete Sonde im Voraus geschätzt werden.

Zu diesem Zweck wurde für EWS ein entsprechender Algorithmus entwickelt. Dabei wird in der „Vorsimulation“ (siehe oben) die Sprungantwort der Sondentemperatur unter Last aufgenommen. Diese Funktion wird dann in der eigentlichen Simulation verwendet, um abzuschätzen, wie die Sondentemperatur sein wird, wenn die WP in der aktuellen Stunde in Betrieb ist. Am Ende der aktuellen Simulations-Stunde wird dann anhand des effektiven WP-Betriebs die genaue Sondenbilanz ermittelt. Diese dient dann als Ausgangslage für die Abschätzung der Sondentemperatur der nächsten Stunde.

Für die Abschätzung der Sondentemperatur muss EWS eine voraussichtliche Entzugsleistung und Betriebszeit der WP für die nächste Stunde übergeben werden. Hierfür wurde folgender Algorithmus gewählt:

Die Entzugsleistung ist gleich der Entzugsleistung der WP, als sie das letzte mal gelaufen ist.

Die Betriebszeit entspricht der Betriebszeit der vergangenen Stunde, jedoch mindestens 30 Minuten. Auf diese Weise wird verhindert, dass für die kommende Stunde eine zu hohe Temperatur geschätzt wird, wenn die vorhergehende Stunde nur wenig oder keine WP-Betriebszeit aufweist.

3. Programmtests, Validierung der Einbindung

3.1 Kriterien zur Beurteilung der Einbindungsgüte von EWS

Bei der Einbindung von EWS in WPcalc mussten wie oben beschrieben einige Vereinfachungen gemacht werden. Daher ist zu erwarten, dass das in WPcalc eingebundene EWS nicht ganz genau dieselben Resultate liefert, wie ein Run mit derselben Sondenbelastung in EWS allein. Um eine Aussage machen zu können, wie gut die Einbindung von EWS in WPcalc ist, müssen folgende Kriterien beurteilt werden:

- Wie gut stimmt die Anfangstemperatur zu Beginn der Simulation mit der Endtemperatur am Ende der Simulation überein (Einschwingverhalten)
- Ist der generelle Verlauf der Sondentemperatur realistisch und logisch
- Wie gross ist die mittlere Abweichung der Sondentemperatur im Vergleich zu einer Referenzsimulation und welche Auswirkungen hat das auf die mittlere Leistungsziffer der WP

3.2 Vorgehensweise

Das Berechnungsmodul EWS wurde bereits im Rahmen seiner Entwicklung anhand von Messungen validiert. Für die Beurteilung der Einbindungsgüte wird deshalb als Referenz eine Simulation nur mit EWS auf der Basis von stündlichen WP-Daten aus WPcalc genommen. Massgebend für die Beurteilung sind nur die Sondentemperaturen derjenigen Simulationsschritte, in denen die WP in Betrieb war. (Die Temperatur der nicht belasteten Sonde hat keinen Einfluss auf die Resultate der WPcalc Simulation).

Für den Vergleich wurden zwei verschiedene Anlagentypen simuliert:

- Bivalente Anlage mit kleinem Deckungsgrad der WP (Leistung WP ca. 30-40% des Wärmeleistungsbedarfs)
- Mononergetische Anlage mit hohem Deckungsgrad der WP (Leistung WP ca. 80-90% des Wärmeleistungsbedarfs).

3.3 Einschwingverhalten

Um bezüglich der Sondentemperatur eine möglichst realistische Ausgangslage für die Simulation zu haben, wird aufgrund eines geschätzten Jahreswärmeentzugs der Sonde eine „Vorsimulation“ mit EWS über ein Jahr durchgeführt. Dabei wird die der Sonde entzogene Wärme auf das Jahr verteilt. Dies insbesondere auch ohne Rücksicht auf den Deckungsgrad der WP. Bei der Sondenlaufzeit wird zwischen einem Entzugsprofil mit oder ohne Warmwasserproduktion unterschieden. Das Entzugsprofil ist im Anhang A1.2 beschrieben.

Wie gut die so ermittelte Anfangsbedingung für die Sonde ist, wurde anhand von zwei Simulationen überprüft. Die simulierten Anlagen unterscheiden sich im Deckungsgrad der Wärmepumpe am Jahreswärmebedarf. Die Daten der Wärmepumpe und der Sonde sind identisch. In den untenstehenden Diagrammen (Bild 3, 4) sind die Sondentemperatur am Anfang und am Ende der WPcalc/EWS Simulation einander gegenübergestellt. (Eingabeparameter siehe Anhang A 1.4)

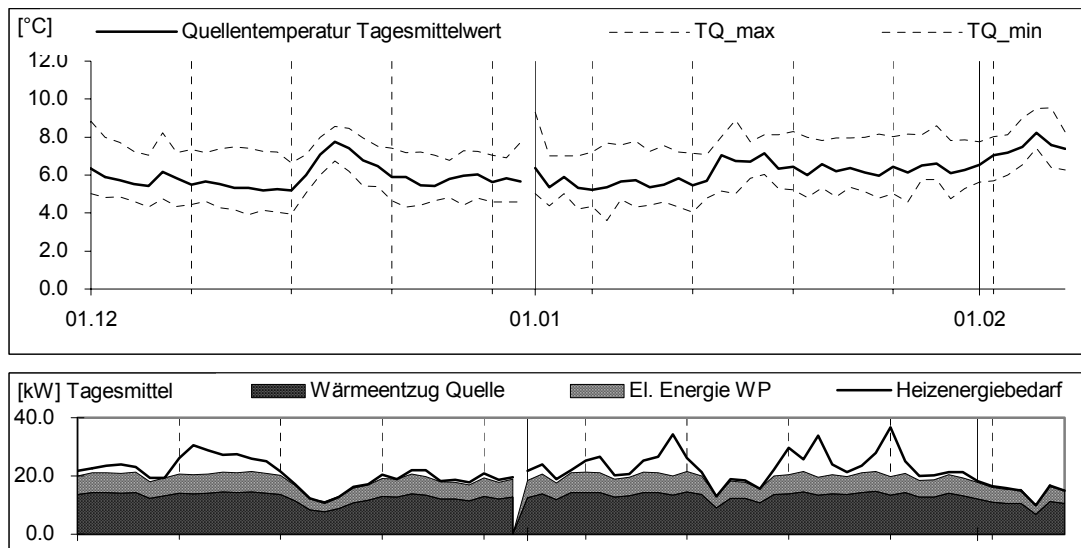


Bild 3: Einschwingverhalten der Sondentemperatur für eine Anlage mit hohem Deckungsgrad

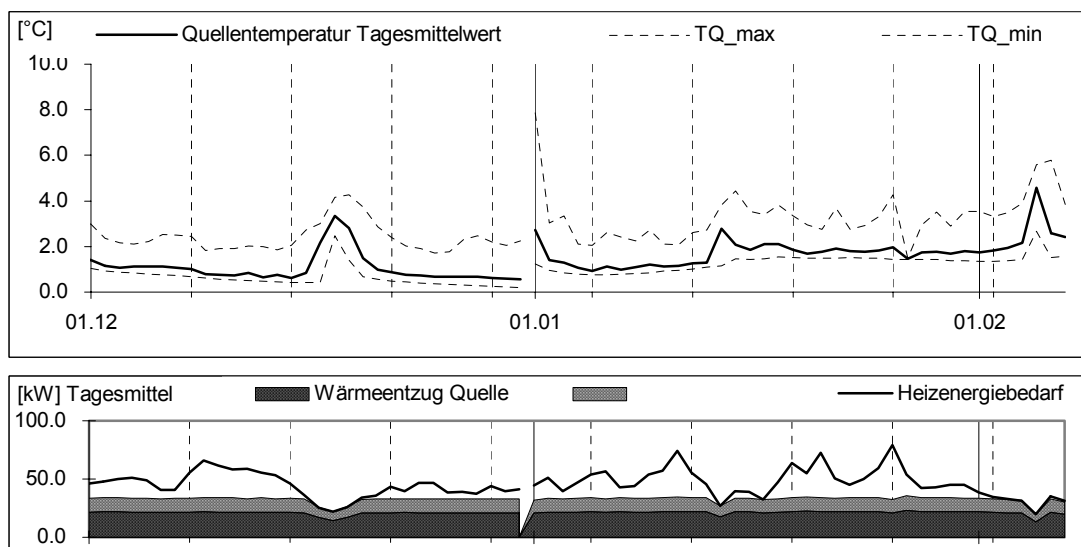


Bild 4: Einschwingverhalten der Sondentemperatur für eine Anlage mit niedrigem Deckungsgrad

Es ist deutlich zu sehen, dass die Temperaturen für die Anlage mit hohem Deckungsgrad (Bild 3) gut übereinstimmen. Demgegenüber entstehen bei der Anlage mit kleinerem Deckungsgrad (Bild 4) erwartungsgemäss grössere Abweichungen, da sich die starre Verteilung des Wärmeentzugs in der Vorsimulation schlechter mit der effektiven Verteilung deckt. Aber auch hier stellt sich bereits nach etwa 4 Tagen ein eingeschwungener Zustand der Sondentemperatur ein.

Es stellt sich hier natürlich die Frage, inwiefern nach zwei Jahren bereits von einem eingeschwungenen Zustand ausgegangen werden kann. Für eine Einzelsonde von 100 m Bohrtiefe wurde diese Frage von Eugster (1991) ausführlich untersucht. In dieser Untersuchung kommt Eugster zum Schluss, dass bereits nach einem Jahr das stationäre Temperaturniveau bis auf ca. 1°C erreicht ist. Die von Eugster durchgeführten Messungen wurden bei der Entwicklung des Erdwärmesondenmoduls EWS auch als Validierungsmessungen zugezogen (Huber, Schuler; 1997).

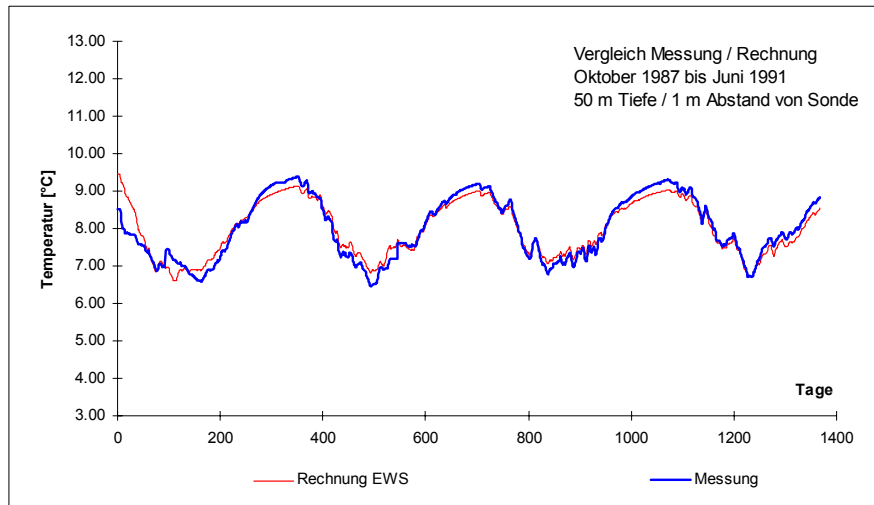


Bild 5: Vergleich Messung und Rechnung EWS an Erdsondenanlage in Elgg, Erde in 50m Tiefe nach (Huber, Schuler; 1997)

Etwas anders sieht die Situation bei mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden Erdwärmesonden aus. Auch in diesem Fall wird die Entzugsenergie in den ersten beiden Betriebsjahren zu einem grossen Teil vom Sondennahbereich entzogen, gleich wie bei der Einzelsonde. Da das Nachfliessen der Wärme durch die Nachbarsonden aber behindert wird, findet auch in den nachfolgenden Jahren eine weitere Temperaturabsenkung statt. Eine Methode mit Rechenbeispielen zur Abschätzung dieser zusätzlichen Temperaturabsenkung ist z.B. in (Huber, Pahud, 1999b) oder in (Good et al., 2001) zu finden. Diese analytische Methode basiert auf der Theorie der dimensionslosen Temperatursprungantworten von Eskilson (1987). Eskilson hat gezeigt, dass die Zeitkonstante zum Erreichen des stationären Zustandes abhängig ist vom Quadrat der Bohrtiefe und von der Temperaturleitfähigkeit der Erde. Typischerweise liegt die Zeitkonstante für 100 m tiefe Sonden bei ca. 20 Jahren, bei 200 m tiefen Sonden bei ca. 80 Jahren. Sondenabstand, Sondenbelastung, Anzahl der Erdwärmesonden und Sondenanordnung sind neben der Temperaturleitfähigkeit die wichtigsten Parameter, wie hoch diese langfristige, zusätzliche Temperaturabsenkung ist.

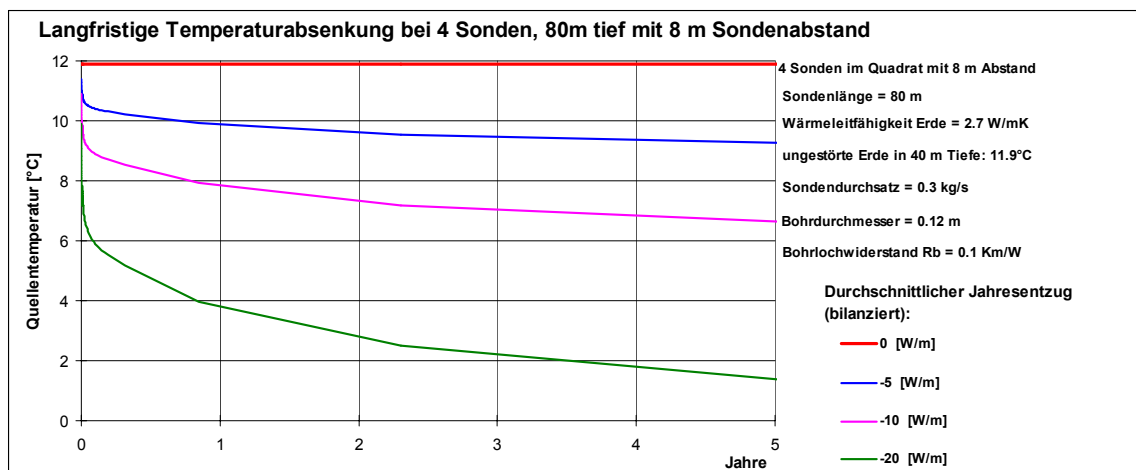


Bild 6: Langfristige Temperaturabsenkung am Beispiel von 4 sich gegenseitig beeinflussenden Erdwärmesonden, berechnet nach der in Huber et Pahud (1999) und Good et al. (2001) beschriebenen Methode. Die durchschnittlichen Entzugsleistung ist das zeitliche Mittel über die Laufzeit und die Stillstandszeit der Wärmepumpe!

Bild 6 zeigt, dass z.B. 4 Erdwärmesonden, die bei 1800 h/a Betriebszeit auf eine Entzugsleistung von 50 W/m ausgelegt sind (d.h. 10 W/m im Jahresschnitt) sich im 3. und 4. Betriebsjahr nur noch leicht abkühlen. Bei einer Sondenbelastung von 100 W/m (d.h. 20 W/m im Jahresschnitt) andererseits ist auch im 3. und 4. Betriebsjahr noch mit einer Abkühlung zu rechnen. Das Programm WPCalc eignet sich deshalb, die Quellentemperatur sinnvoll ausgelegter Erdwärmesonden zu berechnen, bei Grenz-

betrachtungen sollte aber andererseits das für Erdwärmesonden spezialisierte Programme EWS (Widmer, Huber, 2000) eingesetzt werden.

3.4 Genereller Verlauf übers Jahr

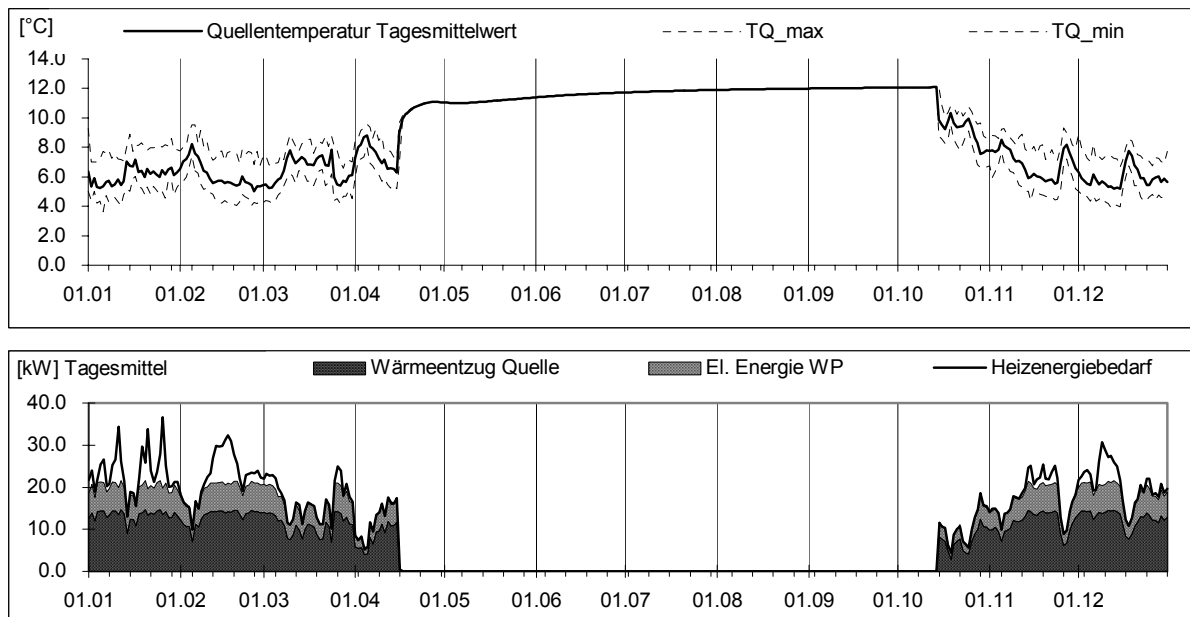


Bild 7: Jahresverlauf der Sondentemperatur für eine Anlage mit hohem Deckungsgrad

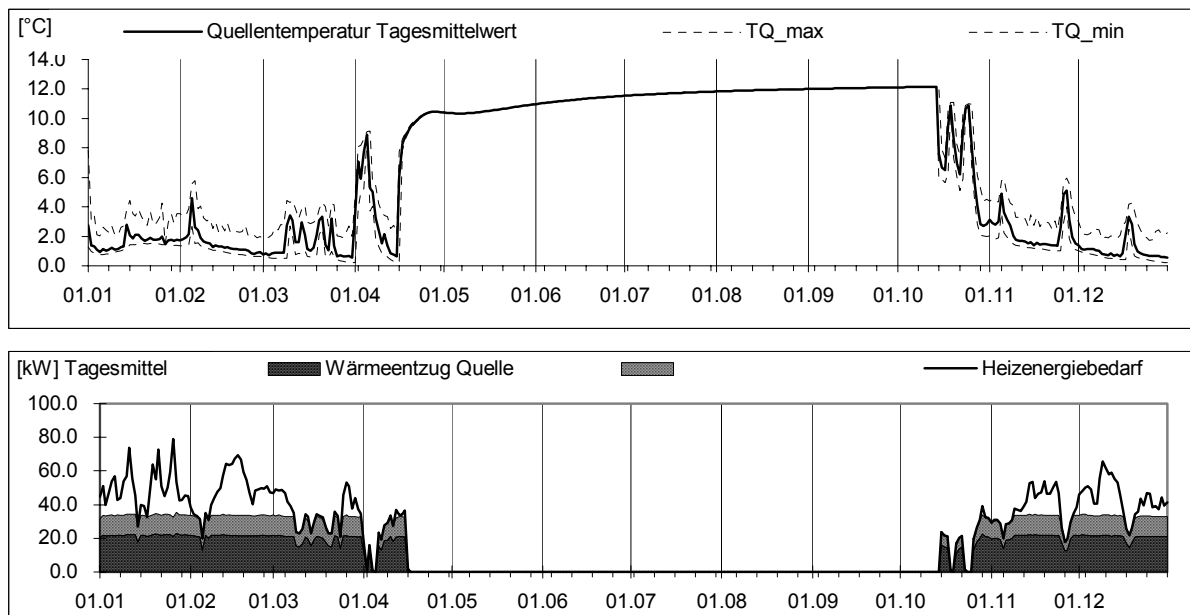


Bild 8: Jahresverlauf der Sondentemperatur für eine Anlage mit niedrigem Deckungsgrad

Der generelle Verlauf der Sondentemperatur übers ganze Jahr sieht für die beiden simulierten Anlagen plausibel aus (Bild 7, 8). Gut ist die Korrelation zwischen Wärmeentzug und Sondentemperatur zu sehen. Im Sommer „erholt“ sich die Sonde (identische Sondenparameter für beide Simulationen) erwartungsgemäss bei beiden Simulationen auf etwa dieselbe Temperatur.

3.5 Stündlicher Verlauf der Erdwärmesondentemperatur

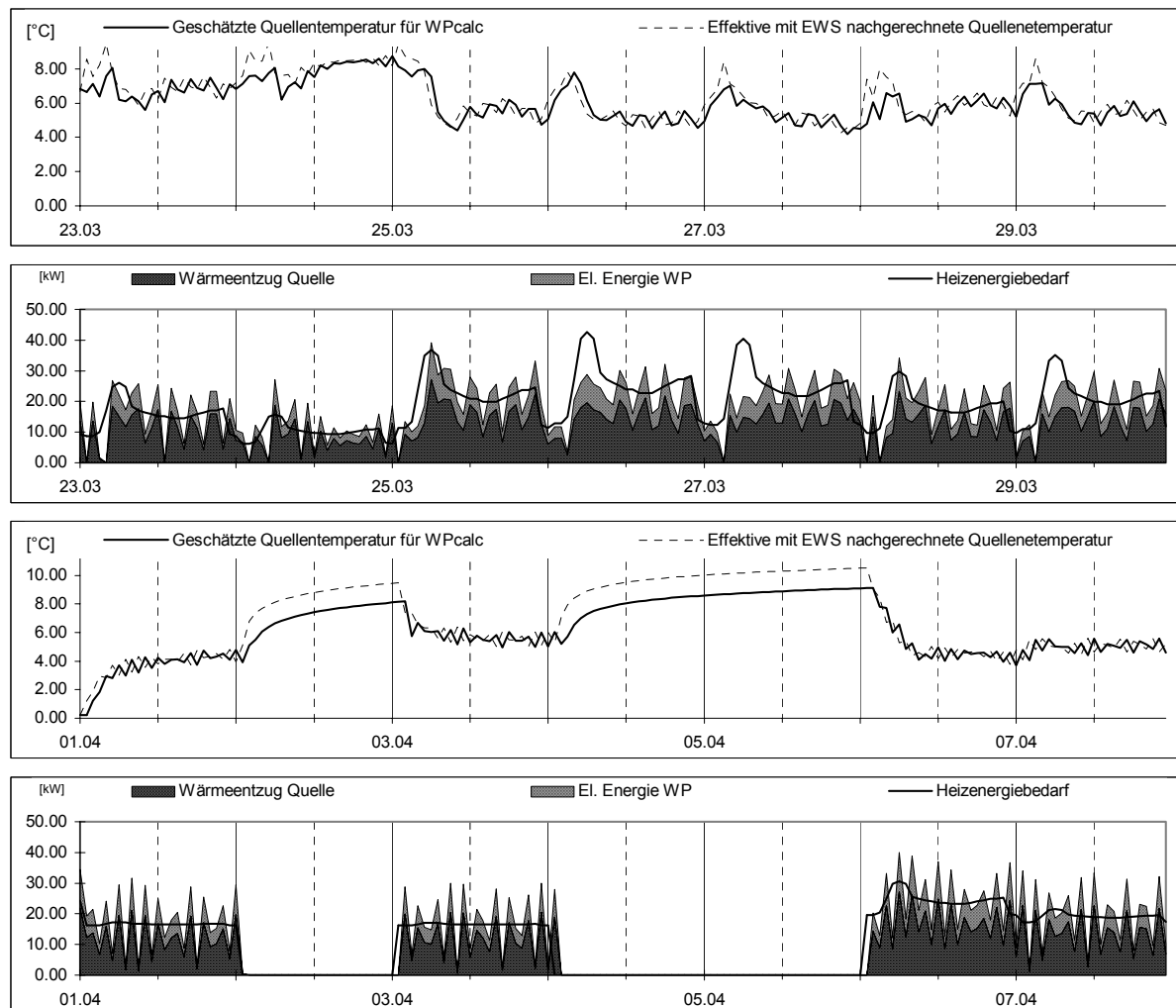


Bild 9: Stündlicher Verlauf der geschätzten Erdwärmesondentemperatur im Vergleich effektiven mit EWS nachgerechneten Erdwärmesondentemperatur

Der stündliche Verlauf der Erdsondentemperatur sieht realistisch aus (siehe Bild 7). Gut zu sehen ist, wie während der Nachtabsenkung oder Zeiten ohne Wärmebezug die Temperatur ansteigt. Wird wieder Leistung bezogen, sinkt die Temperatur gemäss einer e-Funktion wieder ab.

3.6 Vergleich mit separater EWS Simulation

Während den Zeiten in denen die WP in Betrieb ist, stimmen Schätzwert gemäss Anhang A1.3 und effektiv mit EWS nachgerechneter Wert recht gut überein. Abweichungen während Zeiten in denen die WP nicht in Betrieb ist, haben auf die Resultate der Simulation keinen Einfluss

Für die beiden simulierten Anlagen (Eingabeparameter siehe Anhang A 2) wurde für das ganze Jahr die Abweichung gewichtet mit der jeweiligen WP-Betriebszeit aufsummiert. Aus dieser Summe wurde dann, auf die Jahresbetriebsstunden bezogen, eine mittlere Abweichung zur Referenztemperatur ermittelt.

Im Vergleich dazu wurde noch die Abweichung gerechnet, wenn anstelle des Schätzwertes, die effektive Sondentemperatur der vorhergehenden Stunde als Quelltemperatur für die Simulation der aktuellen Stunde genommen würde (Trivialeinbindung von EWS).

Die Berechnungen haben folgendes ergeben:

Simulierte Anlage	Abweichung Schätzwert	Abweichung Trivialeinbindung
Anlage mit hohem Deckungsgrad	0.04 K	0.35 K
Anlage mit niedrigem Deckungsgrad	0.07 K	0.09 K

Die Resultate zeigen, dass im Mittel die Sondentemperatur gut mit der Referenz übereinstimmt. Ebenfalls bringt die Einbindungsmethode mit dem Schätzwert eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit gegenüber der Trivialeinbindung (insbesondere bei der Anlage mit hohem Deckungsgrad). Zwar können kurzzeitig grössere Abweichungen (in den untersuchten Fällen maximal +/- 1 bis 2 K) entstehen. Da sie aber in beide Richtungen stattfinden, kompensieren sie sich zu einem grossen Teil.

3.7 Fazit

Die gewählte Methode zur Einbindung von EWS in WPcalc weist im Mittel eine hohe Genauigkeit auf. Eine Verbesserung der Einbindung ist nicht notwendig, da gewisse Ausgangsparameter für die Sonden-simulation, wie z.B. die Leitfähigkeit des Gesteins in der Regel wesentlich ungenauer sind und somit eine höhere Abweichung der Sondentemperatur ergeben würden.

4. Erkenntnisse aus den durchgeführten Arbeiten

4.1 Beurteilung der Einbindung in WPcalc

Da an WPcalc nur jeweils einmal pro Stunde eine neue Sondentemperatur übergeben werden kann, mussten bei der Einbindung von EWS gewisse Vereinfachungen gemacht werden. Das heisst, es kann nicht die volle mit EWS mögliche Genauigkeit erreicht werden.

Nach jeder Stunde wird anhand der Effektiven WP-Daten jeweils die genaue Sondenbilanz erstellt. Dadurch ist die Simulation mit dem eingebundenen EWS trotzdem genügend genau für die Zwecke von WPcalc.

Der Vorteil der relativ simplen Einbindung liegt darin, dass auch mit EWS noch vernünftige Simulationszeiten erreicht werden und das Programm stabil läuft.

4.2 Möglichkeiten einer Verbesserung der Genauigkeit

Eine Einbindung, die die mögliche Genauigkeit von EWS besser nutzt ist denkbar, führt jedoch zu längeren Simulationszeiten und grösseren Eingriffen in die Struktur von WPcalc. Folgende Verbesserungen wären denkbar:

- Vorsimulation mit effektiven Betriebsdaten aus WPcalc (Besserer Anfangszustand der Sonde)
- Iteration zwischen EWS und WPcalc in jedem Stundenschritt (Ermittlung der Sondentemperatur anhand von effektiven WP-Daten, anstelle der Abschätzung aufgrund der Sprungantwort)

4.3 Erkenntnisse für zukünftige Programmentwicklungen

Wie die hier beschriebenen Arbeiten gezeigt haben, ist es nicht ganz einfach zwei unterschiedliche Simulationsprogramme miteinander zu verbinden. Dies vor allem, wenn die verwendeten Zeitschritte nicht zueinander kompatibel sind.

Eine mögliche Lösung dieses Problems ist die Entwicklung eines zukünftigen WPcalc's in einer Simulationsumgebung wie Simulink.

Gerade bei EWS muss jedoch beachtet werden, dass dieses extrem zeitoptimiert wurde. Hierfür wurde eine Kombination aus numerischer Simulation (bis ca. 2m um die Sonde) und einer analytischen Responsefaktor-Methode (äussere Umgebung der Sonde) gewählt. Würde EWS in Simulink programmiert, hätte dies vermutlich deutlich längere Rechenzeiten zur Folge. Es müsste deshalb noch abgeklärt werden, wie eine EWS Simulation z.B. in Simulink zeitoptimiert werden könnte.

Auf jeden Fall ist es sinnvoll, EWS in irgend einer Form in ein zukünftiges WPcalc von Anfang an zu integrieren. Die Resultate die EWS liefert, sind überzeugend und geben auch das kurzzeitige Verhalten der Sonde realistisch wieder.

5. Literaturverzeichnis

- Afjei, Th.; Bühring, A.; Dürig, M.; Huber, A.; Keller, P.; Shafai, E.; Widmer, P.; Zweifel, G. (2000):** Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser. Technisches Handbuch: Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 98161187
- Good, J.; Huber, A.; Widmer, P.; Nussbaumer, Th.; Trüssel, D.; Schmid, Ch. (2001):** Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden. Handbuch zum Planungsvorgehen. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Eskilson, P. (1987):** Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. ISBN 91-7900-298-6
- Eugster, W. (1991):** Erdwärmesonden - Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. Diss. ETH Nr. 9524
- Huber, A.; Schuler, O. (1997):** Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1
- Huber, A.; Pahud, D. (1999):** Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/2
- Huber, A.; Pahud, D. (1999b):** Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie? Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Huber, A. (1999):** Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9934023/1

Anhang

A1 Das Erdwärmesondenmodul EWSMOD und dessen Einbindung

Das Erdwärmesonden-Modul EWSMOD wurde 1997 im Rahmen eines BFE-Forschungsprojektes entwickelt [Huber, Schuler, 1997] und mit einer Programmerweiterung 1999 für Mehrsondenanlagen erweitert [Huber, Pahud, 1997]. Im Rahmen dieser Forschungsprojekte wurde das Modell durch Vergleiche mit Messungen und mit wissenschaftlichen Simulationsprogrammen validiert und in verschiedenen weiteren Forschungsprojekten auch eingesetzt [Huber, 1999], [Afjei et al., 2001], [Good et al., 2001].

Das mathematische Modell ist eine Mischung aus einem numerischen Simulationsverfahren im Sondennahbereich (Crank-Nicholson-Verfahren) und einer analytischen Response-Faktor-Methode für die entfernteren Erdschichten. Diese Mischung erlaubt eine sehr kurze Rechenzeit (eine Grundvoraussetzung für den Einsatz im Programm WPcalc) bei gleichzeitig sehr guter Rechengenauigkeit. Die Response-Faktor-Methode wurde an der Universität in Lund entwickelt [Eskilson, 1987] und erlaubt es auch, die 3-dimensionale Wärmeleitung im Erdreich und die gegenseitige Beeinflussung mehrerer paralleler Erdwärmesonden mit zu berücksichtigen. Selbst die langfristige Temperaturabsenkung über mehrere Jahre ist damit berechenbar. Der Quellcode des EWS-Moduls ist in den oben erwähnten Forschungsberichten publiziert.

A1.1 Anpassungen am Sondenmodul EWSMOD

Für den Einsatz im Programm WPcalc mussten einige Programm-Anpassungen vorgenommen werden. Nachfolgend sind diese Anpassung beschrieben. Dabei sei betont, dass auch in der neuen Form des EWS-Moduls nach wie vor alle früheren Optionen des Programms vorhanden sind, dass aber nicht alle Optionen aktiviert sind, damit das Programm WPcalc einfach bedienbar bleibt:

Es werden nur Doppel-U-Sonden berechnet

Es wird immer das 2. Betriebsjahr berechnet (d.h. 1 Jahr vorgängiges Einschwingen)

Die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung wird fest auf $\lambda_{\text{Füll}} = 0.81 \text{ W/mK}$ gesetzt

Es wird immer quasi-stationär gerechnet

Es wird intern in vertikaler Richtung nur mit einer Erdschicht mit einer gemittelten Wärmeleitfähigkeit der Erde gerechnet.

Der Temperaturgradient im Erdreich wird fest auf 3 °C Temperaturzunahme pro 100m Tiefe gesetzt. Externer Simulationszeitschritt ist immer 1 Stunde.

A1.2 Aufruf des Sondenmoduls EWSMOD im Hauptprogramm

Initialisierung der Erdwärmesonde

Der Aufruf zur Initialisierung der Erdwärmesonde sieht generell wie folgt aus:

```
(* Setzen der Defaultwerte, gehört zur Initialisierung, notwendige Eingabe *)
Erdsonde(default);

(* Sondenkenngrößen, generelle Eingaben, *)
Beschreibung      := 'Programm EWS, Ver 2.0 für WPcalc';
AnzahlSonden      := 1;                               (* Anzahl Sonden *)
Sondenlaenge      := 100;                             (* m, Bohrtiefe einer Sonde *)
Sondendurchmesser := 0.026;                             (* m, Innendurchmesser der Sondenroh-
re*)
Bohrdurchmesser   := 0.115;                             (* m, Durchmesser der Bohrung *)
TGrad            := 0.03;                               (* K/m, Temperaturgradient axial *)
Jahresmitteltemp := 9.0;                               (* °C, Mittel Lufttemperatur *)
Bodenerwaermung  := 0.8;                               (* °C, Boden wärmer als Luft *)
gfunction         := true;                             (* Randbedingung mit g-functions *)
g1               := 4.82;                               (* g-function bei ln(t/ts) = -4 *)
g2               := 5.69;                               (* g-function bei ln(t/ts) = -2 *)
g3               := 6.29;                               (* g-function bei ln(t/ts) = 0 *)
```

```

g4          := 6.57;          (* g-function bei ln(t/ts) = +2
*)
g5          := 6.60;          (* g-function bei ln(t/ts) = +3
*)
g_Sondenabstand := 10;        (* m, Sondenabstand der g-function
*)
Sondenabstand  := 10;        (* m, eff. Abstand der Sonden, wenn
                               möglich gleich wählen wie
                               g_Sondenabstand
*)
cpSole        := 3875;        (* J/kgK; Wasser: 4200 J/kgK
*)
rhoSole       := 1050;        (* kg/m3; Dichte der Sole
*)
lambdaSole    := 0.449;      (* W/mK; Waermeleitfaehigkeit Sole
*)
nueSole       := 0.00000415;  (* m2/s; Wasser: 0.00000175 m2/s
*)
(*
                               (* 33%Ethylenglykol:ca0.000006 m2/s
*)
DimAxi        := 1;          (* Anzahl gleich-dicker Schichten
*)
cpErde[1]     := 1000;        (* J/kgK, cp 1. Schicht
*)
rhoErde[1]    := 2500;        (* kg/m3, Dichte, 1. Schicht
*)
lambdaErde[1] := 2.4;         (* W/mK, Waermeleitfaeh. 1. Schicht
*)
Auslegungsmassenstrom := 0.40; (* kg/s, Sondendurchsatz, alle Son-
den*)

```

Um vernünftige Start-Temperaturen im Erdreich zu erhalten (und somit die Simulation für das 2. Betriebsjahr zu initialisieren), wird die Erdwärme-Sonde mit einem künstlichen Lastprofil 1 Jahr lang simuliert. Der Aufruf zu dieser Initialisierung sieht wie folgt aus:

```

(* Initialisierung für WPcalc Anwendung, notwendige Eingaben *)
readfile      := false;
Leistung      := true;       (* Rechnen mit Entzugsleistung
*)
Lastprofil    := true;       (* Notwendig, für WPcalc true setzen
*)
WPcalc        := true;
Warmwasser    := true;       (* Lastprofil mit oder ohne Warmwasser
*)
Jahreslaufzeit := 2400;      (* h, geschätzte Laufzeit der Sonde pro Jahre
*)
AuslegungsEntzug := 5.0;     (* kW, durchschnittliche Entzugsleistung der
WP*)
JahreEinschwingen := 1;      (* Anzahl Jahre Einschwingen vor Berechnung
*)

Erdsonde(initial);          (* Initialisierung der Berechnung. Notwendig
*)

Jahr          := 1;
LastYear      := 1;
simstep       := 0;

```

Dadurch wird die Entzugsleistung und die Jahres-Betriebszeit (= Jahreslaufzeit [h/a]) vorgegeben. Im obigen Programmaufruf sind dies 5 kW Entzugsleistung an 2400 Stunden pro Jahr (inklusive Warmwasser-produktion). Aus diesen Angaben wird die monatliche Entzugsleistung gemäss der folgenden Tabelle berechnet:

	Entzugsprofil mit Warmwasser (Warmwasser := true)	Entzugsprofil ohne Warmwasser (Warmwasser := false)
Januar	15.4 %	18.5 %
Februar	12.9 %	15 %
März	12.4 %	14 %
April	9.2 %	9.5 %
Mai	3.6 %	1.5 %
Juni	2.6 %	0%
Juli	2.6 %	0%
August	2.6 %	0 %
September	2.6 %	0 %
Oktober	9.6 %	10 %
November	12.2 %	14 %
Dezember	14.3 %	17.5 %

Ausgehend von der monatlichen Betriebszeit wird die durchschnittliche tägliche Sondenlaufzeit errechnet und die Sonde damit ein Jahr lang betrieben.

Simulation der Erdwärmesonde

Der stündliche Aufruf des EWS-Moduls sieht dann wie folgt aus:

```
(* Berechnung des Erdreiches mit der effektiven, durchschnittlichen Entzugsleistung
der letzten Stunde, für alle Sonden, in kWh/h. Notwendiger Aufruf 1 x pro
Stunde*)

if Jahr=lastyear then Einschwingen:=false else Einschwingen:=true;
Massenstrom := 0.4; (* Durchsatz aller Sonden, bei Stillstand Massenstrom :=
0 *)
QSource      := 5.0; (* stündliche Entzugsenergie in kWh/h aller Sonden
*)
Erdsonde(iteration);
simstep := simstep +1;
```

Mit dem obigen Simulationsschritt wird das Erdreich aufgrund der effektiven, durchschnittlichen Entzugsleistung `QSource` der letzten Stunde neu berechnet. Mit dem folgenden Aufruf, der beliebig oft wiederholt werden kann, wird für die laufende Stunde eine Quellentemperatur `TSourceSchaetzung` geschätzt. Als Eingabeparameter sind dazu die geschätzte Entzugsleistung `QSourceSchaetzung` während der Betriebszeit der Sonde und die Betriebszeit in Minuten pro Stunde notwendig:

```
(* Schätzung der Rücklauftemperatur. Mehrfachaufruf möglich. Nicht zwingend nötig: *)
Massenstrom := 0.4; (* Durchsatz aller Sonden, bei Stillstand Massenstrom :=
0 *)
QSourceSchaetzung := 5.0; (* geschätzte Entzugsleistung aller Sonden in kW
*)
Betriebszeit := 60; (* geschätzte Laufzeit der Sonde in Min/h
*)
Erdsonde(Schaetzung);
```

Der obige Schätzaufruf der Sonde kann beliebig oft wiederholt werden und es ist somit auch möglich, diesen Aufruf in einer Iterations-Schleife des Wärmepumpen-Moduls einzubauen. Als Resultat der Schätzung wird die Quellentemperatur der Sonde berechnet und in die Variable `TSourceSchaetzung` geschrieben.

A1.3 Schätzung der Quellentemperatur

Im Abschnitt 0 wurde beschrieben, wie das EWS-Modul aufgerufen werden muss. Nachfolgend soll kurz dargestellt werden, wie das EWS-Modul intern die Schätzung der Quellentemperatur berechnet.

Bei der Initialisierung der Erdwärmesonde wird, wie in 0 beschrieben, ein Entzugsprofil berechnet und 1 Jahr lang das Erdreich damit berechnet. Von diesem Entzugsprofil wird am 26. – 28. Februar wie folgt abgewichen:

- 26. Februar: Erdwärmesonde den ganzen Tag ausgeschaltet
- 27. – 28. Februar: Erdwärmesonde im Dauerbetrieb

Am 27. und 28. Februar wird also die Quelltemperaturabsenkung nach einer Ruhepause von 1 Tag aufgezeichnet und in der Variablen `dTSource[i]` wie folgt abgespeichert:

```
if (simstep>1367) and (simstep<1417) then begin
  if simstep=1368 then dTSource[0]:=TSource else
    dTSource[simstep-1368]:=TSource;
end;
for ii:=0 to 48 do dTHelp[ii]:=dTSource[ii];
for ii:=1 to 48 do dTSource[ii]:=dTHelp[ii]-dTHelp[ii-1];
```

Während der eigentlichen Simulation wird dann berechnet, wie lange der Erdwärmesonde seit dem letzten Betriebsunterbruch von mindestens einer Stunde bereits Wärme entzogen wird. In der Variablen `nAnlauf` werden die Betriebsunterbrüche von mindestens einer Stunde Dauer gezählt und in der Matrix `Anlauf` die Jahresstunde des Anlaufs gespeichert:

```
if (QSonde[Simstep-1]=0) and (QSonde[Simstep]>0)
  and ((not einschwingen) or Allsteps) then begin
  nAnlauf := nAnlauf + 1;
  Anlauf[nAnlauf]:=Simstep;
end;
```

Beim Schätzungsaufruf `Erdsonde(Schaetzung)` wird dann in den nachfolgenden Zeilen die eigentliche Quelltemperatur `TSourceSchaetzung` berechnet. Es wird für die Schätzung also angenommen, dass bei gleicher Sondenbelastung auch immer das gleiche Temperatur-Absenkprofil verwendet werden kann.

```
if iteration=-7 then begin (* Schaetzen der Quelltemperatur *)
  if not Einschwingen then begin
    if (Betriebszeit > 0) and (QSonde[Simstep-1]=0) then begin
      TSourceSchaetzung := TSource + dTSource[1]*Betriebszeit/60
        *QSourceSchaetzung/AuslegungsEntzug;
    end;
    if (Betriebszeit > 0) and (QSonde[Simstep-1]<>0) then begin
      if (Simstep-Anlauf[nAnlauf]+1)<49 then
        dTemp := dTSource[Simstep-Anlauf[nAnlauf]+1] else
      dTemp:=dTSource[48];
      TSourceSchaetzung := TSource + dTemp*Betriebszeit/60
        *QSourceSchaetzung/AuslegungsEntzug;
    end;
  end else TSourceSchaetzung := TSource;
end;
```

A2 Inputvariablen der für die Validierung verwendeten Anlagen

Anlage mit niedrigem Deckungsgrad

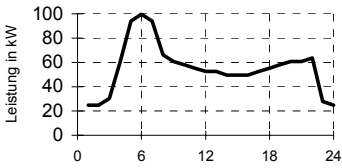
2. Gebäudedaten

2.0 Übersicht Energiebedarfsdaten

		MWh/a	MJ/m² a
Heizenergie	aussentemperaturabhängig	105.5	135.6
	Bandlast	66.5	85.5
	Total	172.0	221.1
Wassererwärmung		0.0	0.0
Prozesswärme		0.0	0.0
Total Wärmebedarf		172.0	221.1

2.1 Heizenergie

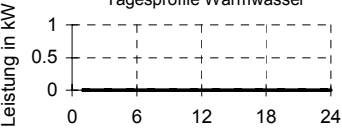
Geb.typ	Tagesprofil	Mehrfamilienhaus Neubau
Auslegetemperatur	-10 °C	
Wärmeleistungsbedarf	85.0 kW	
Heizenergiebed. (o Bandl.)	379 699 MJ/Jahr	
Energiebezugsfläche	2 800 m²	
Raumtemperatur	20 °C	
Raumtemperatur red.	18 °C	
Absenkung pro Tag	1 °C	
Heizgrenze	10 °C	
Bandlast Heizung	15.8 kW	



Mittelwert Normalbetr. (o. Bandl.) 55.3 kW

2.2 Warmwasser

Bedarf Normalbetrieb	0 Liter/Tag
Bedarf red. Betrieb	0 Liter/Tag
Boilerinhalt	0 Liter
Temp. Warmwasser	50 °C
Temp. Kaltwasser	12 °C
Zirkul. verl. Normalb.	0.0 kW
Zirkul. ver. red. Betr.	0.0 kW
Speicherverluste	0.0 kW
Ladeleistung W. Tauscher	60.0 kW

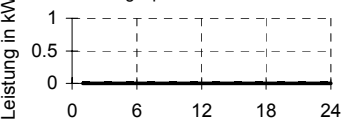


Mittelwert Normalbetrieb 0.0 kW

Mittelwert Red. Betrieb 0.0 kW

2.3 Prozesswärme

Mittelwert Normalbetr.	0.0 kW
Mittelwert Red. Betr.	0.0 kW



Anlage mit hohem Deckungsgrad

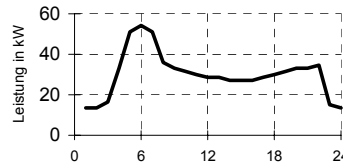
2. Gebäudedaten

2.0 Übersicht Energiebedarfsdaten

		MWh/a	MJ/m² a
Heizenergie	aussentemperaturabhängig	69.4	89.3
	Bandlast	13.2	16.9
	Total	82.6	106.2
Wassererwärmung		0.0	0.0
Prozesswärme		0.0	0.0
Total Wärmebedarf		82.6	106.2

2.1 Heizenergie

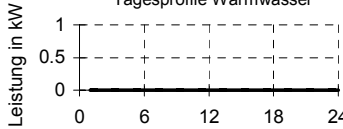
Geb.typ	Tagesprofil	Mehrfamilienhaus Neubau
Auslegetemperatur	-10 °C	
Wärmeleistungsbedarf	40.0 kW	
Heizenergiebed. (o Bandl.)	250 000 MJ/Jahr	
Energiebezugsfläche	2 800 m²	
Raumtemperatur	20 °C	
Raumtemperatur red.	18 °C	
Absenkung pro Tag	1 °C	
Heizgrenze	14 °C	
Bandlast Heizung	3.0 kW	



Mittelwert Normalbetr. (o. Bandl.) 30.1 kW

2.2 Warmwasser

Bedarf Normalbetrieb	0 Liter/Tag
Bedarf red. Betrieb	0 Liter/Tag
Boilerinhalt	0 Liter
Temp. Warmwasser	50 °C
Temp. Kaltwasser	12 °C
Zirkul. verl. Normalb.	0.0 kW
Zirkul. ver. red. Betr.	0.0 kW
Speicherverluste	0.0 kW
Ladeleistung W. Tauscher	60.0 kW

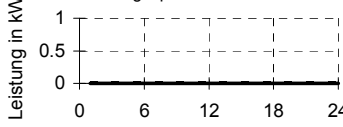


Mittelwert Normalbetrieb 0.0 kW

Mittelwert Red. Betrieb 0.0 kW

2.3 Prozesswärme

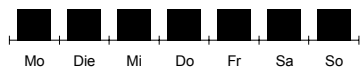
Mittelwert Normalbetr.	0.0 kW
Mittelwert Red. Betr.	0.0 kW



2.5 Systemtemperaturen

Fusspunkt bei 20°C	25 °C	Heizgr. No.	Leistung kW	Vorlauf °C	Rücklauf °C
Heizung:		1	10.0	55.0	45.0
		2	30.0	45.0	35.0
		3	25.0	55.0	40.0
		4	20.0	45.0	35.0
Prozesswärme			0.0	45.0	40.0
Warmwasser			60.0	55.0	45.0

2.6 Gebäudenutzung und Heizperiode

Heizperiode = 182 Tage		Gebäudenutzung Wochenzyklus Normalbetrieb										
Beginn	15.Okt											
Ende	15.Apr											
Gebäudenutzung Jahreszyklus Normalbetrieb												
												
1	31	61	91	121	151	181	211	241	271	301	331	361

2.7 Klimadaten

Stationsname	Zürich SMA		
Klimaregion Gebäude	16	Korrektur Bauw.	-1 °C
Lokale Lage Gebäude	Allgem. Lage	Stat. Korrektur	0 °C
Lokale Höhe Gebäude	700 m.ü.M.		

2.5 Systemtemperaturen

Fusspunkt bei 20°C	25 °C	Heizgr. No.	Leistung kW	Vorlauf °C	Rücklauf °C
Heizung:		1	8.0	55.0	45.0
		2	12.0	45.0	35.0
		3	10.0	55.0	40.0
		4	10.0	45.0	35.0
Prozesswärme			0.0	45.0	40.0
Warmwasser			60.0	55.0	45.0

2.6 Gebäudenutzung und Heizperiode

Heizperiode = 182 Tage		Gebäudenutzung Wochenzyklus Normalbetrieb										
Beginn	15.Okt											
Ende	15.Apr	Mo Die Mi Do Fr Sa So										
Gebäudenutzung Jahreszyklus Normalbetrieb												
												
1	31	61	91	121	151	181	211	241	271	301	331	361

2.7 Klimadaten

Stationsname	Zürich SMA		
Klimaregion Gebäude	16	Korrektur Bauw.	-1 °C
Lokale Lage Gebäude	Allgem. Lage	Stat. Korrektur	0 °C
Lokale Höhe Gebäude	700 m.ü.M.		

3. Tarifstruktur

WP-CALC Inputverifikation Seite 3

Elektrotarifierung Tagesstruktur						
Zeit	Tarifzeiten			Sperrzeiten		
	Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3	Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3
1	N	N	N	frei	frei	frei
2	N	N	N	frei	frei	frei
3	N	N	N	frei	frei	frei
4	N	N	N	frei	frei	frei
5	N	N	N	frei	frei	frei
6	H	H	N	frei	frei	frei
7	H	H	N	frei	frei	frei
8	H	H	N	frei	frei	frei
9	H	H	N	frei	frei	frei
10	H	H	N	frei	frei	frei
11	H	H	N	gesperrt	frei	frei
12	H	H	N	gesperrt	frei	frei
13	H	N	N	frei	frei	frei
14	H	N	N	frei	frei	frei
15	H	N	N	frei	frei	frei
16	H	N	N	frei	frei	frei
17	H	N	N	frei	frei	frei
18	H	N	N	gesperrt	frei	frei
19	H	N	N	frei	frei	frei
20	H	N	N	frei	frei	frei
21	H	N	N	frei	frei	frei
22	H	N	N	frei	frei	frei
23	N	N	N	frei	frei	frei
24	N	N	N	frei	frei	frei

[N] Niedertarif [H] Hochtarif [S] Spitzentarif [L] Leistungstarif

Elektrotarifierung Wochenstruktur			Tarifizierung Jahresstruktur		
Tag	Tagestyp		Monat	Elektrotarifierung	Gastarififizierung
	Tarife	Sperrzeiten			
Montag	1	2	Januar	Wintertarif	Wintertarif
Dienstag	1	2	Februar	Wintertarif	Wintertarif
Mittwoch	1	2	März	Wintertarif	Wintertarif
Donnerstag	1	2	April	Wintertarif	Wintertarif
Freitag	1	2	Mai	Sommertarif	Sommertarif
Samstag	2	2	Juni	Sommertarif	Sommertarif
Sonntag	3	2	Juli	Sommertarif	Sommertarif
			August	Sommertarif	Sommertarif
			September	Sommertarif	Sommertarif
			Oktober	Wintertarif	Wintertarif
			November	Wintertarif	Wintertarif
			Dezember	Wintertarif	Wintertarif

3. Tarifstruktur

WP-CALC Inputverifikation Seite 3

Elektrotarifierung Tagesstruktur						
Zeit	Tarifzeiten			Sperrzeiten		
	Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3	Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3
1	N	N	N	frei	frei	frei
2	N	N	N	frei	frei	frei
3	N	N	N	frei	frei	frei
4	N	N	N	frei	frei	frei
5	N	N	N	frei	frei	frei
6	H	H	N	frei	frei	frei
7	H	H	N	frei	frei	frei
8	H	H	N	frei	frei	frei
9	H	H	N	frei	frei	frei
10	H	H	N	frei	frei	frei
11	H	H	N	gesperrt	frei	frei
12	H	H	N	gesperrt	frei	frei
13	H	N	N	frei	frei	frei
14	H	N	N	frei	frei	frei
15	H	N	N	frei	frei	frei
16	H	N	N	frei	frei	frei
17	H	N	N	frei	frei	frei
18	H	N	N	gesperrt	frei	frei
19	H	N	N	frei	frei	frei
20	H	N	N	frei	frei	frei
21	H	N	N	frei	frei	frei
22	H	N	N	frei	frei	frei
23	N	N	N	frei	frei	frei
24	N	N	N	frei	frei	frei

[N] Niedertarif [H] Hochtarif [S] Spitzentarif [L] Leistungstarif

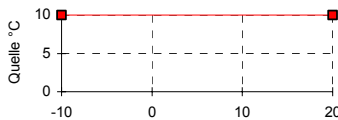
Elektrotarifierung Wochenstruktur			Tarifizierung Jahresstruktur		
Tag	Tagestyp		Monat	Elektrotarifierung	Gastarififizierung
	Tarife	Sperrzeiten			
Montag	1	2	Januar	Wintertarif	Wintertarif
Dienstag	1	2	Februar	Wintertarif	Wintertarif
Mittwoch	1	2	März	Wintertarif	Wintertarif
Donnerstag	1	2	April	Wintertarif	Wintertarif
Freitag	1	2	Mai	Sommertarif	Sommertarif
Samstag	2	2	Juni	Sommertarif	Sommertarif
Sonntag	3	2	Juli	Sommertarif	Sommertarif
			August	Sommertarif	Sommertarif
			September	Sommertarif	Sommertarif
			Oktober	Wintertarif	Wintertarif
			November	Wintertarif	Wintertarif
			Dezember	Wintertarif	Wintertarif

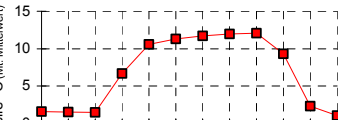
4. Anlagedaten

WP-CALC Inputverifikation Seite 4

4.1 Wärmepumpe

Wärmepumpenbezeichnung			WP-Beispiel (30SQ 11)		
Aktuelles Quellenmedium:			Erdwärmesonde mit EWS simuliert		
Vorlauftemperatur (°C):	35	50	35	50	Heizleistung bei
Quellentemperatur (°C):	Heizleistung in kW		Leistungsaufnahme in kW		Abtauung in %
10	44.9	42.5	10.5	13.3	100
12	46.0	44.0	10.6	13.3	100
16	49.2	47.3	10.8	13.4	100
18	50.7	48.7	10.8	13.5	100
20	52.3	50.3	11.0	13.5	100

Leistungsaufnahme Hilfsantriebe:		Quellenmedium aussentemperaturabhängig	
Carter-Heizung	0.06 kW		
Steuerung	0.1 kW		
Pumpe/Gebälse	0.77 kW		
Obere Einsatzgrenze	52 °C	Aussentemperatur °C	

Betriebsweise	Bivalent parallel	Quellentemperatur Jahresgang	
Untere Einsatzgrenze	-20 °C		
Kondensatordurchfluss	4.5 m3/h		
Erdsonde:	Simuliert mit EWS		
Sondenlänge (insges.)	540 m		
Lambda Erde	2.6 W/mK		

4.2 Spitzenkessel

Kesseltyp	HOVAL UnoLyt	
Brennertyp	Oertli Low NOx	
Betriebsart	Oel	
Eingest. Nutzleistung	42 kW	
Feuerungswirkungsgrad	93 %	
Kesseltemperatur	70 °C	
Bereitschaftsverluste	0.39 kW	
		Leistungsaufnahme Gebläse 0.29 kW
		Leistungsaufnahme Pumpe 0.1 kW

Parameter für Simulation mit EWS

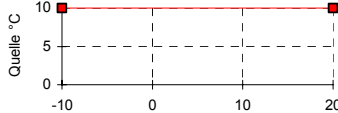
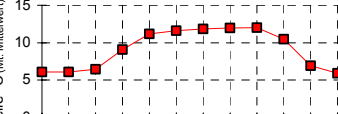
Bohrtiefe:	270 m	gesamte Sondenlänge:	540 m
Anordnung:	2 Sonden (Abstand=13.5m)		
Sondentyp:	Doppel-U 25 mm		
Wärmeträger:	Monopropylenglykol 33%	Temperaturdifferenz:	3 K
Gestein:			
Schicht1:	Erde, tonig, lambda = 1.5 W/mK		10 m
Schicht2:	Schlamm-Siltstein lambda=2.6 W/mK		260 m

4. Anlagedaten

WP-CALC Inputverifikation Seite 4

4.1 Wärmepumpe

Wärmepumpenbezeichnung			WP-Beispiel (30SQ 11)		
Aktuelles Quellenmedium:			Erdwärmesonde mit EWS simuliert		
Vorlauftemperatur (°C):	35	50	35	50	Heizleistung bei
Quellentemperatur (°C):	Heizleistung in kW		Leistungsaufnahme in kW		Abtauung in %
10	44.9	42.5	10.5	13.3	100
12	46.0	44.0	10.6	13.3	100
16	49.2	47.3	10.8	13.4	100
18	50.7	48.7	10.8	13.5	100
20	52.3	50.3	11.0	13.5	100

Leistungsaufnahme Hilfsantriebe:		Quellenmedium aussentemperaturabhängig	
Carter-Heizung	0.06 kW		
Steuerung	0.1 kW		
Pumpe/Gebälse	0.77 kW		
Obere Einsatzgrenze	52 °C	Aussentemperatur °C	
Betriebsweise	Bivalent parallel	Quellentemperatur Jahresgang	
Untere Einsatzgrenze	-20 °C		
Kondensatordurchfluss	4.5 m3/h		
Erdsonde:	Simuliert mit EWS		
Sondenlänge (insges.)	540 m		
Lambda Erde	2.6 W/mK		

4.2 Spitzenkessel

Kesseltyp	HOVAL UnoLyt	
Brennertyp	Oertli Low NOx	
Betriebsart	Oel	
Eingest. Nutzleistung	42 kW	
Feuerungswirkungsgrad	93 %	
Kesseltemperatur	70 °C	
Bereitschaftsverluste	0.39 kW	
		Leistungsaufnahme Gebläse 0.29 kW
		Leistungsaufnahme Pumpe 0.1 kW

Parameter für Simulation mit EWS

Bohrtiefe:	270 m	gesamte Sondenlänge:	540 m
Anordnung:	2 Sonden (Abstand=13.5m)		
Sondentyp:	Doppel-U 25 mm		
Wärmeträger:	Monopropylenglykol 33%	Temperaturdifferenz:	3 K
Gestein:			
Schicht1:	Erde, tonig, lambda = 1.5 W/mK		10 m
Schicht2:	Schlamm-Siltstein lambda=2.6 W/mK		260 m

4.3 Speicher

WP-CALC Inputverifikation Seite 5

Speichertyp		Ladezyklen			
Technischer Speicher		Zeit	Tarifzeiten		
Speichervolumen			Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3
600 Liter		1	laden	laden	laden
Einschalttemperatur		2	laden	laden	laden
38.6 °C		3	laden	laden	laden
Ausschalttemperatur		4	laden	laden	laden
43.6 °C		5	laden	laden	laden
Umgebungstemperatur Speicher		6	n. laden	n. laden	laden
20.0 °C		7	n. laden	n. laden	laden
Speicherverluste		8	n. laden	n. laden	laden
4.7 W/K		9	n. laden	n. laden	laden
Ladeweise:		10	n. laden	n. laden	laden
Schichtladung		11	n. laden	n. laden	laden
Ladetemperatur (bei Schichtladung)		12	n. laden	n. laden	laden
47.0 °C		13	n. laden	laden	laden
Speichertemperaturregelung:		14	n. laden	laden	laden
konstant		15	n. laden	laden	laden
Ladezyklen Wochenstruktur		16	n. laden	laden	laden
Tag	Tagestyp	17	n. laden	laden	laden
Montag	1	18	n. laden	laden	laden
Dienstag	1	19	n. laden	laden	laden
Mittwoch	1	20	n. laden	laden	laden
Donnerstag	1	21	n. laden	laden	laden
Freitag	1	22	n. laden	laden	laden
Samstag	2	23	laden	laden	laden
Sonntag	3	24	laden	laden	laden

4.3 Speicher

WP-CALC Inputverifikation Seite 5

Speichertyp		Ladezyklen			
Technischer Speicher		Zeit	Tarifzeiten		
Speichervolumen			Tagestyp 1	Tagestyp 2	Tagestyp 3
600 Liter		1	laden	laden	laden
Einschalttemperatur		2	laden	laden	laden
40.0 °C		3	laden	laden	laden
Ausschalttemperatur		4	laden	laden	laden
43.6 °C		5	laden	laden	laden
Umgebungstemperatur Speicher		6	n. laden	n. laden	laden
20.0 °C		7	n. laden	n. laden	laden
Speicherverluste		8	n. laden	n. laden	laden
4.7 W/K		9	n. laden	n. laden	laden
Ladeweise:		10	n. laden	n. laden	laden
Schichtladung		11	n. laden	n. laden	laden
Ladetemperatur (bei Schichtladung)		12	n. laden	n. laden	laden
47.0 °C		13	n. laden	laden	laden
Speichertemperaturregelung:		14	n. laden	laden	laden
konstant		15	n. laden	laden	laden
Ladezyklen Wochenstruktur		16	n. laden	laden	laden
Tag	Tagestyp	17	n. laden	laden	laden
Montag	1	18	n. laden	laden	laden
Dienstag	1	19	n. laden	laden	laden
Mittwoch	1	20	n. laden	laden	laden
Donnerstag	1	21	n. laden	laden	laden
Freitag	1	22	n. laden	laden	laden
Samstag	2	23	laden	laden	laden
Sonntag	3	24	laden	laden	laden