



Manual 2015

M o d T h e r m

Modellierung der Erdwärmegewinnung aus Tiefbohrungen nach dem Wasserzirkulations- und dem Direktverdampfer-Verfahren

- **Wasserzirkulation in U-Rohr-, Doppel-U-Rohr-, Koaxial- und Nicht-Zentrischer Bauweise und in Ringrohrsonden**
- **Direktverdampfung in Koaxialsonden und in Nicht-Zentrischer Bauweise**

Autoren: **Dr.-Ing. Frieder Häfner**
Professor i.R. für Geoströmungstechnik an der TU Bergakademie Freiberg
(email: frieder.haefner@tbt.tu-freiberg.de
 frieder.haefner@geores-freiberg.de)
Dipl.-Geoök.Linda Meusel, linda.meusel@geores-freiberg.de

GeoRes Consult Meusel & Partner, Ziegelgasse 12, D-09599 Freiberg

Freiberg, Oktober 2015

Abstract

Das Wasserzirkulationsverfahren und das Direktverdampferverfahren sind Verfahren zur effizienten Gewinnung von Erdwärme zu Heizungs- und Klimatisierungszwecken.

Das Prinzip der Zirkulation von Wasser, Sole oder einer Frostschutzflüssigkeit in einem Bohrloch zur Erwärmung des Fluids ist wohlbekannt. Das Prinzip des Direktverdampferverfahrens besteht in der druckabhängigen Verdampfung eines Kältemittels in einem Bohrloch beliebiger Tiefe bei Temperaturen von etwa -20 °C bis +30 °C. Die verfahrenstechnisch möglichen sehr niedrigen Temperaturen erhöhen die treibende Temperaturdifferenz zwischen Bohrloch und Gestein und steigern die Wärmeleistung gegenüber der Wasserzirkulation um das Mehrfache.

Für das Wasserzirkulationsverfahren wird neben den herkömmlichen Bauarten (U-Rohr, Doppel-U-Rohr, Koaxial) auch die neue Ringrohrsonden angeboten.

Zur technischen Planung und zur optimalen Auslegung von Anlagen, aber auch im Rahmen von Genehmigungsverfahren ist die Modellierung (Simulation) der miteinander verkoppelten Wärmetransportvorgänge in den verschiedenen Strömungsräumen des Bohrloches und dem Gebirge (Gestein) notwendig. Eine geschlossene mathematische Lösung des Problems ist nicht bekannt und erscheint wegen der starken Nichtlinearitäten als unmöglich.

Im Manual wird ein numerisches Lösungsverfahren nach der Bilanzmethode (finite Differenzenmethode) entworfen und als FORTRAN-Programm **ModTherm** realisiert. Es erlaubt die zeitabhängige Temperatur- und Leistungsberechnung. Das Programm baut in wesentlichen Teilen des Lösungsverfahrens und der Numerik auf dem Strömungs- und Transportmodell **MODCALIF** (Häfner et al, 1999, Boy et al., 2001) und auf dem Vorgängerprogrammen **ModGeoTherm** und **ModGTring** auf.

Ein Sondenfeld kann simuliert werden durch:

- Vorgabe der Anzahl /voneinander unabhängiger Erdwärmesonden oder
- durch Speicherung für die 3D-Simulation mit dem Programm **ModGeo3D**.

Modellierung der Erdwärmegewinnung aus Bohrungen nach Direktverdampfer- und Wasserzirkulations-Verfahren

Inhalt

1 Zielstellung der Entwicklung eines Simulationsprogrammes	5
2 Theoretische Grundlagen der Simulation	9
2.1 Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes im Erdreich.....	9
2.2 Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes in der Sonde	10
2.3 Wärmeübergang zwischen den Fließräumen und dem Erdreich	12
2.4 Modellierung der Wasser/Sole-Zirkulation ohne Verdampfung	12
2.5 Antrieb der Wärmepumpe, Heizungsvorlauftemperatur, Jahresarbeitszahl.....	13
2.6 Einbeziehung eines Luft-Wärmetauschers	14
2.7 Wirkungsgrade Motoren, Pumpen	14
3 Numerisches Lösungsverfahren	15
3.1 Örtliche Diskretisierung	15
3.2 Zeitliche Diskretisierung	17
3.3 Steuerung der Wärme- und Kälteleistung.....	18
3.4 Flutpunkt-/Staupunktberechnung beim Direktverdampferverfahren	20
4 Verifizierung des Programmes.....	21
5 Kurzbeschreibung des Programmes <i>ModTherm</i>.....	23
5.1 Datenorganisation.....	23
5.2 Eingabe im Dialog.....	24
5.3 Aufbau des Input-Files name.inp.....	25
5.4 Aufbau der Zentral-und Ringraum-Inputdaten (#zen, #ri1, #ri2,..., #ri5)	26
5.5 Resultate	27
Literatur	30
Anlage 1: demoU2.dia (für Wasserzirkulation in Doppel-U-Rohrbauweise).....	31
Anlage 2: demoRing.dia (für Wasserzirkulation in Ringrohrbauweise).....	31
Anlage 3: demo.inp (mögliche Zusatzdaten für alle Bauweisen, zu bearbeiten).....	31

Verwendete Symbole

Alle Symbole sind in SI-Basiseinheiten verwendet.

a	Temperaturleitzahl, $a = \lambda / (\rho c)$ (m^2/s)
c	spezifische Wärmekapazität, $\text{J}/(\text{kg K})$
d	Durchmesser, m
g	Erdbeschleunigung, $9,81 \text{ m/s}^2$
h	spezifische Enthalpie (J/kg)
k	Durchlässigkeit des Gesteins (m^2)
m	Masse, kg
\dot{m}	Massenstrom (kg/s)
n	Porosität des Gesteins, -
p	Druck (Pa)
Q	Wärmemenge (J)
\dot{Q}	Wärmestrom (W)
\dot{Q}_v	Wärmequelle/senke (W/m^3)
q_{VE}	Verdampfungsenthalpie (J/kg)
r	Radius (m)
R	Aussenradius des Simulationsmodelles (m)
T	Temperatur (K bzw. Grd. Celsius)
t	Zeit (s)
V	Volumen (m^3)
w	Geschwindigkeit (m/s)
z	vertikale Koordinate, senkrecht nach oben gerichtet (m)
α	Wärmeübergangszahl, $\text{J}/(\text{m}^2 \text{ K})$
λ	Wärmeleitfähigkeit, $\text{W}/(\text{m K})$
β	dimensionslose Massenübergangszahl zwischen Kalt- und Heißdampfraum
η	dynamische Viskosität (Pa s)
σ	Grenzflächenspannung, (N/m)

Indices

e	Ethanol-Wassergemisch
w	Wasser

1 Zielstellung der Entwicklung eines Simulationsprogrammes

Die Direktverdampfer und Wasserzirkulationsverfahren werden als die zukunftssträchigsten Verfahren zur Gewinnung regenerativer Energie für Heizung und Klimatisierung angesehen, die das Potential für eine flächendeckende, effektive und wettbewerbsfähige Anwendung an beliebigen Standorten besitzen und eine hohe Versorgungssicherheit - unabhängig von Wetter, Wind, Sonne, Luft und Wasser - bieten.

Eine wesentliche Voraussetzung für die breitenwirksame Anwendung ist die Verfügbarkeit eines rechnergestützten Werkzeuges zur Planung und optimalen Auslegung von wärmetechnischen Versorgungsanlagen, das in den üblichen umwelt-, berg- und wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren anerkannt ist.

In Anbetracht der Heterogenität des geologischen Untergrundes und der Spezifika des jeweiligen Standortes muss der Schichtenaufbau des geologischen Untergrundes mit seinen unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Porosität und Wassersättigung) und der jeweiligen geothermischen Temperaturverteilung abbildbar sein.

Das Bohrloch (Wärmesonde) kann verschiedene, voneinander getrennte Fließräume (Zentralraum und diverse Ringräume) besitzen (s. Abb.1, 2a, 2b). Jedem dieser Räume können unterschiedliche Aufgaben zugewiesen werden, von der Injektion von Wasser/Sole, des flüssigen Kältemittels, der Verdampfung des Kältemittels, dem Aufstieg des Dampfes bis zur Zirkulation eines Wasser/Sole/Ethanol-Kühlmittels zur Kälte- bzw. Wärmegewinnung.

An der Erdoberfläche besitzt die Sonde einen Wärmetauscher (Kondensator), der oftmals in die Wärmepumpe integriert ist. Der Kopfwärmetauscher übergibt die Erdwärme vom Wasser auf das Kältemittel der Wärmepumpe oder vom Kältemittel der Direktverdampfer-sonde auf das Kältemittel der Wärmepumpe.

An diesen Kondensator kann die wärmetechnische Anlage (Verdichter=Wärmepumpe, Wärmetauscher und Antriebsmotore) in unterschiedlichster Konfiguration angekoppelt sein. Es erschien nicht praktikabel, die gesamte Verfahrenstechnik der Anlage in das hier zu beschreibenden Modell zu integrieren, sondern die jeweilige Situation und Fahrweise der Anlage als zeitabhängige Randbedingungen zu berücksichtigen.

Das Programm berechnet stets nur eine einzige Erdwärmesonde. Für ein ganzes Sondenfeld kann man das Leistungsverhalten der verschiedenen Einzelsonden in Dateien speichern und anschließend mit dem 3D-Programm **ModGeo3D** die gesamte hydrogeologische Einheit simulieren. Wenn man Informationen über die Leistung eines Sondenfeldes, dessen Sondenabstände sehr groß sind (> 20 m) haben will, muss die Anzahl der Sonden größer als 1 sein. Dann werden in den Resultat-Dateien stets die Leistungsdaten einer Sonde, mit der Anzahl multipliziert, ausgegeben. Das bedeutet aber, dass die Sonden so weit voneinander entfernt sein müssen, dass sie sich nicht wesentlich beeinflussen.

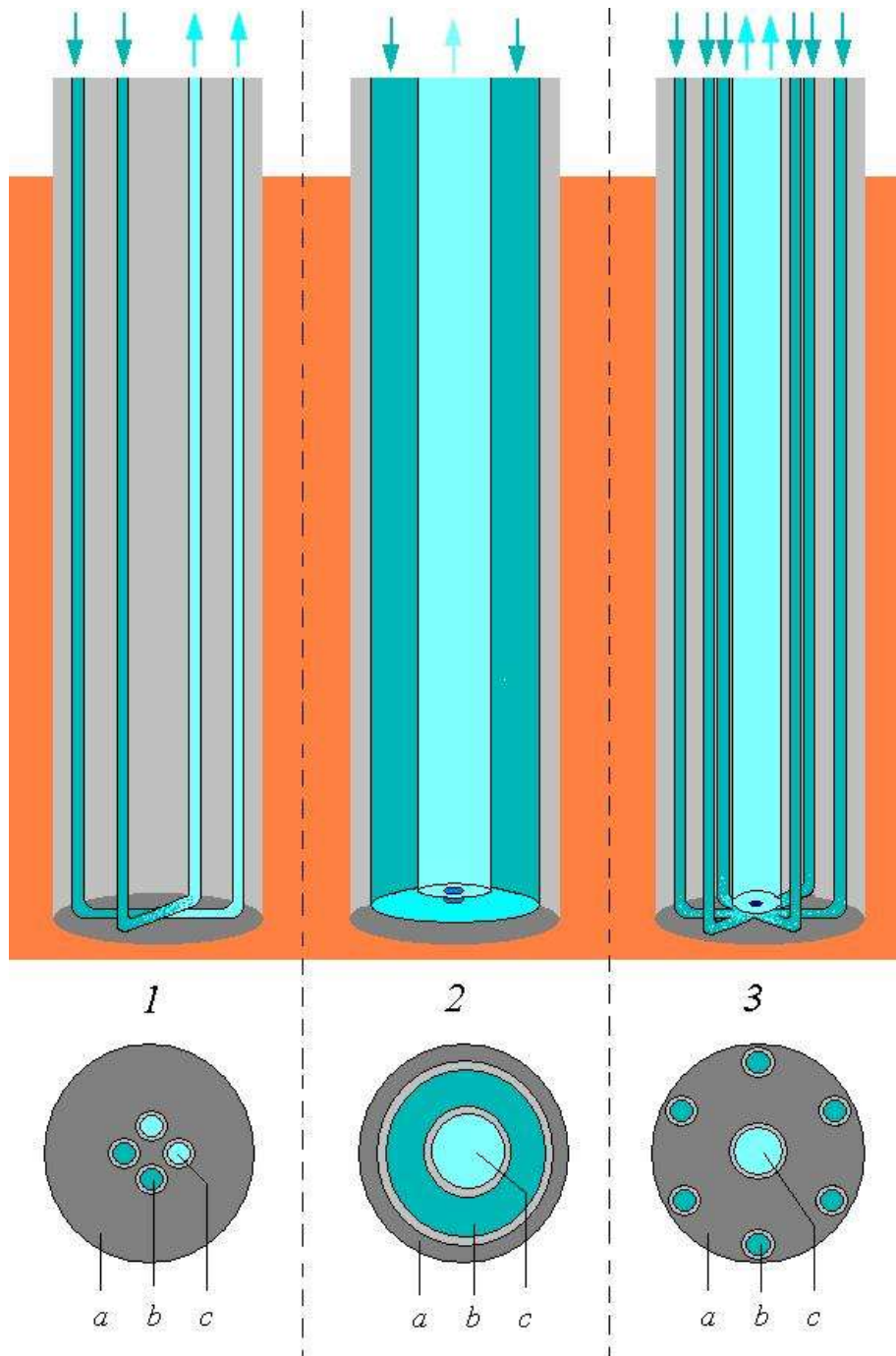


Abbildung 1: Bauarten für die Wasserzirkulation: Doppel-U-Rohr (1), Koaxial- (2) und Ringrohrsonde (3). a-Verfüllbaustoff, b-abwärtsströmendes Kaltwasser, c-aufwärtsströmendes Warmwasser

Erdwärmesonde in konzentrischer Bauart (Heizung - Klimatisierung)

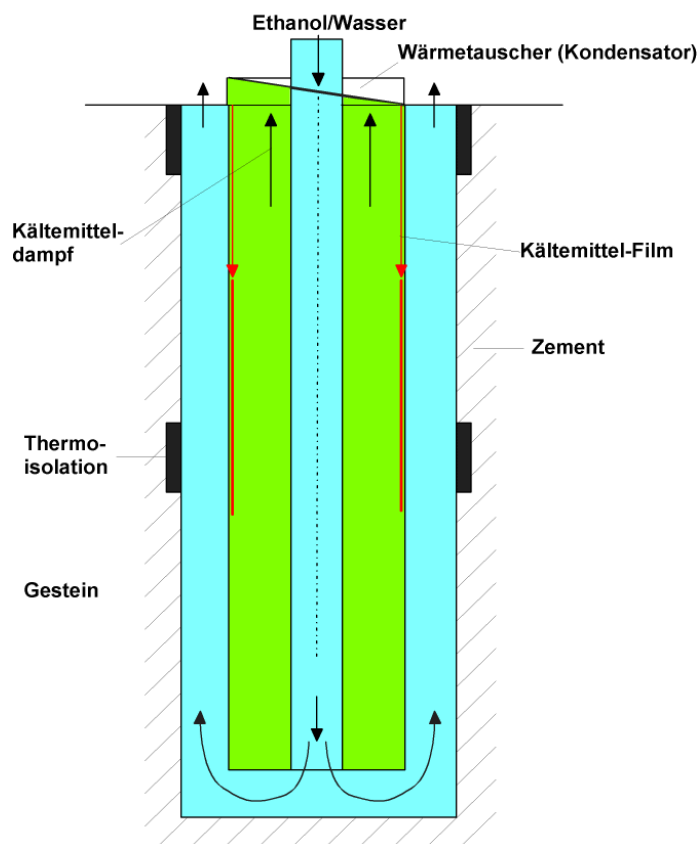


Abbildung 2a: Direktverdampfer-Erdwärmesonde in konzentrischer Bauart, mit Wasserzirkulation zur Kältegewinnung

Der ganz besondere Vorzug der Direktverdampfung ist die verfahrenstechnische Ausnutzung der relativ großen Verdampfungsenthalpie des Kältemittels zum Wärmetransport aus der Tiefe zur Erdoberfläche bei sehr geringen Wärmeverlusten und bei nahezu konstanter Temperatur über der gesamten Bohrlochlänge. Ebenso ist die sehr große Erstarrungsenthalpie des Porenwassers bei der Ausbreitung bzw. Rückbildung eines Frostmantels um das Bohrloch vorteilhaft. Insbesondere der letztgenannte Effekt erhöht das Wärmespeichervermögen des Erdreiches wesentlich. Da Heizungs- und Klimatisierungsanforderungen zeitlich ausserordentlich stark variieren (etwa im Zeitmaßstab von Stunden), sind die Wärmetransportvorgänge im Erdreich stark instationär, so dass dem jeweils gespeicherten bzw. dem speicherbaren Wärme- bzw. Kälteinhalt in der Bohrlochumgebung eine hohe Bedeutung zukommt.

Das Simulationsprogramm ist zur Berechnung der Vorgänge an einer Bohrung konzipiert (in Zylinderkoordinaten r - z). Falls eine Anlage mehrere Wärmesonden besitzt, kann das berücksichtigt werden, jedoch ohne Beachtung der gegenseitigen Beeinflussung.

Erdwärmesonde in nicht-konzentrischer Bauart (Heizung - Klimatisierung)

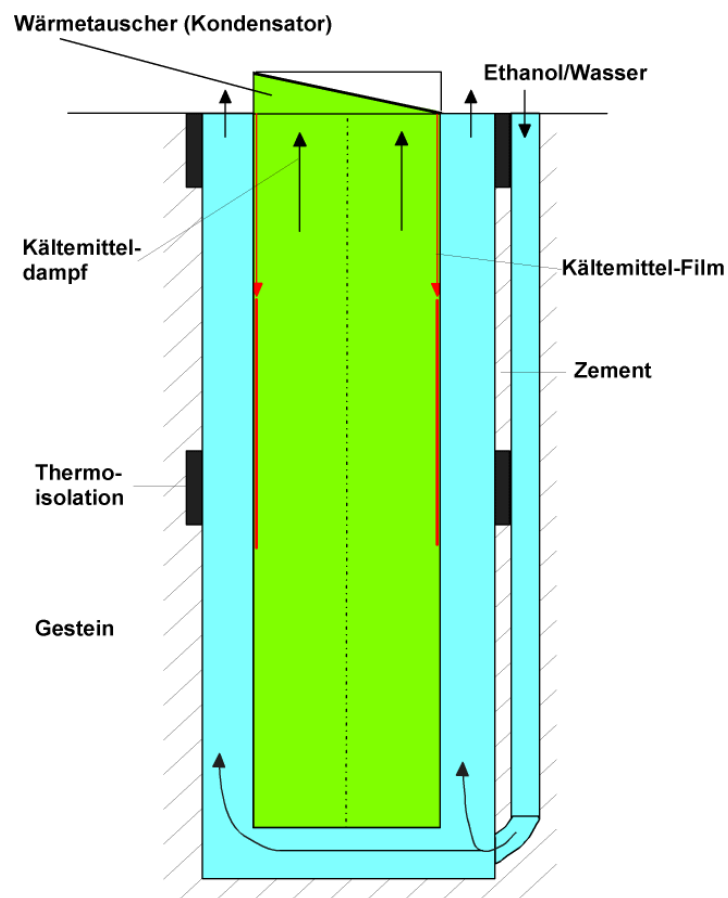


Abbildung 2b: Direktverdampfer-Erdwärmesonde in nicht-konzentrischer Bauart (Beispiel: Ethanol/Wasser Rohr im Zement eingebettet, mit Wasserzirkulation zur Kältegewinnung)

Die Software ist zur Modellierung der Erdwärmegewinnung mit Wasser/Solezirkulation und zur Modellierung der Direktverdampfung mit Ammoniak, Propan, Ethan und Kohlendioxid geeignet.

2 Theoretische Grundlagen der Simulation

Der Wärmetransport und der Wärmeübergang finden in zwei grundsätzlich verschiedenen Teilsystemen statt, deren Zeitkonstanten (dimensionslose Zeiten) sich um Zehnerpotenzen unterscheiden:

- dem Erdreich (Gestein, Gebirge) und
- den verschiedenen Fließräumen der Wärmesonde. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die schematische Darstellungen der beiden Teilsysteme.

Im **Erdreich** werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Wärmeleitung
- Phasenübergang flüssig-fest im Porenfluid (Wasser, Salzwasser) einschließlich Erstarrungsenthalpie und der Veränderung von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität beim Phasenübergang

Ein möglicher konvektiver Wärmetransport im Erdreich durch fließendes Grundwasser und der oberflächliche konvektive Wärmeeintrag durch den Niederschlag wird in diesem Programm nicht erfasst. Falls dies erforderlich sein sollte, wird auf die Simulation eines Sondenfeldes mit **ModGeo3D** verwiesen.

In der **Wärmesonde** werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Konvektiver Wärmetransport und Wärmeleitung,
- Phasenübergang flüssig-dampfartig einschließlich der Verdampfungsenthalpie und der Änderungen der thermodynamischen Eigenschaften.

2.1 Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes im Erdreich

Grundlage der Simulation im Erdreich ist die bekannte Fourier'sche Wärmeleitgleichung (Häfner et al., 1992)

$$\operatorname{div}\{\lambda \operatorname{grad} T\} = (\rho c)_{\text{total}} \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{Q} \quad (1)$$

Der Wärmespeicherterm wird als „konzentrierte Wärmekapazität“ beschrieben, d.h. als gewogenes Mittel des Speichervermögens von Gestein und Porenfüllung

$$(\rho c)_{\text{total}} = n \times (\rho c)_w + (1-n) \times (\rho c)_{\text{Gesteinsmatrix}} \quad (2)$$

Der Enthalpiesprung Δh bei Erreichen der Gefriertemperatur der Porenfüllung ist numerisch nur sehr schwierig beherrschbar, deshalb wird folgende thermodynamische Formulierung gewählt:

- Bei Erreichen der Gefriertemperatur der Porenfüllung können sich die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches und spezifische Wärmekapazität der Porenflüssigkeit sprunghaft ändern.
- Der Enthalpiesprung (Erstarrungswärme), der zu einer wesentlichen zeitlichen Verzögerung der Temperatúrausbreitung führt, wird derart berücksichtigt, dass das

Volumenelement, in dem die Erstarrung/das Schmelzen einsetzt, als temporäre Randbedingung 1.Art temperaturkonstant (Gefriertemperatur) angenommen wird. Eine mitgeführte Bilanz aller ein- und ausströmenden Wärmemengen zeigt an, wann der Erstarrungs- bzw. Schmelzprozess beendet ist (die Schmelz-/Erstarrungsenthalpie „aufgebraucht“ ist). Anschließend wird das Volumenelement wieder als üblicher Wärmetransportraum berücksichtigt. Die Gefriertemperatur des Porenwassers kann tiefenabhängig vorgegeben werden. Standardmäßig wird sie bis 200 m Tiefe mit Null angesetzt, in größeren Tiefen sinkt sie je 100 m um 1 Grad infolge des zunehmenden Salzgehaltes.

Als Randbedingungen des Wärmeleitprozesses können simuliert werden:

- am äußersten Radius des Modelles (äußerer Rand): adiabate Verhältnisse (RB 2.Art, $\dot{Q} = 0$) oder konstante geothermische Temperatur (RB 1.Art). Der äußere Radius wird mit der Reichweitenformel:

$$r_{\max} = 10 \times \sqrt{a \times t_{\max}}$$

mit einer mittleren Temperaturleitzahl a und der maximalen Simulationszeit t_{\max} berechnet.

- In der tiefstliegenden Schicht des Modelles (unterer Rand): adiabate Verhältnisse (RB 2.Art, $\dot{Q} = 0$) oder konstante geothermische Temperatur (RB 1.Art).
- In der höchstliegenden Schicht (Erdoberfläche) des Modelles (oberer Rand) werden in direkter Umgebung der Sonde (Radius ≤ 1 m) adiabate Verhältnisse (RB 2.Art, $\dot{Q} = 0$) vorausgesetzt (wegen Bebauung etc.). In weiterer Entfernung wird eine konstante Erdoberflächen- oder Grundwassertemperatur von 8-12°C (RB 1.Art) angesetzt aus der Erkenntnis, dass die Sonneneinstrahlung (ca. 1000 W/m², wovon der Großteil jedoch wieder reflektiert wird) im Falle der Abkühlung des oberflächennahen Bereiches mindestens 10 W/m² einspeisen wird. Der hydrologische Prozess mit Niederschlägen, Evapotranspiration und Grundwasserbewegung verteilt diese eingestrahelte Energie in der oberen Bodenzone. Erst wenn der dem Boden von oben zufließende Energiestrom größer als 10 W/m² ist, wird eine Randbedingung 2.Art mit $\dot{Q} = 10$ W/m² eingeschaltet.

Da die beiden Teilsysteme Erdreich und Wärmesonde numerisch simultan gelöst werden, ist die Definition von Randbedingungen am inneren Rand (Bohrlochwand) nicht erforderlich.

2.2 Das physikalisch-mathematische Modell des Wärmetransportes in der Sonde

Grundlage der Simulation in den Fließräumen der Sonde ist die Wärmetransportgleichung (Häfner et al, 1992)

$$\operatorname{div}\left\{\lambda \operatorname{grad} T - \left(\rho c \vec{w}\right)_{\text{fluid}} T\right\} = (\rho c)_{\text{fluid}} \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{Q}_v \quad (3)$$

Dabei besteht der Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{w} = (w_r, w_z)^T$ aus den Komponenten in r- und z-Richtung.

Direktverdampfersonden

Für die Direktverdampfersonden (s. Abbildungen 2a/b) ist der Kältemittel-Verdampfungsraum als ein einziger Raum dargestellt. Nach Hamann (2002) teilen wir jedoch den Verdampfungsraum in drei Fließräume auf :

- den Kältemittel-Film mit abwärts gerichteter Flüssigkeits-Filmströmung,
- den sogenannten Kaltdampfraum, mit abwärtsgerichteter Strömung des Kältemittel-Dampfes bei der jeweiligen Verdampfungsstemperatur und
- den sogenannten Heißdampfraum, mit aufwärts gerichteter Strömung eines möglicherweise überhitzten Kältemittel-Dampfes.

Diese Fließräume sind in der Regel untereinander **nicht** durch Rohrwandungen abgeschlossen und ermöglichen eine Geschwindigkeitskomponente w_r in radialer Richtung. Wesentlich ist dabei der Übertritt von Kaltdampf in den Heißdampfraum. Dieser Übergang kann im Rahmen dieser Entwicklung nicht theoretisch beschrieben werden. Deshalb wird der Massenübergangskoeffizient β eingeführt, der den Anteil des in den Heißdampfraum eintretenden Kaltdampf-Massenstromes im jeweiligen Volumenelement angibt. Wie wir zeigen können, ist dieser Koeffizient dann sehr gering sensitiv bezüglich der Wärmeleistung und der Temperatur am Kopf der Sonde, wenn die gesamte Sondenlänge benetzt ist (Auslastung 100 %, dann $\beta = 0,9 \dots 1$). Im Programm wird $\beta = 0,95$ als Startwert benutzt. In jeder Stressperiode wird ein auflaufender Mittelwert für den Faktor β berechnet, indem die benetzte Sondenlänge/maximale Sondenlänge als aktueller Wert β betrachtet wird.

Zur Berechnung der Vertikalgeschwindigkeiten werden folgende praktikable Voraussetzungen getroffen:

- 1) Die vertikal nach unten gerichtete Geschwindigkeit des Flüssig-Kältemittel-Filmes ergibt sich alleine aus dem injizierten Massenstrom und dem bis zu der betrachteten Tiefe verdampften Massenstrom. Die verdampfende Masse hängt dabei vom Wärmestromangebot des Erdreiches bzw. des aufsteigenden Ethanol/Wassergemisches ab. Daraus lässt sich dann die Filmdicke ableiten.,
- 2) Die vertikal nach unten gerichtete Geschwindigkeit des Kaltdampfes und die vertikal nach oben gerichtete Geschwindigkeit des Heißdampfes hängen u.a. von den Massenströmen und den jeweils eingenommenen Querschnittsflächen ab. Sinnvolle Voraussetzungen sind:
 - die Drücke in beiden Räumen sind in jeder Tiefe gleich,
 - die Beträge der Geschwindigkeiten sind in beiden Räumen gleich,
 - der Massenübergang vom Kaltgasraum in den Heißgasraum wird durch den Übergangskoeffizienten β (Anteil des übertretenden Kaltdampf - Stromes) beschrieben.

Diese sehr vereinfachte Beschreibung der strömungsmechanisch außerordentlich schwierigen Problematik der Druckverluste und der Vermischung zweier nicht-isothermer Gase im freien Raum bei Gegenstrom ist angezeigt und praktikabel, weil der den Prozess steuernde Einfluss die Größe des Wärmestromes aus dem Erdreich ist. Aus diesem Grunde ist die Leistung der Sonde und die Temperatur des austretenden Heißgases ganz entscheidend vom Wärmeangebot und der Länge des Kältemittel-Filmes (Verdampferlänge) abhängig, weniger jedoch vom Übergangskoeffizienten β .

Die Wärmesonde kann maximal 6 Fließräume besitzen, die konzentrisch, aber auch nichtkonzentrisch angeordnet sind (die Reihenfolge von innen nach aussen ist variabel). Eine übliche Bohrlochkonstruktion ist wie folgt:

- Ethanol/Wassergemisch
- Heissdampfraum
- Kaltdampfraum,
- Kältemittel-Film mit Verdampfung,
- Ethanol/Wassergemisch.

Die Ausbildung des an der Rohrwandung herabsinkenden flüssigen Kältemittelfilmes ist nicht immer gewährleistet, so z.B. bei geeigneten Bohrungsabschnitten oder schlechter Benetzung der Rohrwandung. In diesen Fällen bildet sich im Bohrlochunterteil ein mehr oder weniger langer Flüssigkeitssumpf, in dem es u.U. zum konvektiven Sieden kommt. Dieser Prozess wird ebenfalls unter Beachtung der druckabhängigen Verdampfungstemperatur nachgebildet.

2.3 Wärmeübergang zwischen den Fließräumen und dem Erdreich

Die entscheidenden Wärmewiderstände zwischen den Räumen entstehen durch Wärmeübergangswiderstände; in den Fließräumen herrscht oftmals turbulente Strömung.

Wärmeleitung in radialer Richtung wird nur dann berücksichtigt, wenn das Medium im Raum ruht. Die geschwindigkeits-, temperatur- und druckabhängigen Wärmeübergangszahlen für die verschiedenen Medien an den verschiedenen Randflächen werden im Programm nach VDI-Wärmeatlas, dem thermodynamischen Softwarepaket **CoolPack** bzw. dem Forschungsbericht (Paulusch, 2009) in jedem Volumenelement gesondert berechnet. Ebenso sind die Stoffwerte für die Kältemittel (Ammoniak, Propan, Ethan, CO₂) und Ethanol-Wassergemische den o.g. Quellen entnommen und im Programm als Tabellen erfasst.

2.4 Modellierung der Wasser/Sole-Zirkulation ohne Verdampfung

Das Programm simuliert auch die übliche Zirkulation von Wasser/Sole in einem Bohrloch, wobei die Erdwärme in Form der im Wasser gespeicherten Energie nach oben transportiert wird. Dazu wird die Injektionstemperatur des Wassers (nach der Abkühlung im Wärmetauscher, analog Verdampfungstemperatur) vorgegeben und aus der Differenz der Förder- und Injektionstemperatur des Wassers die mögliche Wärmeleistung ermittelt. Die Kältegewinnung wird ebenso berechnet, jedoch mit der maximalen Temperatur der Klimaanlage als Injektionstemperatur.

2.5 Antrieb der Wärmepumpe, Heizungsvorlauftemperatur, Jahresarbeitszahl

Der Wärmepumpenantrieb kann mit Elektro- oder Verbrennungsmotor erfolgen. Bei Verwendung eines Verbrennungsmotors werden 90 % der Motorabwärme in die Nutzwärme einbezogen.

Die Wärmepumpe erhöht die Temperatur auf die Temperatur der Kondensation (=Heizungsvorlauf). Als Eingabewert wird die Kondensationstemperatur vorgegeben - ein Maximalwert (für die Monate November bis März) und ein Minimalwert (für die Monate April bis Oktober). Der COP (**C**oefficient **O**f **P**erformance = Leistungszahl) der Wärmepumpe wird als Durchschnittswert von Messungen im Erdwärmeversuchsfeld der BLZ Geotechnik GmbH, Gommern, und des Wärmepumpenherstellers Waterkotte als Funktion der Temperaturerhöhung ΔT nach der Formel

$$COP = 7.935 - 0.0845 \times \Delta T \quad (4)$$

berechnet (s.Abb. 3). Gl.(4) kann durch Input in der Datei „name.inp“ geändert werden.

Die Arbeitszahl wird auflaufend für je ein Jahr als Quotient der Gesamt-Nutzenergie des jeweiligen Zeitabschnittes zur gesamten Wärmepumpen-Antriebsarbeit des gleichen Zeitabschnittes (Gesamt-Nutzenergie / Elektroenergieverbrauch oder Gesamt-Nutzenergie / mechanische Antriebsenergieverbrauch) berechnet. Bei Zirkulation von Wasser/Ethanol wird die Antriebsarbeit der Umwälzpumpe mit einbezogen, bei Antrieb mit Gas- oder Dieselmotor ist die Abwärme als Nutzenergie einbezogen, die Antriebsleistung entspricht dem mechanischen Leistungsbedarf. Falls im laufenden Jahr auch Kälteenergie angefordert und von der Sonde lieferbar ist, wird diese Nutzenergie in die Jahresarbeitszahl auch mit einbezogen. Am Ende eines Jahresabschnittes (nach jeweils 365 Tagen) entspricht die Arbeitszahl der Jahresarbeitszahl. Ebenso wird die Nutzenergie zur eingesetzten Primärenergie ins Verhältnis gesetzt (**Primaer**), wobei für Elektroantrieb ein Wirkungsgrad von 40% für die Elektroenergieerzeugung angesetzt ist.

Es ist zu berücksichtigen, dass im Wärmetauscher (Kondensator) zu berücksichtigen ist, dass ein Temperaturabfall auftritt (Temperaturdifferenz zwischen Heißgas/Warmwasser am Sondenkopf und Ansaugtemperatur der Wärmepumpe). Dieser Temperaturabfall (Temperaturverlust) wird beim Input abgefragt.

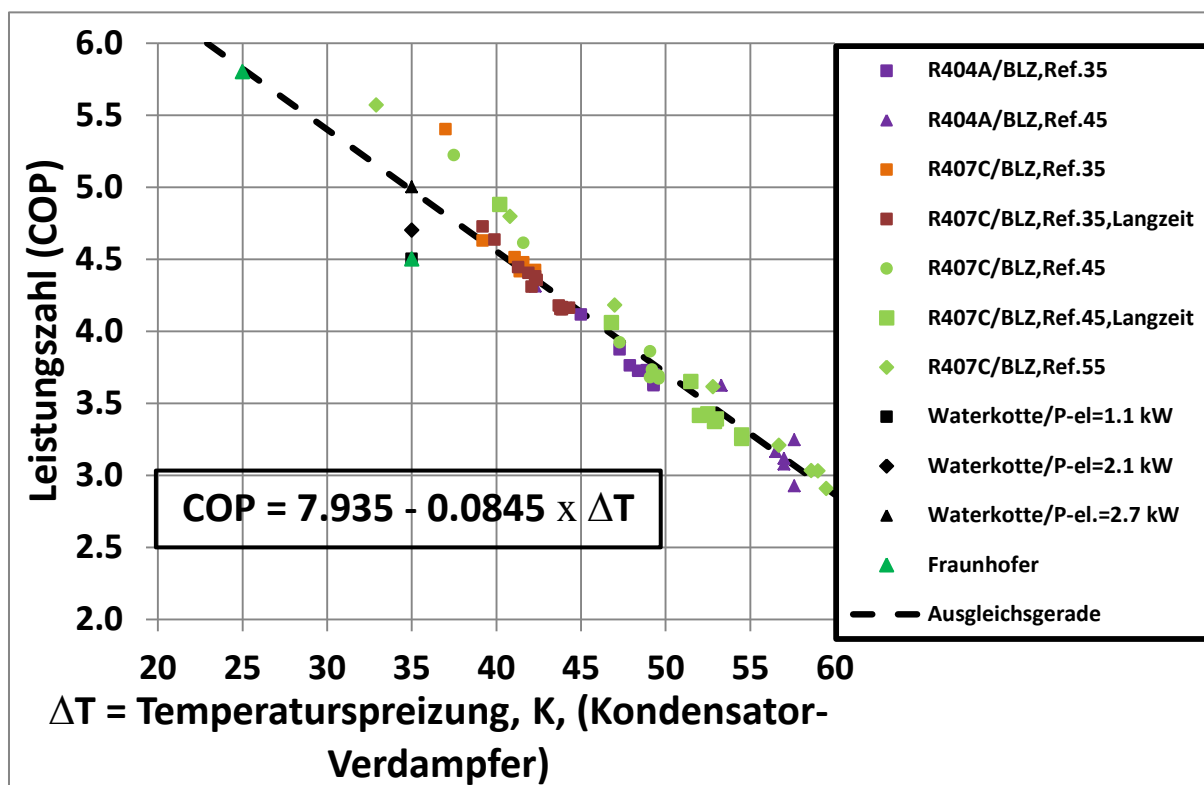


Abbildung 3: Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP-Coefficient Of Performance) in Abhängigkeit von der Temperaturspreizung.

2.6 Einbeziehung eines Luft-Wärmetauschers

Zur Verbesserung der Jahresarbeitszahl kann ein Umweltluft-Wärmetauscher in Reihe mit dem Kopf-Wärmetauscher der Sonde einbezogen werden. Die Wärmetauschleistung wird berechnet nach

$$P_{\text{Wärmetauscher}} = P_{\text{WT-spezifisch}} (T_{\text{Luft}} - T_{\text{Kältemittel}}) \quad (5)$$

Die spezifische Leistung des Wärmetauschers $P_{\text{WT-spezifisch}}$ in kW/K und die Tagesmitteltemperaturen T_{Luft} (monatsweise) sind Eingabegrößen. Es ist dabei zu beachten, dass bei Lufttemperaturen kleiner eines Grenzwertes (z.B. 4 °C) der Wärmetauscher abgeschaltet wird, um Vereisung zu vermeiden.

2.7 Wirkungsgrade Motoren, Pumpen

Im Programm sind die Wirkungsgrade vorgegeben, um die Nutzleistungen und Abwärmen ermitteln zu können.

Elektromotore für Umwälzpumpen: Wirkungsgrad 90%

Gas-/Dieselmotor getriebene Wärmepumpe mit Abwärmeeinkopplung:

Mechanischer Wirkungsgrad des Motors (bezogen auf eingesetzte Primärenergie): 35%

Energieverluste an die Umwelt: 15%

Die eingekoppelte Abwärmeleistung berechnet sich aus

$$P_{abw\ddot{a}rme} = 0.85 \times Mech. Leistung \times \left(\frac{100}{Wirkungsgrad} - 1 \right) \times \\ \times \left\{ 0.33 \times \frac{395 - T_{Heizungsvorlauf}}{400} + 0.67 \times \frac{90 - T_{Heizungsvorlauf}}{30} \right\}$$

Darin ist berücksichtigt, dass die Abgastemperatur ca. 400 °C und die Kühlwassertemperatur 90°C beträgt. Da die Kondensationstemperatur der Wärmepumpe der Heizungsvorlauftemperatur minus einem kleinen Temperaturverlust im Kopfwärmetauscher (falls vorhanden) entspricht, muss die Vorlauftemperatur um 5..15 K niedriger vorgegeben werden, da die Abwärme diese Differenz erbringt. Durch Probestart des Jobs (probieren) kann man leicht die reale Vorlauftemperatur finden.

3 Numerisches Lösungsverfahren

Die Differenzialgleichungen (1) und (3) werden nach der Bilanzmethode (finite Differenzenmethode) numerisch simultan gelöst (Häfner et al., 1992). Das Programm baut in wesentlichen Teilen des Lösungsverfahrens und der Numerik auf der Familie der Strömungs- und Transportmodelle **MODCALIF** (Häfner et al, 1999, Boy et al, 2001) auf, die im Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt und gepflegt wird.

3.1 Örtliche Diskretisierung

Die Einteilung des des Untersuchungsgebietes erfolgt in Zylindersymmetrie (r-z) oder Zylinderkoordinaten (r-φ-z).

U-Rohr-, Doppel-U-Rohr-, Koaxialsonden, Direktverdampfersonden

Hierbei wird der gesamte Raum in radial und vertikal (Schichten) untergliederte Volumenelemente eingeteilt (s. Abb.4a).

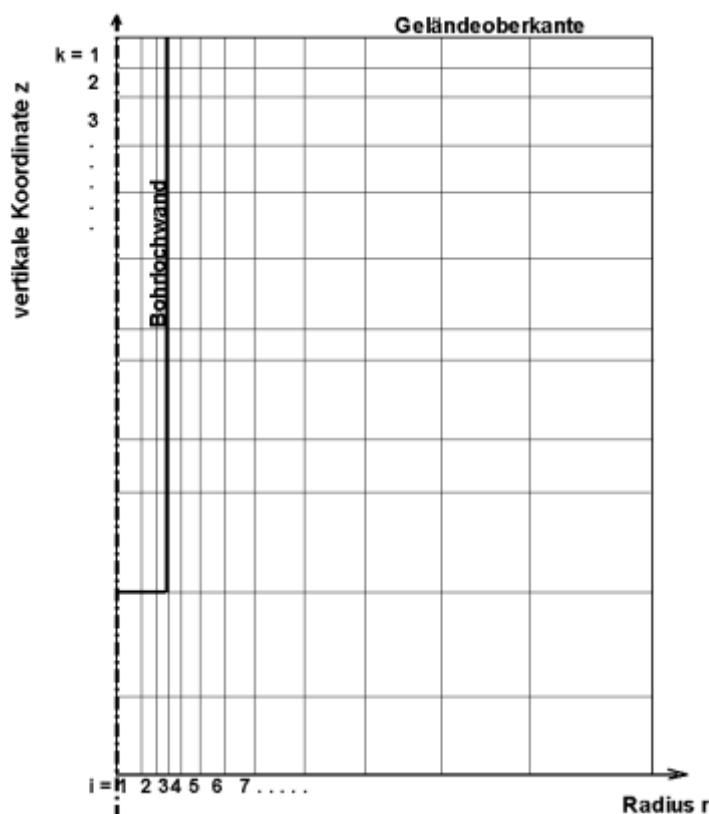


Abbildung 4a: Diskretisierung in r-z-Koordinaten

Dazu sind die z-Koordinaten der Oberkanten vorzugeben. In radialer Richtung sind die äusseren Radien der Fließräume und die Wanddicke der Rohre bzw. die äusseren Radien der Elemente im Erdreich vorzugeben. Durch diese radiale und vertikale Variabilität können unterschiedliche Rohrstränge (kombinierte Rohrtouren, Liner etc.), Rohrmaterialien verschiedener Art (Stahl, Isolationsmaterial etc.) und Zement- bzw. Isolationshinterfüllungen simuliert werden.

Wasserzirkulationssonden

Für Zirkulationssonden wird bei Bauweise *Koaxial* jeder Fließraum (Innenrohr $i=1$, Ringraum zum Außenrohr $i=2$) diskretisiert. Als nichtkonzentrische Bauart ist möglich: U-Rohr, Doppel-U-Rohr und im Zement eingebettetes Rohr.

Direktverdampfersonden

Folgende nichtkonzentrische Anordnungen zur Zirkulation eines Kühlmittels (Ethanol/Wasser) sind möglich:

- U-Rohr im Verdampfer (Raum 1 und Raum 2 sind die beiden Schenkel des U-Rohres),
- Ringraum um den Verdampfer (Raum 4) mit Innenrohr (Raum 5). Das Innenrohr kann sich im Ringraum 4 oder im Zement hinter den Rohren befinden.

Die radiale Diskretisierung wird automatisch vorbereitet, indem bei vorgegebener Anzahl von Zellen in Radiusrichtung (default = 51) die Radien außerhalb des Bohrlochradius

logarithmisch aufgeteilt werden. Im Falle von Vereisung/Auftauen und Kältegewinnung unter Nutzung der Schmelzwärme des Porenwassers ist es erforderlich, die radialen Zellen sehr klein zu wählen, sonst führen die Wärmebilanzen der Schmelzwärme zu großen Fehlern. Es wird empfohlen, in radialer Richtung mindestens 150 Zellen anzuordnen.

Ringrohrsonden

Bei Ringrohrsonden muss auch der Winkel φ diskretisiert werden (s.Abb.4b), um jedes Ringrohr erfassen zu können.

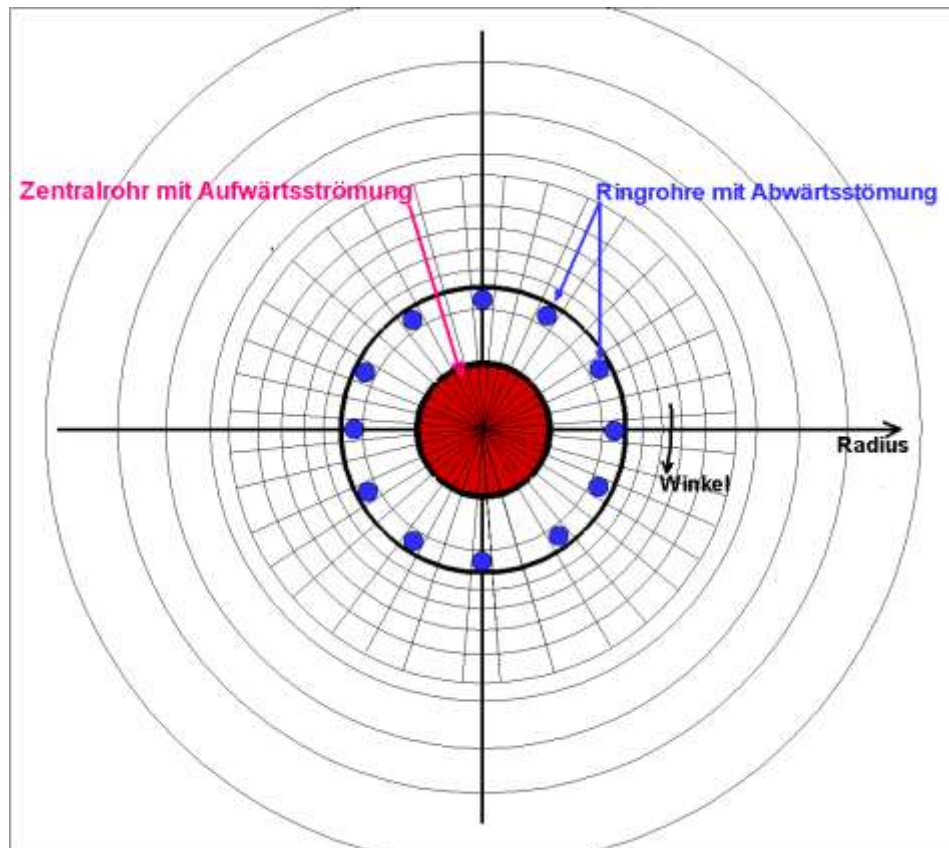


Abbildung 4b: Diskretisierung in der Ebene (r- φ) für Ringrohrsonden

Zur Verringerung des Rechenzeitbedarfes wird nur die bohrlochnahe Umgebung im Winkel diskretisiert (10 Radian), ansonsten entspricht die Einteilung der in Abb.4a.

3.2 Zeitliche Diskretisierung

Die Unterteilung der Zeitachse erfolgt in sogenannte Stressperioden (z.B. Monate). In einer Stressperiode sind alle äußeren Anforderungen (Nennleistungen, Systemtemperaturen, Klimatisierung etc.) zeitlich konstant. Die weitere Zeitunterteilung erfolgt in Tagen.

Die Zeitvorgabe ist zweifach möglich. Die einfachste Möglichkeit (v) ist die zeitliche Vorgabe von Stressperioden mit den zugehörigen Informationen zur Belastung. Diese Möglichkeit soll die Nachrechnung von Feldversuchen etc. erlauben.

Die übliche Zeitvorgabe (m) verlangt nur ein Anfangsdatum, die maximale Simulationszeit und die Vorgabe der Jahresbetriebsstunden (falls abweichend von der Ganglinie nach Abb. 5). Die Belastung und die Belastungsdauer folgt einer Monats- und Tagesganglinie. Die monatliche Belastung ist in Abb.5 als Prozentsatz des Betriebszeit bei einer vorzugebenden Nennleistung aufgezeichnet. Die Monatsganglinie kann jedoch auch für Wärme und Kältelieferung gesondert vorgegeben werden.

Jeder Tag wird in 4 Lastzeitschritte und 4 Ruhezeitschritte unterteilt (abwechselnd Last und Ruhe), diese 8 Zeitschritte werden wiederum in je 5 Teilzeitschritte unterteilt, so dass jeder Tag in 40 Zeitschritten simuliert wird. Die monatlich unterschiedliche Belastung der Anlage, die im Betriebszustand stets die Nennleistung liefern soll (falls thermodynamisch möglich), findet ihren Niederschlag in der unterschiedlich langen Dauer von Last- und Ruheschritten.

Die Jahresbetriebsstundenanzahl nach Ganglinie beträgt für Heizung 2550 h/Jahr, für den Kältebetrieb 1920 h/Jahr und den Betrieb zur Oberflächenheizung 3140 h/Jahr. Die Kurven können auch begrenzt parallel verschoben werden durch Vorgabe anderer Jahresbetriebsstunden.

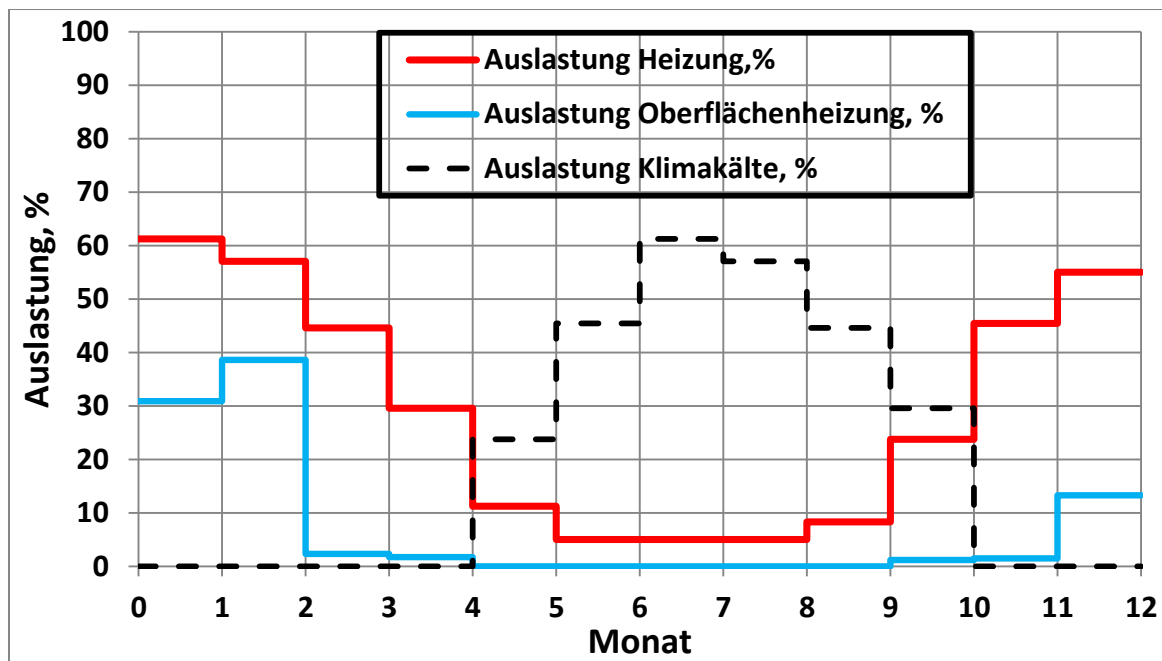


Abbildung 5: Zeitliche Auslastung bei Heiz- und Kühlbetrieb (Jahresbetriebsstunden bei Heizung: 2550 h, bei Oberflächenheizung: 637 h, bei Kühlung 1925 h).

3.3 Steuerung der Wärme- und Kälteleistung

Wärmeleistung

Die vorzugebende Wärmeleistung (auch Wärmeleistung bei Kältebetrieb) ist stets die mit der Anlage angestrebte totale Leistung, einschließlich der Abwärme eines möglichen Gas-/Dieselmotors (Gaswärmepumpe). Die dazu notwendige geothermische Leistung wird vor jedem Zeitschritt abgeschätzt, so dass u.U. die angestrebte totale Leistung nicht ganz exakt eingehalten wird.

Die Steuerung der Anlage erfolgt mit dem Ziel einer maximal möglichen Temperatur am Sondenkopf (am Wärmetauscher) unter Einhaltung der vorgebenen Leistung (T) oder einer maximal möglichen Leistung bei fest vorgegebener Systemtemperatur (L).

Die volle Ausnutzung des instationären Speichervermögens stellt einen Vorzug dar, der die Auslegung der Anlage, insbesondere die erforderliche Bohrlochtiefe, optimieren kann. Dazu ist aber die ständige Kontrolle der aktuell möglichen Leistung der Wärmesonde und ihre prozessabhängige Steuerung erforderlich.

Bei **Direktverdampfersonden** realisiert das Programm die geforderte Wärmeleistung bei (T) stets unter vollständiger Ausnutzung der effektiven Filmlänge = $\text{Verdampferlänge} \cdot \text{Filmeffizienz} / 100$ (Filmeffizienz ist der Prozentsatz der durch den Verdampferfilm ausgenutzten Rohrrinnenfläche, in der Regel 80-100 %). Erst wenn der gesamte Wärmezustrom zum Kältemittel-Film nicht mehr ausreicht, um das Angebot an Flüssig-Kältemittel vollständig zu verdampfen, reduziert der Algorithmus iterativ die Kopftemperatur bis zum Minimum (vorgegebene Systemtemperatur), wenn notwendig auch die Leistung (und damit den Kältemittel-Massenstrom) so, dass das gesamte Wärmeangebot des Erdreichs vollständig ausgenutzt wird. Damit ist der jeweils optimale Betrieb der Sonde gewährleistet. Bei der Variante (L) wird die vorgegebene Leistung bei vorgegebener Systemtemperatur so lange realisiert, bis die gesamte effektive Filmlänge ausgeschöpft ist.

Bei **Wasserzirkulationssonden** hat auch die Zirkulationsrate großen Einfluss auf die Wärmeleistung. Die Rate kann so gewählt werden, dass die Leistung maximal ist, jedoch die Spreizung zwischen Injektionstemperatur (kalt) und Austrittstemperatur (heiß) nicht kleiner als 2 K und nicht größer als 10 K ist.

Kälteleistung

Die Kälte wird aus dem Wasser/Ethanolkreislauf entnommen. Die Zirkulationsrate des Wasser/Ethanolkreislaufes wird bei Variante „**Steuerung nach Leistung (L)**“ so gesteuert, dass die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Nachlauf der Klimanlage nicht kleiner als 6 K ist, bei Variante „**maximale Kopftemperatur (T)**“ bleibt die Spülrate konstant.

Im Klimatisierungs- und Heizbetrieb (k) erfolgt die übergeordnete Steuerung nach der in dem jeweiligen Monat vorgegebenen Betriebsweise (Heizung oder Kühlung). Die Heizungssteuerung erfolgt wie oben beschrieben. Die Steuerung der Kälteleistung zielt immer auf Maximalleistung in der Weise ab, dass eine vorgegebene maximale Temperatur des Kühlmittels nach dem Wärmetausch (= Injektionstemperatur des Kühlmittels) bei vorgegebenem Ethanol/Wasser-Volumenstrom im Kühlkreislauf ausgeschöpft wird.

- Falls in den Eingabedaten Monate mit dominanter Kälteleistung (ik1...ik2-Monate) vorgegeben werden und alle anderen Monatsangaben (ik3...ik6) Null sind, dann wird die Wärmepumpe abgeschaltet und die Kälte nur „ausgespült“.
- Ist ein Monatsbereich (ik3, ik4) mit nächtlichem Wärmebetrieb vorgegeben, dann ruht die Wärmepumpe in 75% der Tagesauslastungszeit und Kälte wird nur ausgespült, in den restlichen 25% arbeitet die Wärmepumpe gegen die minimale Heizungsvorlauftemperatur, aber es wird keine Kälte produziert (Nachtbetrieb).

- Ist ein Monatsbereich (ik5, ik6) vorgegeben, dann arbeitet die Wärmepumpe während der gesamten Tagesauslastung bei gleichzeitiger Kälteproduktion.

Beachte: In der zusätzlichen Inputdatei **name.inp** können Tagesauslastungszeiten für Wärme und Kälte für jeden Monat vorgegeben werden. Wenn z.B. in einem Monat ohne dominanten Kältebetrieb eine Kälteauslastung > 0 angegeben ist, dann gilt die Auslastungszeit des Wärmebetriebes, jedoch wird in dieser Zeit auch Kälte produziert.

3.4 Flutpunkt-/Staupunktberechnung beim Direktverdampferverfahren

Bei der Direktverdampfung strömt i.d.R. der Dampf im gleichen Rohr aufwärts, in dem auch das flüssige Kältemittel als Film bzw. in Tröpfchenform abwärts strömt. Dabei kann es zum Aufstauen des Filmes (Staupunkt/Flutpunkt) kommen, wobei der Dampf einen Teil des flüssigen Kältemittels aufwärts mitreisst. Dann wird dieser Teil zu einer Rekondensation des Dampfes führen und im Ergebnis wird die Wärmeleistung deutlich verringert werden.

Die Berechnung der Staupunktgeschwindigkeit kann nach mehreren Theorien vorgenommen werden.

Nach Hinweisen von Peterlunger u.a (2005) erscheint die Theorie von Tien & Chung (1978) als geeignet. Nach Paulusch (2009) ergaben die Theorien von Feind und von Alekseev ebenfalls praktisch sinnvolle Ergebnisse. Turner et al. (1969) haben Untersuchungen am Kräftegleichgewicht von fallenden Flüssigkeitströpfchen an einem Flüssigfilm durchgeführt und mit Messergebnissen beim Wasser- und Kondensataustrag aus Erdgassonden verglichen – auch diese Theorie erscheint anwendbar.

Alle Theorien legen ein Kräftegleichgewicht zwischen dem aufwärts strömendem Dampf und der abwärts strömenden Flüssigkeit (nicht aber eine kritische Wärmestromdichte) zugrunde. Im Ergebnis erhält man die Staupunktgeschwindigkeit, die im Betrieb stets unterschritten werden sollte.

Im Programm sind derzeit alle Berechnungen enthalten, der Mittelwert wird der Anlagensteuerung zugrundegelegt. Die Einhaltung der Staupunktbedingung im obersten Sondenabschnitt wird im Programm ständig überwacht und falls sie überschritten wird, werden die Vorgabewerte automatisch geändert.

Bei Zielvorgabe „**Steuerung nach Leistung**“ (ANTSTEU = L) wird die geothermische Leistung so reduziert, dass die Staupunktgeschwindigkeit des aufsteigenden Dampfes nicht überschritten wird.

Bei Zielvorgabe „**Steuerung nach maximal möglicher Kopftemperatur**“ (ANTSTEU = T) wird bei Überschreitung der Staupunktgeschwindigkeit zunächst versucht, die Bedingung durch Absenkung bzw. Erhöhung der Verdampfungstemperatur einzuhalten. Wenn dies nicht möglich ist, schaltet der Algorithmus auf „**Steuerung nach Leistung**“ um. Dabei können gewisse Oszillationen auftreten. Es wird empfohlen, bei Sonden mit Staupunktverletzung die „**Steuerung nach Leistung**“ zu nutzen und die Systemtemperatur in Varianten zu verändern.

4 Verifizierung des Programmes

Das Programm **ModTherm** kann nur an einfachen Testvorgängen verifiziert werden, für die eine analytische Lösung existiert. Dazu stehen die Lösungen für den Fall einer inneren Randbedingung 1. Art und 2. Art (Häfner, Sames & Voigt, 1992) bereit, die aber numerisch nur genähert auszuwerten sind (Näherungen für kleine und große dimensionslose Zeiten). Als eine gute Näherung für den Fall einer Randbedingung 1. Art im Bohrloch hat sich für alle Zeitbereiche die Lösung von Cekaljuk (1965) herausgestellt:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda L (T_{\text{geoth}} - T_B)}{\ln\left(1 + \sqrt{\pi a t / r_B^2}\right)} \quad (6)$$

bzw. für eine lineare geothermische Temperaturverteilung

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda \left\{ (T_0 - T_B)L + \frac{\varpi L^2}{2} \right\}}{\ln\left(1 + \sqrt{\pi a t / r_B^2}\right)} \quad (6a)$$

wobei T_B und r_B die Temperatur und der Radius des Bohrloches, T_{geoth} die geothermische Temperatur, L die Sondenlänge, ϖ der Temperaturgradient (K/m), T_0 die Oberflächentemperatur und a die mittlere Temperaturleitzahl des Erdreiches sind.

Abb. 6 zeigt den Vergleich der Ergebnisse von **ModTherm** mit der Lösung, Gl. (6).

Eine zweite analytische Lösung für eine U-Rohrsonde wurde von Häfner & Wagner (2015) abgeleitet und ist ebenfalls dargestellt.

Die Daten für Abb.6 sind: Sondenlänge $L=100\text{m}$, Bohrlochradius $r_B=80\text{ mm}$, U-Rohr-Außendurchmesser 32 mm , Wanddicke 2.6 mm , Wärmeleitfähigkeit Gestein $\lambda=2\text{ W/(m K)}$, Dichte $\rho=2800\text{ kg/m}^3$, spez. Wärme $c=820\text{ J/(kg K)}$, konstante geothermische Temperatur $T_{\text{geoth}}=10^\circ\text{C}$, geothermischer Gradient $\varpi=0$, Systemtemperatur (Wasserinjektionstemperatur) $T_B=0^\circ\text{C}$. Für die Cekaljuk-Lösung (6) wurde T_B als mittlere Temperatur über der Sondenlänge mit 0.4°C (Wassertemperatur 0°C am Kopf, 0.8°C auf der Bohrlochsohle).

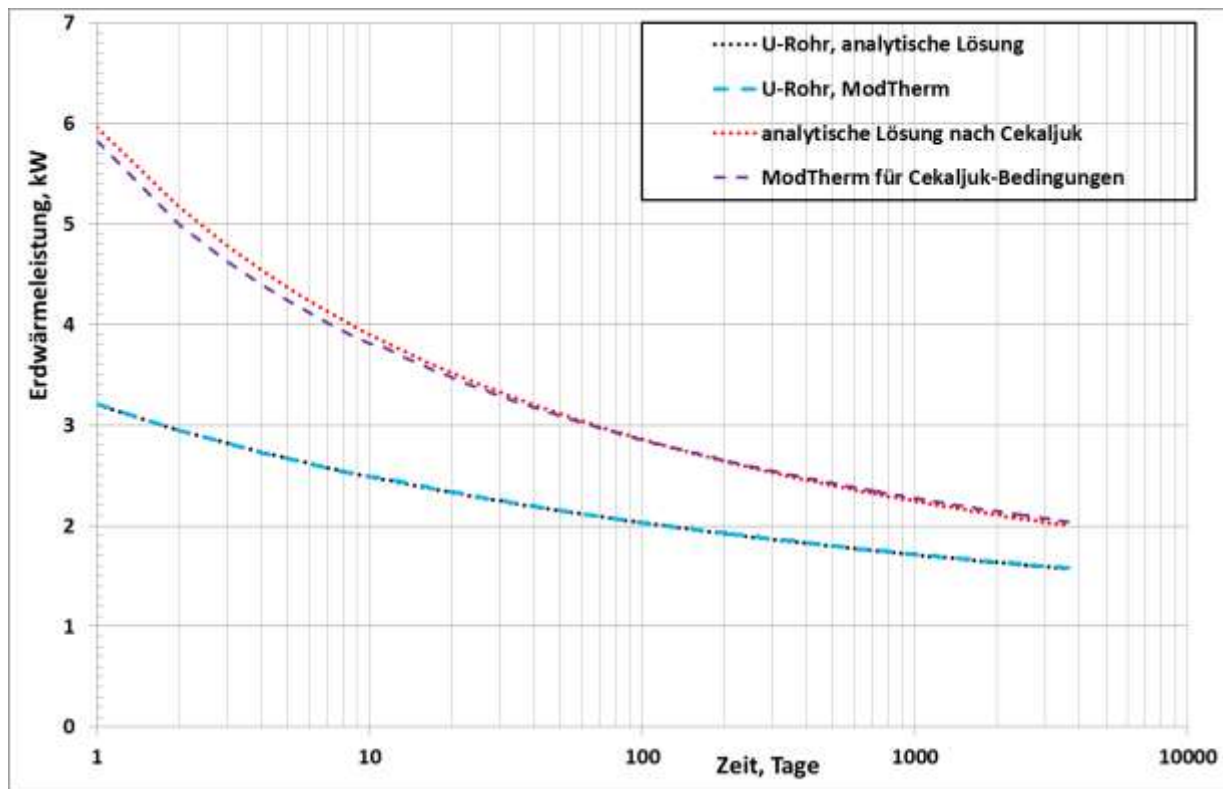


Abbildung 6: Vergleich von numerischer und analytischer Lösung nach Cekaljuk (1965) und nach Häfner & Wagner (2015).

Für **Direktverdampfersonden** wurde die Begrenzung der Leistung durch Überschreitung der Staupunktgeschwindigkeit (Flutpunkt) an einem von Kruse, Rüssmann & Stadtländer (2004) veröffentlichten Versuch verifiziert.

Der Versuch in einem 7 m langen Verdampferrohr mit 25 mm Innendurchmesser ergab bei 35°C Aussentemperatur (Wasserbad) und 13°C Verdampfungstemperatur eine maximale Leistung von 2000 W, die ModTherm –Berechnung 2050 W.

5 Kurzbeschreibung des Programmes *ModTherm*

Dieser Bericht enthält das Programm *ModTherm* in der Version 1.20, es arbeitet unter Windows.

5.1 Datenorganisation

Das Programm **ModTherm.exe** (oder **ModTherm_o.exe** als optimierte Version) erfordert das Vorhandensein folgender Dateien (Files):

ModTherm.nam - enthält den Pfad mit dem Namen „**name**“ des Jobs (Pfad=Projekt-Directory),

license.THERM - Binärfile mit thermodynamischen Stoffwerten und einer zeitlich befristeten Lizenz (Lizenzfile).

Optionale Files:

name.dia – Gespeicherte Dialog-Inputdaten,

name.inp - Zusätzliche Inputdaten

Die Datenorganisation in Directories kann auf zwei verschiedene Weise erfolgen.

Alle Daten stehen in einer Projekt-Directory (**ModTherm.exe**, **ModTherm.nam**, Inputdaten, Resultate) oder

In einer Programm-Directory stehen **ModTherm.exe** und **ModTherm.nam**. In der Projekt-Directory, deren Pfad in **ModTherm.nam** gemeinsam mit dem Namen **name** enthalten ist, stehen alle Inputfiles und alle Resultate.

Beispiel für die Datei: ModTherm.nam

d:\geothermie\ModTherm\demo_ModTherm\demo1

Der Lizenzfile **license.therm** muß entweder in der Projekt-Directory oder in einer Directory **C:\License** stehen.

Die Resultate der Rechnung stehen in der Projekt-Directory

- **name_pro_tag.res**, **name_amo_tag.res** etc. – Tägliche Resultate, am Ende des letzten Lastzeitschrittes je Tag (**pro** für Propan, **amo** für Ammoniak, **eth** für Ethan, **co2** für Kohlendioxid und **h2o** für Wasser als Zirkulationsmedium),
- **name_pro_alle_T.res**, **name_amo_alle_T.res** etc.– Alle Resultate am Ende der Last- und Ruhezeitschritte,
- **name.dat** – Kurzform der Datei name...res
- **name.kum** – Monatliche Wärme-/Kältemengen (nur bei Ganglinienbetrieb)
- **name.obs** – zeitliche Ganglinien der Temperatur in vorgegebenen Observationspunkten
- **name.win** - Resultate für den Wintertag mit den höchsten Leistungsanforderungen
- **ews.xx** – Daten für nachfolgende 3D-Berechnungen mit dem Programm *ModGeo3D* (**xx** bedeutet dabei die Sondennummer).

- diverse Files mit gewählten Temperatur/Datenverteilungen der Anlage, die im Dialog erstellt werden.

Die möglichen Kontroll- und Fehler-Files sind:

- **name.kon** - Kontrolle der Inputdaten
- **name.err** - Error-File mit allen Fehlermeldungen und Informationen zur Steuerung.

5.2 Eingabe im Dialog

Das Programm arbeitet mit einer Dialog-Eingabe in sehr einfacher Form und einer zusätzlichen Eingabe. Nach dem Programmstart ist zu entscheiden, welche Diskretisierung zu wählen ist:

- **r-z-Geometrie** für die Bauweisen U-Rohr, Doppel-U-Rohr, Koaxial, alle Direktverdampfervarianten,
- **r-φ-z – Geometrie** für Ringrohrsonden mit Wasserzirkulation.

Die Dialog-Eingabe meldet sich anschließend, falls nicht das Einlesen einer früher gespeicherten Dialog-Datei (**name.dia**) gewählt wird. Sie ist selbsterklärend, kann aber nur einfache homogene Modelle mit konstanten Parametern (Sondenabmessungen, Eigenschaften des Gesteins etc. sind konstant) abbilden. Anlage 1 enthält ein Beispiel.

Falls die Heißwasserförderung aus einer geologischen Schicht berechnet werden soll, muss unter dem Input „**Zirkulation in Ringraum**“ nach dem Input (z,u,g...) die Tiefe der Schicht ($z\text{-inject}=z_{\text{Mittelpunkt}}$) eingegeben werden, aus der das Wasser gefördert wird. Die „**minimale Verdampfungstemperatur (=Systemtemperatur)**“ entspricht der Injektionstemperatur, die „**Temperatur der Klimaanlage**“ ist jedoch die Injektionstemperatur des Wassers in der Tiefe (z-inject).

Oberhalb der Heißwassereintrittstiefe, d.h. für alle Tiefen $z \geq z\text{-inject}$, ruht im Ringraum das jeweils vorhandene Fluid. Dieser Ringraum isoliert den Steigraum, weil bei ruhendem Fluid nur die Wärmeleitfähigkeit von ruhendem Wasser (ca. 0.5-0.6 W/(m K)) berücksichtigt wird. Falls der Ringraum gasgefüllt ist, muss der Wärmewiderstand des Gases in der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohres berücksichtigt werden.

ACHTUNG: die immer mögliche thermische Konvektion im Ringraum wird dabei vernachlässigt (man sollte soe konstruktiv verhindern !)

Falls inhomogene Probleme, d.h. mit tiefen- oder zeitabhängigen Eigenschaften, zu bearbeiten sind, muß der Inputfile **name.inp** (s.Anlage 2) eingelesen werden, der die Daten des Dialogs teilweise oder ganz ersetzt.

Falls die Sondenanzahl größer als 1 ist, müssen sich jedoch alle Inputdaten nur auf eine einzige Sonde beziehen (das betrifft alle Leistungsvorgaben und Spülraten).

In den Resultatdateien werden alle Leistungen, Wärme-/Kältemengen der Gesamtanzahl der Sonden ausgegeben.

Standardwerte

Falls nichts anderes in einer Datei name.inp (s.Pkt. 5.3) vorgegeben ist, werden u.a. folgende Standardwerte genutzt (jeweils Dichte (kg/m³), spez. Wärme (J/(kg K) und Wärmeleitfähigkeit (W/(m K))

- 7800.,465.,50. Stahl
- 960.,2300.,0.42 PE
- 1050.,1700.,0.24 PA
- 1600.,1000.,0.8 bzw.1.7 Verfüllmaterial
- Sondenanzahl: 1
- Für die nachfolgende 3D-Simulation wird als Standardwert des thermodynamischen Einzugsbereiches der Wert „0.“ Vorgegeben – dann wird im 3D-Programm der Wert in Metern berechnet nach

$$r_E = \sqrt{2.25 a t}$$

wobei a-Temperaturleitzahl (m²/s) und t-Zeit (s) sind.

5.3 Aufbau des Input-Files name.inp

Die Eingabe der Daten erfolgt mit Hilfe von Schlüsselwörtern (**Keywords**), die stets durch das Zeichen # gekennzeichnet sind. Folgende Keywords sind möglich:

- #ite** - iteration, implicit-explicit
- #law** - Monatsweise Auslastung für Wärmebetrieb, in Betriebsstunden je Tag, h
- #lak** - Monatsweise Auslastung für Kältebetrieb, in Betriebsstunden je Tag, h
- #tsy** - Systemtemperatur, °C
- #luf** - Luft-Tagesmitteltemperaturen je Monat, °C
- #wtl** - spezifische Leistung eines Luft-Kältemittel-Wärmetauschers, kW/K und minimale Betriebstemperatur des Wärmetauschers, °C
- #rad** - Aussen-Radius der Elemente, m
- #zko** - z-Koordinate (m), Beginn ab Oberkante
- #tan** - Anfangstemperatur, Grad C
- #log** - Logische Matrix zur Kennzeichnung der Volumenelemente(aktiv, passiv, Rand)
- #wlg** - Waermeleitfaehigkeit Gestein,ungefroren W/(m K)
- #wlf** - Waermeleitfaehigkeit Gestein,gefroren W/(m K)
- #rog** - Dichte Gestein,ungefroren kg/m³
- #rof** - Dichte Gestein,gefroren kg/m³
- #cgw** - Spezifische Waerme, Gestein, ungefroren J/(kg K)
- #cgf** - Spezifische Waerme, Gestein, gefroren J/(kg K)
- #por** - Porositaet des Gesteins
- #win** - Winkel der Sonde zur Vertikalen, Grad
- #fro** - Gefriertemperatur, oC

#ken - Kenntemperatur, °C, zur Ausgabe des Radius mit der Kenntemperatur
#jet - Steuerung des Wasser/Ethanolkreislaufes
#cop – Daten für die Kennlinie der Wärmepumpe
#zen- Zentralraum
#ri1- Raum 1
#ri2 - Raum 2
#ri3 - Raum 3
#ri4 - Raum 4
#ri5 - Raum5
#eof - end of file

Im Beispiel **demo** ist die Reihenfolge der Dateneingabe unter jedem Schlüsselwort erklärt. Datenfelder werden stets so beschrieben, dass für einen Bereich von Volumenelementen ein Wert gilt. Nachfolgende Bereichsdaten überschreiben vorhergehende Daten.

Beispiel: 1, 5, 3, 7, 3.0 bedeutet:

Vom Radius-Nr. 1 bis Radius-Nr.5, von Schicht-Nr.3 bis Schicht-Nr.7 gilt der Wert=3.0.

Es müssen nicht alle Keywords vorgegeben werden, falls notwendige Daten fehlen, wird eine Fehlerausschrift erzeugt.

5.4 Aufbau der Zentral-und Ringraum-Inputdaten (#zen, #ri1, #ri2,..., #ri5)

Die Inputdaten für die einzelnen Fließräume werden stets in der gleichen Reihenfolge (getrennt durch Komma) in einer Zeile vorgegeben. Die Daten einer Zeile gelten dabei für die Schichten k1 ...k2.

Eine Folgezeile kann Daten für weitere Schichten enthalten. Zu beachten ist, dass die Daten von Folgezeilen möglicherweise frühere Zeilen überschreiben.

- 1) k1 nachfolgende Daten gelten von Schicht k1
- 2) k2 bis Schicht k2
- 3) Index = 0: ruhender Raum,
 = -1: Ethanol-Injektion,
 = -2: Ethanol-Produktion (Ausströmung)
 = -3: Ethanol-Ausströmung-Kreislauf,
 = -4: Ethanol-Produktion-Kreislauf mit Klimatisierung
 = 1: Kältemittel-Injektion, Filmbildung, Verdampfung
 = 2: Heiss-Gas-Produktion, ohne Trennung vom Kaltgas
 = 3: Kaltgas-Abwärtsströmung, ohne Trennung vom Heissgas
- 4) Wärmeleitfähigkeit des Mediums, W/(mK)
- 5) Massenstrom (kg/s) am oberen Rand (> 0: Einströmung abwärts,
 < 0: Ausströmung aufwärts), die Eingabe kann für Kältemittelräume = 0 sein.
- 6) Temperatur am oberen Rand, Grad C

Achtung zu Temperatur-Eingabe im Ethanolssystem (Injektion und Produktion):

bei getrenntem Kreislauf (Index-Inj.= -1 und Index-Prod.= -2)

Temperatur bei Index -1 bedeutet Injektions-Temperatur

Temperatur bei Index -2 hat keine Wirkung

bei geschlossenem Kreislauf (Index-Inj.= -1 und Index-Prod.= -3)

Temperatur bei Index -1 bedeutet Anfangstemperatur

Temperatur bei Index -3 hat keine Wirkung

Bei geschlossenem Kreislauf mit Klimatisierung

(Index-Inj.= -1 und Index-Prod.= -4)

Temperatur bei Index -1 bedeutet Injektions-Temperatur

Temperatur bei Index -4 hat keine Bedeutung

7) Druck am oberen Rand, Pa absolut,

8) Wanddicke des Rohres, m,

9) Dichte des Rohrmaterials, kg/m^3 ,

10) Spezifische Wärmekapazität des Rohrmaterials ($\text{J}/(\text{kg K})$),

11) Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials, $\text{W}/(\text{m K})$

Die Eingabewerte 7-11 können für Kältemittelräume entfallen (=0).

5.5 Resultate

Die Ergebnisausgabe in den Files **name....res** ist nur kurz erklärt. Weitere Ausgaben werden im Dialog abgefragt.

Die Überschriften im Tabellenkopf bedeuten ausführlich:

Zeit, d :	Zeit nach Simulationsbeginn in Tagen
Pdampf, bar:	Dampfdruck/Wasserdruck am Kopf der Sonde, bar
Qdampf, kg/s	Massenstrom des Heissdampfes/Wassers am Sondenkopf, kg/s
Pgeoth	Erdwärmeleistung, geothermische Leistung, kW
P-wp	Leistungsbedarf von Wärmepumpe+Umwälzpumpe, kW
P-total, kW	Gesamtwärmeleistung (einschl. 90% der Abwärme Gasmotor), kW
T-kopf	Temperatur des Heissdampfes/Wasser am Sondenkopf), °C
T-Vorlauf, °C	Temperatur im Vorlauf der Heizung, °C
P-kaelte	Kälteleistung, kW
Tw-kopf	Temperatur des Wassers/Sole/Ethanol am Sondenkopf, °C
Qspül,l/s	Spül (Zirkulations)-Rate im Wasser-Kreislauf, l/s
Ausl,%	Auslastung der Filmverdampfungslänge (Sondenlänge), %
W-total	produzierte Gesamt-Wärmemenge der Anlage (einschl. Wärmepumpe), ab Zeitpunkt t=0, MWh
W-erdreich	dem Erdreich (Gebirge) entzogene (<0) bzw. zugeführte (>0) Wärmemenge über Sonde und Erdoberfläche, ab t=0, MWh
W-Kaelte, MWh	Gesamt-Kältemenge ab t=0, MWh
FRO-max	maximaler Radius des Frostmantels, m
RW-1K,m	mittlere Reichweite der Temperaturabsenkung 1 K
W-wp, MWh	Gesamt-Antriebsarbeit von Wärmepumpe+Umwälzpumpe, ab t=0, MWh
Arb.zahl	Arbeitszahl, auflaufend ab jeweiligem Jahresbeginn (Arb.zahl = W-total im laufenden Jahr / W-wp im laufenden Jahr)
FRO-GOK, m	Frostradius an der Geländeoberkante, m.

PRIM-JAZ Arbeitszahl, bezogen auf die eingesetzte Primärenergie.

Bei Elektroantrieb der Wärmepumpe sind die Leistungen und Arbeitszahlen auf den Elektroenergiebedarf von Wärmepumpe + Umwälzpumpe (im Fall der Wasser/Ethanolzirkulation) bezogen. Im Falle der Antriebs mit Gas- bzw. Dieselmotor sind die Werte auf den jeweiligen mechanischen Energiebedarf der Wärmepumpe bezogen. Die Zahl PRIM-JAZ bezieht die Leistung auf den Primärenergiebedarf.

Wenn die Sondenanzahl größer als 1 ist, gelten alle Ergebnisse, die sich auf Leistung / Wärme- und Kältearbeit beziehen, für die Summe der Sonden.

Temperaturfelder können als ASCII (A) oder TECPLOT (t) - Dateien ausgegeben werden. Dabei ist jeweils anzugeben:

von Radius-Nr. **i1** bis Radius-Nr. **i2** und von Schicht **k1** bis Schicht **k2**

(Eingabe: i1, i2, k1, k2).

Ausgegeben werden der Radius r, die z-Koordinate und die Temperatur. Dabei können für z und r Scale-Faktoren zur besseren grafischen Darstellung (Surfer) gewählt werden.

Umfangreiche Informationen der Fließräume und können als Ringraum-Daten ausgegeben werden

Dazu sind die Nummern i1 und i2 (Radius-Nr. i1 bis i2) und Parameter-Nummern j1 und j2 (von j1 bis j2) einzugeben. Die Ausgabe erfolgt für alle Schichten, in denen der Fließraum aktiv ist.

Die Bedeutung der Parameternummern sind nachfolgend aufgelistet.

Parameternummern (j) der Ringräume der Wärmesonde

- (1) Index, (Integer), s. Kap.4.4
- (2) Wanddicke des Rohres, m
- (3) Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials, W/(m K)
- (4) Absolutdruck p (bar)
- (5) Temperatur (Grad C)
- (6) Massenstrom Kältemittel-Flüssig (kg/s, abwärts=positiv, aufwärts=negativ)
- (7) Geschwindigkeit, m/s
- (8) Dampfstrom (kg/s)
- (9) Wärmeübergangszahl-innen, W/(m² K)
- (10) Wärmeübergangszahl-aussen, W/(m² K)
- (11) Filmdicke, m
- (12) Quellen an Kältemitteldampf, kg/s
- (13) Senken an Kältemitteldampf, kg/s
- (14) Massenstrom Gas, kg/s, abwärts=positiv
- (15) Rohrmaterial außen - Dichte, kg/m³
- (16) Rohrmaterial außen - Spezifische Wärmekapazität, J/(kg K)
- (17) Rohrmaterial außen - Wärmeleitfähigkeit, W/(m K)
- (18) oberer Elementerand, Massenstrom, kg/s
- (19) oberer Elementerand, Temperatur, Grad C

-
- (20) oberer Elementerand, Druck, bar absolut
 - (21) unterer Elementerand, Massenstrom, kg/s
 - (22) unterer Elementerand, Temperatur, Grad C
 - (23) unterer Elementerand, Druck, bar absolut
 - (24) Quelle für Heissdampf, aus Injektionsrohr, kg/s
 - (25) mittlere Temperatur zwischen Raum iringmax und iringmax+1
(nach Wärmewiderständen, gewogen gemittelt, nur im äußersten Ringraum
(i = iringmax) gespeichert). Diese Temperatur ist zum Vergleich mit
Messwerten geeignet.
 - (26) Frostradius in m, logarithmisch gemittelt zwischen Zellmittelpunkten.
Dieser Wert ist im ersten Ringraum i = 1 gespeichert.
 - (26) Kennradius (bei Kenntemperatur) in m, logarithmisch gemittelt zwischen
Zellmittelpunkten. Dieser Wert ist im ersten Ringraum i = 2 gespeichert.

Literatur

- Boy, S., Th. Wilsnack, F. Häfner & N. Hoth (2001): Numerische Simulation dichtebeeinflusster und reaktiver Stofftransportprozesse im Grundwasser. Grundwasser, (10), 1, S.15-22, Springer-Verlag.
- CoolPack (2001): A Collection of Simulation Tools for Refrigeration. Dept. Mechanical Eng., Technical University of Denmark, Lyngby (www.et.dtu.dk/CoolPack)
- Cekaljuk, E.B. (1965): Termodinamika neftjanogo plasta. Verlag Nedra, Moskau.
- Hamann, J. (2002): Berechnung/Modellierung des Stofftransportes und Wärmeüberganges für tiefe Erdwärmesonden nach dem Kältemittelzirkulationsverfahren. Studie und Zwischenbericht zum Projekt „Geotherm“, im Auftrag der AETNA Energiesysteme Wildau und der Stadtwerke Bremerhaven (unveröff.)
- Hamann, J., St. Wagner, F. Häfner & T. Friedel (2000): Kältemittel-Wärmesonden – ein wirtschaftliches Verfahren zur Wärme- und Energiegewinnung aus Tiefbohrungen. Studie, Klett-Ingenieur-GmbH und Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg (unveröff.)
- Häfner, F., D. Sames & H.D. Voigt (1992): Wärme- und Stofftransport. Springer Verlag, Berlin.
- Häfner, F., S. Boy & A. Behr (1999): Calibration and sensitivity analysis of the 3D Cape Cod tracer test. ModelCare 99, Zurich, IAHS Publ.no.265, p.250-255.
- Häfner, F. & S. Boy (2005): Das Simulationsmodell ModMST für den reaktiven Mehrkomponenten-Stofftransport und den Wärmetransport im Untergrund. IBeWa Ingenieurpartnerschaft, Freiberg (unveröff.)
- Häfner, F. & R.M. Wagner (2015, im Druck): Berechnung und Bau von Erdwärmeanlagen. Springer Verlag, Berlin.
- Kruse, H., H. Rüßmann & C. Stadtländer (2004): Entwicklung einer CO₂-Erdwärmesonde nach dem Prinzip des Wärmerohres. KI Luft- und Kältetechnik, (2), S. 54-61.
- Pannike, S., M. Kölling, B. Panteleit, J. Reichling, V. Scheps & H.D. Schulz (2006): Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahren von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. Grundwasser (11), 1, S.6-18.
- Paulusch, W. (2009): Berechnung von Erdwärmesonden nach dem Direktverdampfungsverfahren. Unveröff. Zwischenbericht, Hochschule Magdeburg-Stendal, Institut für Elektrotechnik und BLZ Geotechnik GmbH, Gommern.

Peterlunger, A., M. Ehrbar, S. Bassetti & E. Rohner (2005): Pumpenlose Erdwärmesonde. Schlussbericht der Phase 1, Bundesamt für Energie der Schweiz.

Tien, C.L. & K.S. Chung (1978): Entrainment limits in heat pipes. Proc. 3rd Int. Heat Pipe Conf., Palo Alto, Cal., 36-40.

Turner, R.G., M.G. Hubbard & A.E. Dukler (1969): Analysis and Prediction of Minimum Flow Rate for the Continuous Removal of Liquids from Gas Wells. SPE paper 2198.

VDI-Wärmeatlas (2000), Verlag VDI, Düsseldorf.

Anlage 1: demoU2.dia (für Wasserzirkulation in Doppel-U-Rohrbauweise)

Anlage 2: demoRing.dia (für Wasserzirkulation in Ringrohrbauweise)

Anlage 3: demo.inp (mögliche Zusatzdaten für alle Bauweisen, zu bearbeiten)