Bachelorarbeit

Vergleich der Berechnungsmethoden zur Auslegung eines geothermisch genutzten Erdwärmesondenfeldes zwischen EED (Earth-Energy-Designer) und SPRING (Simulation of Processes in Groundwater)

> Jacqueline Valencienne Orlikowski 17.07.2012

Hochschule Ostwestfalen-Lippe Fachbereich 8 Umweltingenieurwesen und Angewandte Informatik

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Klaas Rathke Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Christoph König

Inhalt

InhaltII
Abbildungsverzeichnis IV
Tabellenverzeichnis
Symbolverzeichnis
Lateinische SymboleVII
Griechische SymboleVIII
Abstract X
1. Überblick der Berechnungsmethoden zur Auslegung von geothermischen Anlagen 1
2. Beschreibung der Berechnungsmethoden
2.1 Beschreibung der Berechnungsmethoden von EED (Earth Energy Designer) 2
2.1.1 Simulation auf Basis analytischer Lösungen
2.1.2 Physikalischer Hintergrund 4
2.1.3 Umsetzung im Simulationsprogramm EED Version 3.0
2.2 Beschreibung der Berechnungsmethoden von SPRING
2.2.1 Simulation auf Basis Finiter Elemente mit numerischer Lösung
2.2.2 Physikalischer Hintergrund
2.2.3 Umsetzung im Simulationsprogramm SPRING Version 4.0
3. Berechnungsbeispiel Bürogebäude in Dortmund 41
3.1 Projektbeschreibung des Bürogebäudes
3.2 Berechnungsbeispiel mit EED 42
3.2.1 Untergrundeigenschaften
3.2.2 Bohrungen und Erdwärmesonden 42
3.2.3 Thermischer Bohrlochwiderstand
3.2.4 Wärmeträgerflüssigkeit 44
3.2.5. Grundlast
3.2.6 Spitzenlast

3.2.7 Dauer der Simulation
3.2.8 Berechnung
3.3 Berechnungsbeispiel mit SPRING
3.3.1 Erstellen von Strukturdaten
3.3.2 Erstellung von Konturdaten
3.3.3 Knotenerzeugung
3.3.4. Erzeugung von Elementen 50
3.3.5 Stabilitätskriterien für FE- Modelle 51
3.3.6 Zuweisung von Attributen
4. Ergebnisse beider Programme
4.1 Ergebnis EED
4.2 Ergebnis SPRING 64
4.2.1 Variante mit einheitlicher Untergrundtemperatur
4.2.2 Variante mit ansteigender Untergrundtemperatur
4.2.3 Grafische Auswertung 65
5. Gegenüberstellung der Ergebnisse
5.1 Anpassung der Ergebnisse73
5.2 Vergleich der Ergebnisse75
6. Fazit
LiteraturverzeichnisXI
SelbstständigkeitserklärungXI

Abbildungsverzeichnis

Verzeichnisse

Abbildung 29 Übersicht Größen an einer Erdwärmesonde 58
Abbildung 30 Dichteabhängige Steigungskurve in SPRING 60
Abbildung 31 Lastfall Heizen, Entwicklung Fluidtemperatur während 25 Jahre
Betriebszeit (delta h Ingenieurgesellschaft mbH, 2011)
Abbildung 32 Lastfall Heizen, mittlere Fluidtemperatur im 25. Betriebsjahr (delta h
Ingenieurgesellschaft mbH, 2011)
Abbildung 33 Horizonalschnitt in Schicht 15 nach 25 Jahren
Abbildung 34 Lage der Vertikalschnitte
Abbildung 35 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 24 Monaten 68
Abbildung 36 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 30 Monaten 68
Abbildung 37 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 300 Monaten 69
Abbildung 38 Vergleich der Temperaturen der einzelnen Erdwärmesonden
Abbildung 39 Vergleich der Temperaturen am Bohrlochrand an unterschiedlichen
Stellen an der Sonde
Abbildung 40 Vergleich der Fluidtemperaturen zwischen EED und SPRING

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht zu EED	2
Tabelle 2 Basisformen der Sondenkonfiguration in EED	16
Tabelle 3 Überblick zu SPRING	
Tabelle 4 Untergrundeigenschaften	
Tabelle 5 Bohrungen und Erdwärmesonden	43
Tabelle 6 Thermischer Bohrlochwiderstand	
Tabelle 7 Wärmeträgerflüssigkeit	
Tabelle 8 Grundlast	
Tabelle 9 Spitzenlast	46
Tabelle 10 Dauer der Simulation	46
Tabelle 11 Fluidbeschränkungen	
Tabelle 12 Geologischer Aufbau	52
Tabelle 13 Übersicht über die Berechnung der Wärmemenge aus dem Erdreic	h und des
Bedarfs der Wärmepumpe	56
Tabelle 14 Berechnung der monatlichen Wärmeleistung	56
Tabelle 15 Werte für QKON im Modell Dortmund	58
Tabelle 16 Thermische Bodenparameter	61
Tabelle 17 Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Monat	74
Tabelle 18 Temperaturdifferenz zwischen Bohrlochrand und Fluid	74

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

a	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]		
Bu	Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid		
	(shankspacing) [m]		
C _{w,s}	spezifische Wärmekapazität [Ws/(kg K)]		
Co	Courantzahl [-]		
D	symmetrischer Dispersionstensor [m ² /s]		
Es	ESKILSON- Zahl [-]		
Faktor	Anordnungsfaktor [-]		
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]		
$g(Es, \frac{r_B}{H}, \frac{B}{H})$	zugehörige dimensionslose g- Funktion als Funktion der genannten Ähn-		
	lichkeitsparameter [-]		
h	Potenzial [m]		
<i>i</i> _d	Konvektion von Energie [W/m]		
j _k	Konvektion von Energie [W/m]		
$j_{m,s}$	Energiefluss in der Matrix [W/m]		
$j_{m,w}$	Energiefluss im Fluid [W/m]		
K	symmetrischer Tensor der Durchlässigkeit [m/s]		
k	symmetrischer Tensor der Permeabilität [m ²]		
k_r	k _r (S _r) relativer K-Wert [-] (im ungesättigten Bereich)		
L _{ges}	Gesamtbohrmeter [m]		
n	Porosität des Aquifers [-]		
Nbh	Anzahl der Bohrungen [-]		
р	Druck [N/m ²].		
P _e	Pecletzahl [-]		
q	div v (aus Kontinuitätsbedingung) [1/s]		
Q	Umwälzvolumen für alle Bohrungen [l/s]		

T 7	• 1	•
Verze	21Ch	nnisse
10120	-101	mose

verzeiennibbe			
Q	Quellen-/Senkenterm [m ³ /m ³ /s] (Einströmen positiv, Ausströmen nega-		
	tiv)		
Qbh	Umwälzvolumen pro Bohrung [l/s]		
R _b	Thermischer Bohrlochwiderstand von Fluid bis Bohrradius [Km/W]		
ġ	Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge		
	[W/m]		
q _{EWS}	spezifische Wärmeleistung = spezifische Sondenbelastung [W/m]		
R _a	Wärmeübergangswiderstand vom Fluid zum Sondenrohr [Km/W]		
R _c	thermischer Sondenwiderstand von Sondenrohr- bis Bohrradius [Km/W]		
<i>r</i> ₁	Bohrradius [m]		
r ₀	Innenradius des Sondenrohrs [-]		
S ₀	Speicherkoeffizient [1/m], dränbare Porosität im ungespannten Zustand,		
	Kompressibilität von Wasser und Festgestein im gespannten Zustand		
S _{op}	spezifischer Speicherkoeffizient [kg/ms ²] ⁻¹		
S _r	S _r (p) Sättigungsgrad [-] (im ungesättigten Bereich)		
t	Zeit [s]		
Т	Summe aller Energiequellen und -senken [W/m3]		
T*	Temperatur zu- und abfließender Mengen [°C]		
ts	Sondenzeitkonstante [-]		
V	Betrag der Abstandsgeschwindigkeit [m/s]		
v_f	Filtergeschwindigkeit [m/s]		
Z	Lagehöhe [m]		

Griechische Symbole

α	Matrixkompressibilität [kg/ms ²] ⁻¹
α_L	longitudinale Dispersivität [m]
α_{TH}	transversal-horizontale Dispersivität [m]
α_{TV}	transversal-vertikale Dispersivität [m]
β	dimensionsloser thermischer Widerstand Sondenrohr bis Fluid [-]

Verzeichnisse		
β	Fluidkompressibilität [kg/ms ²] ⁻¹	
ς _{w,s}	Diffusionsparameter = $\lambda_{w,s} / (\rho_{w,s}c_{w,s}) [m^2/s]$	
Δl	Länge der Diskretisierung, steht im Verhältnis zur verwendeten Ele-	
	mentlänge, längste Stromlinie in Richtung der Geschwindigkeit in einem	
	Element [-]	
Δt	Zeitschrittweite [-]	
ϑ_B	örtliche gemittelte Temperatur am Bohrlochrand [°C]	
$\overline{\vartheta_B}$	örtliche gemittelte Temperatur am Bohrlochrand, zeitabhängig [°C]	
$\overline{\vartheta_{E,0}}$	ungestörte mittlere Erdreichtemperatur im Sondenfeld, Zeitpunkt: $0 =$	
- /-	vor Inbetriebnahme [°C]	
$\overline{\vartheta_F}$	mittlere Fluidtemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit [°C]	
λ_E	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs [W/(mK)]	
λ_{Fill}	Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung [W/(mK)]	
$\rho_{w,s}$	Dichte des Fluids (w) oder der Matrix (s) [kg/m ³]	
μ	dynamische Viskosität [kg/m/s]	
ρ	Dichte [kg/m ³]	
σ	Konduktivitätsparameter der Hinterfüllung [-]	

Abstract

In dieser Bachelorarbeit sollen eine analytische und eine numerische Berechnungsmethode gegenübergestellt und verglichen werden. Als Beispiel für die analytische Berechnung wird die Software Earth Energy Designer (EED) gewählt. Das Grundwassersimulationsprogramm SPRING, Simulation of Processes in Groundwater, dient als Beispiel für eine numerische Berechnungsmethode.

Neben dem physikalischen Hintergrund werden die darauf aufbauende Dateneingabe als auch die unterschiedlichen Ergebnisse betrachtet.

EED liefert schnell ausreichend gute Ergebnisse zur Auslegung einer Erdwärmesondenanlage. Ist die Problemstellung komplexer, lässt sich auf SPRING zurückgreifen, mit dessen Modellerstellung nahezu jede komplexe Erdwärmesondenkonfiguration abgebildet und berechnet werden kann. Zudem ermöglicht SPRING die Untersuchung der Auswirkungen der geplanten Anlage auf den Untergrund.

1. Überblick der Berechnungsmethoden zur Auslegung von geothermischen Anlagen

Geothermische Wärmeerzeugung gewinnt als kostensparende erneuerbare Energie in der Anlagentechnik bei Neubauten, als auch bei Altbauten zunehmend an Bedeutung. Bei Ein- und Zweifamilienhäusern kann die Erdwärmeanlage meist mithilfe einer einfachen Handrechnung ausreichend genau ermittelt werden. Anders ist das bei Großprojekten zur Gewinnung beziehungsweise Nutzung von geothermischer Energie.

Unter bestimmten Bedingungen ist hier eine korrekte Anlagenauslegung mittels Software-Anwendung unbedingt erforderlich. Die genauen Bedingungen gibt die VDI 4640-2 vor:

"5.1.2 Größere Anlagen (>30 kW Heizleistung)

Bei einer größeren Anzahl von Einzelanlagen, bei Anlagen mit mehr als 2400 projektierten Jahresbetriebsstunden, bei Anlagen mit zusätzlichen Wärmequellen/-senken (z.B. Kühlung) und bei Anlagen mit einer Wärmepumpen-Gesamtheizleistung >30 kW muss die korrekte Anlagenauslegung durch Berechnungen nachgewiesen werden. Dazu ist in der Regel jeweils im Einzelfall eine Berechnung der sich aus dem Heizbedarf ergebenden Temperaturen im Jahresverlauf über den vorgesehenen Betriebszeitraum hinweg erforderlich.⁽¹⁾ (VDI 4640-2, 2008)

Dabei stehen numerische und analytische Berechnungsmethoden zur Auswahl. Ein häufig verwendetes Planungstool ist der Earth Energy Designer der Firma BLOCON aus Schweden. Mithilfe seiner analytischen Berechnungen können bei vereinfachten Annahmen für Anlagen mit geringer Komplexität sehr schnell Ergebnisse zur Auslegung geliefert werden. Dies ist der Grund, warum analytische Berechnungsverfahren die erste Wahl in den meisten Planungsunternehmen ist. Doch wenn die Anlage komplexer ist, die Anordnung der Erdwärmesonden unsymmetrisch ist oder Grundwasser die Sonden beeinflusst, ist eine numerische Berechnung laut VDI zwingend erforderlich um ein korrektes Auslegungsergebnis zu erhalten.

"Eine genaue Berechnung größerer erdgekoppelter Wärmepumpeanlagen kann nur durch numerische Simulation erfolgen."² (VDI 4640-2, 2008)

Nach wie vor sind jedoch numerische Berechnungsverfahren zur Auslegung von geothermisch genutzten Erdwärmesondenfeldern in der Praxis kaum im Einsatz.

¹VDI 4640-2. (2008). *Thermische Nutzung des Untergrunds, Blatt* 2.Berlin: Beuth Verlag GmbH. S.19 ²VDI 4640-2. (2008). *Thermische Nutzung des Untergrunds, Blatt* 2.Berlin: Beuth Verlag GmbH. S.21

In diesem Kapitel werden die beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden vorgestellt. Sowohl bei EED als auch bei SPRING wird zunächst ein Überblick über deren Methodik gegeben, die bei ersterem auf analytischen Lösungen und bei letzterem auf Finiten Elementen beruht. Anschließend werden jeweils die physikalischen Hintergründe beleuchtet. Danach erfolgt eine Erläuterung der Umsetzung der verschiedenen Berechnungsmethoden bei den Computersimulationsprogrammen.

2.1 Beschreibung der Berechnungsmethoden von EED (Earth Energy Designer)

Name	Analytisches Verfahren	Herkunft/ Haupt- anwendung	Eigenschaften	Bezugs- quelle
EED	g-Funktionen	Geothermie	Temperaturentwicklung des Fluids, Auslegung des Sonden- feldes	BLOCON

2.1.1 Simulation auf Basis analytischer Lösungen

Tabelle 1 Übersicht zu EED

Der Earth Energy Designer (Tabelle 1) ist ein Computersimulationsprogramm zur Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen durch eine Voraussage der Temperaturänderungen im Gestein.

Die Software ermöglicht bei gegebener Erdwärmesondenkonfiguration (Anordnung, Länge, Anzahl, Verfüllung, etc.) die Berechnung eines Temperaturprofils des Wärmeträgermediums oder die Berechnung der erforderlichen Sondenlänge und Sondenanzahl bei gegebenen Minimal- und Maximaltemperaturen des Wärmeträgermediums.

EED prüft dabei, ob durch die gewählte Auslegung, Anzahl, Tiefe und Anordnung die Gefahr einer zu starken Auskühlung des Untergrundes besteht. Diese würde zu einem ineffizienten Anlagenbetrieb führen.

Mittels eines iterativen Suchprozesses wird unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen die optimale Variante der Anlage ermittelt.³ (Bornitz, 2011) Die Basis für das Auslegungstool EED beruht auf der grundlegenden Arbeit von Eskilson, mit dem Titel "Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes" (Abbildung 1).

³Bornitz, C. (2011). *Geothermie-Bohrungen für Anwendungen in Gebäuden: Dimensionierung und Ausführung*. Paris: CMB Bohrtechnik für Erdwärme GmbH. S.19



Abbildung 1 Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes von Per Eskilson⁴ (Eskilson, 1987)

Seine Berechnungen beruhen auf Algorithmen, die durch Modellbildungen und Parameterstudien anhand eines numerischen Simulationsmodells abgeleitet worden sind. Daraus ergaben sich analytische Lösungen des Wärmestroms mit zahlreichen Kombinationen für die Bohrlochanordnung und ihrer Geometrie, die sogenannten g-Funktionen oder auch Sprungantwort-Funktionen. Diese g-Funktionen hängen vom Abstand zwischen den einzelnen Bohrlöchern an der Erdoberfläche und von der Bohrlochtiefe ab. Im Fall von schrägen Bohrungen, besteht zudem eine Abhängigkeit von dem geneigten Winkel.⁵ (VDI 4640-2, 2008)

Das Simulationsprogramm EED berechnet den Wärmetransport im Untergrund ausschließlich mit diesen analytischen g-Funktionen. In dem Programm sind 6385 g-Funktionen für 798 verschiedene Sondenkonfigurationen hinterlegt.

Die Werte der g-Funktionen, die aus den numerischen Simulationen errechnet wurden, sind in einem Datenordner gespeichert, wo sie für einen schnellen Datenabruf zur Verfügung stehen.⁶ (BLOCON, 2008)

⁴ Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Lund: Lund Institute of Technology.

⁵VDI 4640-2. (2008). *Thermische Nutzung des Untergrunds, Blatt 2.* Berlin: Beuth Verlag GmbH. ⁶BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer. S. 5

EED ist in der Lage intern die zeitliche Temperaturentwicklung am Bohrlochrand zu berechnen. Diese wird mit dem Bohrlochwiderstand verrechnet und als Ergebnis erhält der Nutzer die mittlere Fluidtemperatur im Sondenfeld. Die Berechnung erfolgt in folgenden Schritten:

- I. Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstands mit analytischen Ansätzen nach Hellström
- II. Berechnung der monatlichen Grundlast mit darüber hinausgehenden monatlichen Spitzenlasten
- III. Berechnung der mittleren Temperaturen am Monatsende des Bohrlochrands und des Fluids als Reaktion auf die monatlichen Grundlasten auf Basis der zugehörigen g-Funktionen nach Eskilson
- IV. Berechnung der Spitzenlastwerte der Temperaturen am Bohrlochrand und des Fluids durch Addition der Reaktion auf die monatlichen Spitzenlasten zu den Grundlasttemperaturen⁷ (Koenigsdorff, 2011)

2.1.2 Physikalischer Hintergrund

Hier sollen die grundlegenden physikalischen Formeln zur Berechnung der benötigten Bohrlänge und der zu erwartenden Fluidtemperaturen beschrieben werden, wie sie in dem Programm EED integriert sind.

2.1.2.1 Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstands

Der Wärmewiderstand, zu dem auch der Bohrlochwiderstand gehört, ist ein Maß für die Temperaturdifferenz, die in einem Material beim Hindurchtreten einer Wärmeleistung entsteht. Er beschreibt die Wärmeübertragungseigenschaften des Gesamtsystems Erdwärmesonde, bestehend aus Wärmeträgerfluid, Sonde und verfülltem Bohrloch⁸ (Dr. Rumohr & Schäfer, 2009). Der Bohrlochwiderstand ist umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit, was bedeutet, dass der Widerstand umso kleiner ist, je besser ein Material die Wärme ableitet.

⁷Koenigsdorff, R. (2011). Oberflächennahe Geothermie für Gebäude- Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 206

⁸Dr. Rumohr, S., & Schäfer, I. (2009). *Planung und Bemessung von Erdwärmesondenanlagen-Einbindung der Erdwärmesonde in das System- Typen, Wärmeübertragung und Optimierung*. Idstein: Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften Fachsektion Hydrogeologie.S. 23

Der Bohrlochwiderstand ist unabhängig von der Tiefe und besteht aus dem Bohrloch-Hinterfüllungswiderstand und dem Wärmeübergangswiderstand von der Verfüllung an das Sondenfluid

$$R_{b} = R_{a} + R_{c}$$
 (Abbildung 2)

mit:

 R_{α} = Wärmeübergangswiderstand vom Fluid zum Sondenrohr [Km/W]

 R_c = thermischer Sondenwiderstand von Sondenrohr- bis Bohrradius [Km/W]⁹ (Huber, 2009)



Abbildung 2 Bestandteile des thermischen Bohrlochwiderstandes

Die Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstands basiert auf den Daten der Bohrlochgeometrie, des Verfüllmaterials, des Rohrmaterials und der Rohrgeometrie. Die Berechnung in EED nutzt einen analytischen Lösungsweg, welcher eine exakte Lösung des zweidimensionalen Wärmeleitungsproblems in einer Ebene quer zu der Bohrlochachse angibt. Diese Lösung basiert auf einer unendlichen Reihe von Multipolen von schnell abnehmender Stärke und Einfluss.

⁹Huber, A. (2009). *Programm EWS Version 4.0 Berechnung von Erdwärmesonden*. Zürich: Huber Energietechnik AG.

Die Korrektheit der Lösung hängt davon ab, wie viele Multipole der unendlichen Reihe ausgewertet werden. Vier Multipole ergeben für die meisten Fälle eine ausreichend gute Lösung. Eine größere Anzahl erhöht die Rechenzeit.¹⁰ (BLOCON, 2008)

Der thermische Bohrlochwiderstand wird mit der mittleren Fluidtemperatur der Sonde und der Bohrlochrandtemperatur definiert als

$$R_b = \frac{\vartheta_B - \vartheta_F}{\dot{q}_{EWS}}$$

mit:

 R_b = Thermischer Bohrlochwiderstand von Fluid bis Bohrradius [Km/W]

 ϑ_{B} = Temperatur am Bohrlochrand [°C]

 ϑ_F = Mittlere Fluidtemperatur [°C]

 \dot{q}_{EWS} = Spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde pro Länge [W/m] = spezifische Sondenbelastung = $\frac{maximale Entzugsleistung}{Gesamt-Bohrmeter} = \frac{Q_{EWS}}{L_{ges}}$

Für Doppel-U-Sonden lässt sich der Bohrlochwiderstand nach Hellström wie folgt berechnen:

$$\begin{split} R_b &= \\ \frac{1}{8 \times \pi \times \lambda_{Fill}} \times \left[\beta + \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{r_1}{Bu}\right) + \sigma \\ \times \ln\left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}}\right) - \frac{\frac{r_0^2}{Bu^2} \left[1 - \sigma \times \frac{\frac{1}{4}Bu^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)}\right]^2}{\left\{\frac{1 + \beta}{1 - \beta} + \frac{r_0^2}{Bu^2} \left[1 + \sigma \times \frac{Bu^4 \times r_1^4}{\left(r_1^4 - \frac{Bu^4}{16}\right)^2}\right]\right\}} \end{split}$$

[mK/W]

mit:

 R_b = thermischer Bohrlochwiderstand (von Fluid bis Bohrradius) [Km/W]

¹⁰BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer. S. 19

 λ_{Fill} = Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung [W/(mK)]

 β = dimensionsloser thermischer Widerstand Sondenrohr bis Fluid [-]

 r_1 = Bohrradius [m] (Abbildung 3)

 r_0 = Innenradius des Sondenrohrs [-] (Abbildung 4)

Bu = Rohrabstand des hinaufströmenden zum hinunterströmenden Fluid (shank spacing) [m]

 σ = Konduktivitätsparameter der Hinterfüllung [-]¹¹ (Hellström, 1991)



Abbildung 3 Querschnitt Doppel-U-Sonde



Abbildung 4 Querschnitt einer einzelnen Sonde

2.1.2.2 Berechnung der monatlichen Grundlast mit Spitzenlasten

Die Berechnungen der Fluidtemperaturen erfolgen für monatliche Heiz- und Kühllasten. Als Heizlast bezeichnet man den für die Beheizung eines Hauses erforderlichen Wärmebedarf.

¹¹Hellström, G. (1991). *Ground Heat Storage- Thermal Analyses of Duct Storage Systems- Theory*. Lund: University of Lund.

Entsprechend ist die Kühllast der Bedarf, der für die Kühlung eines Hauses erforderlich ist. Diese Werte sind Eingabewerte im EED-Programm und stehen in der Regel durch den zuständigen Heizungsbauer zur Verfügung. Das Planungstool bietet hierbei zwei verschiedene Eingabemöglichkeiten, die unter dem Kapitel 2.1.3.5 Grundlast näher erläutert werden. Mithilfe dieser durchschnittlichen Lasten und der Jahresarbeitszahl wird die resultierende Wärme berechnet, die dem Boden pro Monat entnommen oder hinzugefügt wird.

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe gibt das Verhältnis von angegebener Heizwärme zu aufgenommener elektrischer Arbeit innerhalb eines Jahres an und liegt in der Größenordnung von 3 bis maximal 5.

Ist das Ergebnis dieser Berechnung ein negativer Wert, bedeutet das einen Wärmestrom in den Boden hinein¹² (BLOCON, 2008).

2.1.2.3 Berechnung der mittleren Temperaturen des Bohrlochrands und des Fluids

Wie bereits aus der Regelungstechnik bekannt, lässt sich das Verhalten linearer Systeme vollständig aus deren Sprungantwort ableiten. Die Sprungantwort-Funktion ist die bereits erwähnte g-Funktion.

Ein lineares System bezogen auf Erdwärmesondenfelder bedeutet, dass ein verdoppelter Wärmeentzug beziehungsweise Wärmeeintrag eine Verdopplung der Temperaturreaktion an der Sonde zur Folge hat. Die Sprungantwort bei Erdwärmesonden ist also der zeitliche Verlauf der Untergrundtemperatur am Bohrlochrand. Dieser stellt sich als Reaktion auf einen sprungförmig einsetzenden und dann konstant bleibenden Wärmeentzug beziehungsweise -eintrag ein. Dies ist der Betriebsbeginn einer Wärmepumpe.

Theoretisch muss für jede mögliche Sondengeometrie, Sondenfeldgeometrie und für jeden beliebigen Untergrund eine eigene Sprungantwort-Funktion formuliert werden, denn die Wärmeübertragung hängt auch von den thermischen Kenngrößen des Bodens ab. Dies macht eine große Vielzahl an g-Funktionen nötig.

Durch Ähnlichkeitsbetrachtungen lassen sich diese merklich reduzieren. Denn zwei Erdwärmesonden, die jeweils 50 m tief sind und in einem Abstand von 10 m zueinander liegen, beeinflussen sich ebenso stark wie zwei 100 m tiefe Bohrungen mit einem Abstand von 20 m zueinander. Lediglich die Zeit bis zum spürbaren Einfluss der Sonden untereinander differiert bei den genannten unterschiedlichen Anordnungen.

¹²BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer. S. 22

Doch das unterschiedliche zeitliche Verhalten kann mit Hilfe einer dimensionslosen Zeitkonstante, der ESKILSON- Zahl, ebenfalls auf einfache Ähnlichkeiten zurückgeführt werden.

Eskilson und seine Forschungsgruppe haben anhand dieser Betrachtungen und Ähnlichkeitsanalysen eine numerische Simulation für eine Vielzahl von Sondenfeldern durchgeführt und berechneten somit zahlreiche dimensionslose g-Funktionen. Diese Sprungantwort-Funktionen beinhalten die Effekte der thermischen Speicherfähigkeit des Untergrundes, als auch die Wärmeleitung im Boden.

Der konvektive Einfluss von fließendem Grundwasser kann allerdings nicht betrachtet werden.

Die formulierten Ähnlichkeitsparameter sind die folgenden:

$$\frac{Bohrlochradius}{Bohrlochtiefe} = \frac{r_B}{H} [-]$$

 $\frac{Sondenabstand}{Bohrlochtiefe} = \frac{B}{H} \left[-\right]$

 $\frac{reale\ Zeit}{physikalische\ Zeitkonstante\ der\ Sonde} = \frac{t}{t_S} = \text{Es} = \text{ESKILSON-}\ \text{Zahl}\ [-]$

mit:

$$t_{\rm S} = \frac{H^2}{9 \times a} \left[- \right]$$

dabei ist:

a = Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

Die g-Funktionen sind als analytische Formeln, z.B. durch Polynome, darstellbar. Sie zeigen den zeitlichen Verlauf der über die Bohrtiefe gemittelten Untergrundtemperatur am Bohrlochrand von Erdwärmesonden in dimensionsloser Form.

Nach Eskilson kann bei einer Einzelsonde bis zum Zeitpunkt

$$\frac{t}{t_s} = \text{Es} = 1$$

die vertikale Wärmeleitung im Erdreich bei einem maximalen Fehler von 7 % vernachlässigt werden. Ab

$$\frac{t}{t_s} = \text{Es} = 10$$

ist der Gleichgewichtszustand im Erdreich beinahe wieder hergestellt. Im Gleichgewichtszustand fließt im Jahresschnitt die gleiche Energiemenge, die die Sonde dem Erdreich entzieht, von der Umgebung wieder nach. Der größte Teil kommt dabei von der Erdoberfläche und ein kleiner Anteil kommt aus dem Erdinneren. Somit findet keine weitere Auskühlung mehr statt.

Die zeitabhängige Veränderung der Temperatur am Bohrlochrand gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur vor der Erdwärmesonde lässt sich wie folgt berechnen:

$$\overline{\vartheta_B} - \overline{\vartheta_{E,0}} = \Delta \overline{\vartheta_B} = \frac{q_{EWS}}{2 \times \pi \times \lambda_E} \times g(Es, \frac{r_B}{H}, \frac{B}{H}) [K]$$

mit:

 $\overline{\vartheta_{B}}$ = örtliche gemittelte Temperatur am Bohrlochrand, zeitabhängig [°C]

 $\overline{\vartheta_{E,0}}$ = ungestörte mittlere Erdreichtemperatur im Sondenfeld zum Zeitpunkt 0 = vor Inbetriebnahme [°C]

 q_{EWS} = spezifische Wärmeleistung [W/m]

 λ_E = Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs [W/(mK)]

 $g(Es, \frac{r_B}{H}, \frac{B}{H}) = zugehörige dimensionslose g-Funktion als Funktion der genannten Ähn$ lichkeitsparameter [-] Eskilson reduziert dabei die Vielzahl an erforderlichen g-Funktionen noch weiter, indem er lediglich Funktionen für den Wert:

$$\frac{r_B}{H} = 0.0005$$

ermittelte.

Eine Umrechnung für weitere Verhältnisse des Bohrlochradius zur Bohrlochtiefe erreichte Eskilson näherungsweise durch folgende Formel:

$$g(Es, \frac{r_B}{H}, \frac{B}{H}) = g(Es, (\frac{r_B}{H} = 0,0005), \frac{B}{H}) - \ln(\frac{\frac{r_B}{H}}{0,0005}) [-]^{13}$$
 (Eskilson, 1987)

Ist der geothermische Tiefengradient im Tiefenbereich der Sonde annähernd konstant, lässt sich die Erdreichtemperatur in mittlerer Sondentiefe als mittlere ungestörte Erdreichtemperatur verwenden. Mit der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche, dem geothermischen Wärmefluss und der Wärmeleitfähigkeit des Bodens lässt sie sich durch folgende Formel abschätzen:

$$\overline{\vartheta_{E,0}} \approx \vartheta_E(\frac{H}{2}) = \vartheta_m + \frac{H}{2} \times \frac{q_{geo}}{\lambda_E}$$
 [°C]

mit:

 $\overline{\vartheta_{E,0}}$ = ungestörte mittlere Erdreichtemperatur im Sondenfeld, Zeitpunkt: 0 = vor Inbetriebnahme [°C]

 $\vartheta_{E}\left(\frac{H}{2}\right) =$ Erdreichtemperatur in halber Sondentiefe [°C]

 ϑ_m = mittlere Oberflächentemperatur [°C]

 q_{geo} = geothermische Wärmefluss am Standort der Sonde [W/m]

 λ_{E} = Wärmeleitfähigkeit des Bodens¹⁴ [W/(mK)] (Koenigsdorff, 2011)

¹³Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*.Lund: Lund Institute of Technology.

¹⁴Koenigsdorff, R. (2011). *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude- Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 202f

Dabei wird absichtlich der geothermische Wärmefluss und nicht der geothermische Gradient für die Berechnung verwendet, um die Auswirkung der Wärmeleitfähigkeit mit einzubeziehen¹⁵ (BLOCON, 2008).

Die mittlere Fluidtemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit lässt sich abschließend aus dem effektiven Bohrlochwiderstand R_b , der spezifischen Wärmeleistung und der Bohrlochrandtemperatur bestimmen:

$$\overline{\vartheta_F} = \overline{\vartheta_b} + q_{EWS} \times R_b \ [^{\circ}C]$$

mit:

 $\overline{\vartheta_F}$ = mittlere Fluidtemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit [°C]

 $\overline{\vartheta_b}$ = Temperatur am Bohrlochrand [°C]

 q_{EWS} = spezifische Wärmeleistung der Erdwärmesonde [W/m]

Das zeitliche Temperaturverhalten einer Erdwärmesonde kann nicht nur für Sprungantworten, also konstant aufgelegte Leistungen, errechnet werden. Es ist möglich, durch Überlagerung unterschiedlich konstanter Lasten in zeitlicher Abfolge, zahlreiche beliebige Lastprofile zu ermitteln. Durch Superposition der Sprungantworten lassen sich nach Eskilson die daraus resultierenden Temperaturreaktionen berechnen. Somit ist auch das dynamische Verhalten von Erdwärmesondenfeldern simulierbar.¹⁶ (Koenigsdorff, 2011)

2.1.2.4 Berechnung der Spitzenlastwerte der Temperaturen am Bohrlochrand und des Fluids

Zu den bereits eingetragenen Grundlasten können zusätzlich Werte für Spitzenheiz- und Spitzenkühllasten mit einbezogen werden. Dies erfolgt für das Ende eines jeden Monats. Denn der letzte Tag jeden Monats stellt durch die zunehmende Abkühlung des Untergrundes das "worst case Szenario" dar. An allen anderen Tagen wird die durchschnittliche Monatsleistung erbracht.

¹⁵BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer. S. 12

¹⁶Koenigsdorff, R. (2011). *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude- Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 203ff

Spitzenlasten werden benötigt um die maximal möglichen Temperaturvariationen abzuschätzen. Dazu wird der Wärmeentzug oder die Wärmeeinfuhr der Spitzenlast den Grundlasten am Ende jeden Monats hinzugefügt und die resultierenden Fluidtemperaturen werden berechnet. Sie zeigen die Minimal- beziehungsweise Maximaltemperaturen, die entstehen können. Für die Berechnung wird angenommen, dass der Energiegehalt der kurzen Spitzenlasten unbedeutend ist, das heißt bereits eingeschlossen in der Grundlast ist, und nicht das Langzeitverhalten beeinflusst.¹⁷ (BLOCON, 2008)

2.1.3 Umsetzung im Simulationsprogramm EED Version 3.0

Das Pulldown- Menü *Input* umfasst alle Funktionen für die Eingabe oder die Änderung von Daten, die zur Berechnung erforderlich sind. Weitere Untermenüs dienen der spezifischen Eingabe der Daten. Diese Daten beschreiben Untergrundeigenschaften, die Bohrungen und Erdwärmesonden, die Berechnung des thermischen Bohrlochwiderstands, die Eigenschaften der Wärmeträgerflüssigkeit, Grundlast- und Spitzenlastdaten als auch die Dauer der Simulation.

2.1.3.1 Untergrundeigenschaften

Die Eingabedaten können entweder direkt eingetippt werden oder aus einer hinterlegten Datenbank gewählt werden (Abbildung 5). Stehen keine gemessenen Werte, zum Beispiel von einem Thermal Response Test, zur Verfügung, kann auf die programminterne Datenbank zurückgegriffen werden. Dort sind die Untergrundeigenschaften nach regionalen Kriterien gespeichert.



Abbildung 5 Eingaben in EED für die Untergrundeigenschaften

Ziel dieser Angaben ist es unter anderem, die benötigte ungestörte Bodentemperatur zu erhalten.

¹⁷BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer. S. 23f

Ist die ungestörte Bodentemperatur bereits durch einen Thermal Response Test ermittelt worden, kann dieser gemessene Wert als "Mittlere Temperatur an der Erdoberfläche" eingetragen werden. Wenn anschließend der geothermische Wärmefluss auf 0,0 W/m² gesetzt wird, verwendet EED dann diesen Wert als ungestörte Bodentemperatur.

2.1.3.2 Bohrungen und Erdwärmesonden

Der Menüpunkt *Bohrungen und Erdwärmesonden* (Abbildung 6) beschreibt zahlreiche Bohrlochdaten wie die Anzahl, die Geometrie, die Tiefe und den Durchmesser der Bohrungen. Zudem werden Informationen zum Wärmetauscher, den Erdwärmesonden, eingetragen. Die Informationen werden benötigt um die passende g-Funktion zu bestimmen. Es gibt zwei verschiedene Varianten des Untermenüs, die vom gewählten Wärmetauscher abhängen. Diese unterscheiden sich geringfügig. Die Erdwärmesonde kann ein Koaxialrohr sein, oder aus U-, Doppel-U-beziehungsweise Tripel-U-Rohren bestehen.



Abbildung 6 Eingaben in EED für Bohrungen und Erdwärmesonden für Doppel-U-Sonden

Die Bohrlochanordnung kann aus einer Datenbank, bestehend aus 798 verschiedenen Konfigurationen, gewählt werden. Grundsätzlich stehen sieben verschiedene Basisformen für die Anordnung zur Auswahl (Tabelle 2). Die Basisformen der Sondenkonfiguration sind die folgenden:

Geometrie	Name
Single BHE (borehole heat exchanger)	SINGLE
BHE- Layout in a straight line	LINE
BHE- Layout in a line in L-shape	L-CONFIGURATION
BHE- Layout in two parallel L-shaped	L2-CONFIGURATION
lines	
BHE- Layout in a line in U-shape	U-CONFIGURATION
BHE- Layout in a line forming an open	OPEN RECTANGULAR CONFIGURA-
rectangle	TION
BHE- Layout in form of a rectangular	RECTANGULAR CONFIGURATION
field	

Tabelle 2 Basisformen der Sondenkonfiguration in EED

Nachdem Angaben über die Tiefe und den Abstand der Sonden untereinander gemacht worden sind, wird nach Eingabe des Durchmessers geprüft, ob dieser groß genug ist, um die Rohre aufzunehmen. Ist dies nicht der Fall, lässt sich das Untermenü nicht schließen.

Der nächste Punkt betrifft das Umwälzvolumen, welches in Liter pro Sekunde angegeben wird. EED benötigt diese Größe unter anderem um die Reynolds Zahl zu berechnen. Das Umwälzvolumen Q kann pro Bohrung oder für alle Bohrungen angegeben werden. Bei letzterem kann ein Faktor bezüglich der Art der Anbindung angegeben werden. Das Umwälzvolumen pro Bohrung ergibt sich dann aus der gegebenen Größe dividiert durch die Anzahl der Bohrungen dividiert durch den eingegebenen Faktor:

$$Qbh = \frac{Q}{\frac{Nbh}{Faktor}} [1/s]$$

mit:

Qbh = Umwälzvolumen pro Bohrung [l/s]

Q = Umwälzvolumen für alle Bohrungen [l/s]

Nbh = Anzahl der Bohrungen [-]

Faktor = Anordnungsfaktor [-]

Ein Anordnungsfaktor von 1 entspricht einer Reihe von Sonden. Der Faktor 2 wird verwendet, wenn immer zwei Sonden in einer Reihe liegen und so weiter.

Anschließend wird der Übergangswiderstand zwischen Rohr und Verfüllung behandelt.

Diese Größe hängt von der Qualität der Verfüllung und der Sorgfalt beim Verpressen der Erdwärmesonde ab. Wird das Verfüllmaterial sehr gründlich von unten nach oben aufgefüllt und gleichzeitig eine sehr gute Qualität eingesetzt, ist theoretisch eine Größe von 0,00 (m^2K)/W denkbar. Grundsätzlich gilt ein Wert von ungefähr 0,01(m^2K)/W als real. Bei einem schlechten Kontakt des Verpressmaterials zu den Sonden ergibt sich ein Wert von ungefähr 0,02(m^2K)/W.

Weitere Eingabedaten sind der Außendurchmesser der Sonde, ihre Wandstärke und ihre Wärmeleitfähigkeit.

Der U-Rohr-Mittenabstand bezieht sich auf den Abstand vom Mittelpunkt zum Mittelpunkt zwischen den einzelnen Rohren mit aufsteigender und absteigender Sole. Bei der Berechnung des Bohrlochwiderstands nach Hellström erhielt er die Bezeichnung Bu und wurde Rohrabstand des hinauf strömenden zum hinunter strömenden Fluid (shank spacing) genannt (Abbildung 3 Querschnitt Doppel-U-SondeAbbildung 3). An einer installierten Erdwärmesonde ist dieser Abstand, über die gesamte Bohrlänge betrachtet, nicht konstant, deswegen muss ein durchschnittlicher Wert genutzt werden.

Werden Abstandshalter eingesetzt, ist der dadurch erreichte Abstand der Abstandshalter relevant und somit Eingabewert. EED überprüft, ob der Abstand groß genug ist und die Rohre sich nicht kreuzen.

Ferner muss die Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials angegeben werden. Dieser ist unter anderem für die Berechnung des Bohrlochwiderstands von Bedeutung.

Das Untermenü für die koaxiale Variante unterscheidet sich, wie bereits erwähnt, ein wenig (Abbildung 7). Hier werden Daten für das innere Rohr und für das äußere Rohr benötigt. EED überprüft dabei automatisch, ob das innere Rohr in das äußere Rohr hineinpasst. Alle weiteren Eingabedaten sind identisch.

Bohrungen und Erdwärmesonden		×		
Erdwärmesonde				
Sondentyp	Koaxial	•		
Sondenanordnung	0	?		
0 ("1 : single")	110.0			
liefe	110,0	m		
Sondenabstand	10,0	m		
Bohrdurchmesser	110,000	? mm		
Übergangswiderst. Rohr/Verfüllung	0,0000	(m·K)/W		
Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung	0,600	? W/(m·K)		
Umwälzvolumen pro Bohrung Q:				
○ für alle Bohrungen ④ pro Bohrung	2,	000 I/s		
Art der Anbindung (1=parallell)	Qbh=Q=2 l/s			
Innenrohr				
Außendurchmesser	50,000	mm		
Wandstärke	4,600	? mm		
Wärmeleitfähigkeit	0,220	W/(m·K)		
Außenrohr				
Außendurchmesser	100,000	mm		
Wandstärke	4,000	? mm		
Wärmeleitfähigkeit	0,400	W/(m·K)		
In die Zwischenablage kopieren	<u> </u>	ernehmen		



2.1.3.3 Thermischer Bohrlochwiderstand

Dieser Wert kann direkt, soweit zum Beispiel durch einen Thermal Response Test vorhanden, angegeben werden, ansonsten wird er durch EED, wie bereits in Kapitel 2.1.2.1 Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstands, beschrieben, berechnet (Abbildung 8).

Zudem kann gewählt werden, ob die internen Wärmeübergänge zwischen den einzelnen Rohren mit aufsteigender oder absteigender Flüssigkeit bei der Berechnung berücksichtigt werden sollen. Der Effekt der natürlichen Konvektion in grundwassergefüllten Bohrungen mit U-Rohren wird nicht dargestellt.

Thermischer Bohrlochwiderstand				
Werte berechnen Konstante Werte benutzen				
Internen Wärmeübergang berücksichtigen				
Konstante Werte	Konstante Werte			
Thermischer Bohrlochwiderstand:				
Fluid/Erdreich	0,100 (m·K)/W			
Intern	^{0,500} (m·K)/W			
<u>Ü</u> bernehmen				

Abbildung 8 Eingaben in EED für den thermischen Bohrlochwiderstand

2.1.3.4 Wärmeträgerflüssigkeit

Bei der Wärmeträgerflüssigkeit muss die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, die Dichte, die Viskosität als auch der Gefrierpunkt angegeben werden (Abbildung 9). Diese Daten sind unter anderem entscheidend für die Wahl der passenden g-Funktion.

Die Daten für typische Wärmeträgerflüssigkeiten lassen sich der Datenbank entnehmen oder können aus Datenblättern der Herstellerfirmen entnommen werden. Die Angaben in der Datenbank beziehen sich normalerweise auf eine Arbeitstemperatur von 0 °C, welches typisch für die Arbeit von Wärmepumpen ist. Ist die Wärmeträgerflüssigkeit normales Wasser, ist eine Auswahl des Temperaturlevels wählbar.



Abbildung 9 Eingaben in EED für Wärmeträgerflüssigkeit

2.1.3.5 Grundlast

EED bietet zwei verschiedene Eingabemethoden unter dem Menüpunkt Grundlast.

Die Methode unter dem Begriff "Jahresarbeit und monatliche Verteilung" (Abbildung 10) akzeptiert die gesamte jährliche Heiz- und Kühllast in MWh und unterteilt es in die einzelnen Monate, indem ein eingespeichertes Lastprofil benutzt wird. Die voreingestellten Werte können dabei verändert werden, sofern dies notwendig ist.

Die andere Methode "Monatliche Heiz- und Kühlarbeit" benötigt die Heiz- und Kühllast für jeden einzelnen Monat.

Die erste Variante ist schnell und wird meist für kleinere Anlagen genutzt, während die zweite Methode die genaue Modellbildung eines spezifischen Lastprofils einschließlich saisonunabhängiger Lasten, wie der des Warmwassers, erlaubt.

Das Eingabefeld ist in drei Spalten *Heizen, Kühlen* und *Erdseite* unterteilt. In der ersten Zeile unter der Überschrift *Heizen* wird die jährliche Heizlast in MWh eingetragen. Unter *Kühlen* wird die jährliche Kühllast aufgeführt. In der nächsten Zeile muss der jährliche Durchschnitt der Jahresarbeitszahl eingetragen werden.

Die Faktoren in den folgenden Zeilen geben den Anteil der Heiz- und Kühllast in jedem Monat an. Zum Beispiel bedeutet 0.155 im Januar, dass 15,5% der Heizlast im Januar benötigt werden. Die letzte Spalte zeigt die resultierende berechnete Wärme, die dem Boden entnommen oder hinzugefügt wird. Die Berechnung erfolgt anhand der jährlichen Last, der Jahresarbeitszahl und den monatlichen Anteilen. Negative Werte bedeuten einen Wärmestrom in den Boden hinein, positive Werte einen Wärmeentzug. Diese Spalte wird durch EED automatisch berechnet und kann nicht manuell eingegeben werden. Die Werte ergeben sich aus:

Erdseite =

Jahresheizlast Heizen * monatlicher Anteil Heizen * (1- 1 Jahresarbeitszahl Heizen) – Jahresheizlast Kühlen * monatlicher Anteil Kühlen * (1+ 1 Jahresarbeitszahl Kühlen) [MWh]

2. Beschreibung der Berechnungsmethoden

	Grundlast					
1	Course dia at (ahaa 14/14/).				
	Grundlast (onne wwj:				
	 Jahresa 	rbeit und m	onatliche Ve	rteilung		
	O Monatlic	he Heiz- un	d Kühlarbeit			
	[MWh]	Heizen	Kühlen	Erdseite		
	Gesamtjahr	122,400	42,240	Aktualisiere	en	
	JAZ	3,00	3,00			
		Direkt	Direkt			
	Januar	0,174	0,000	14,198	3	
	Februar	0,171	0,000	13,954	1	
	März	0,150	0,000	12,240	1	
	April	0,108	0,016	7,912	2	
	Mai	0,011	0,149	-7,494	1	
	Juni	0,008	0,203	-10,780	J F	
	Juli	0,001	0,232	-10,304	+	
	August	0,002	0,232	-3.89	-	
	September	0.028	0.020	1 158	2	
	Oktober	0.127	0.000	10.363	3	
	Dezember	0.207	0.000	16.89	ř I	
	Summer	4	4	25.29	-	
	Summe.	1	1	25,20		
	Warmwasser (WW):					
	Gesamtjahr U,000 JAZ 3,00					
	[MWh] Wärmepumpe Erdseite Gebäude					
	Heizen 122,4	4x1/3 + 12	22,4x2/3	= 122,4		
	(40,8) (81,6)					
	WW $0x1/3 + 0x2/3 = 0$					
	(0)	(0)			
	Küblen 42.2	4v1/3 + -4	2 24-4/3	= -42.24		
	(1.4.0	101 CF	56 321			
	(14,08) (-56,32)					
	Heizen Wärmenumpe Gehäude					
	40.9> 122.4					
	40,0 × ==> 122,4					
	Eraseite 81,6					
	Kühlen Wärmepumpe Gebäude					
	14.08 ==> <== 42.24					
	V V V					
	Erdseite 56,32					
	Wärmeentzug aus dem Erdreich 81,6+0-56,32=25,28					
	🔁 Graphik 🗾 Übernehmen					
1						

Abbildung 10 Eingaben in EED für Grundlast

Die Methode für die monatliche Heiz- und Kühlarbeit arbeitet sehr ähnlich, nur die Reihe für die jährliche Last ist nicht zugänglich. Stattdessen sind die monatlichen Lasten direkt einzutragen. 2.1.3.6 Spitzenlast

Für jeden Monat werden die maximale Heizspitzen und die kontinuierliche Dauer dieser Lasten angegeben (Abbildung 11). Die Leistung der Lastspitzen ist normalerweise die maximale Wärmepumpenleistung.

Spitzenlast			×
	<u>Heizspitze</u>	<u>en</u>	<u>Kühlspitzen</u>
	Leistung	Dauer	Leistung Dauer
	[kW]	[h]	[kW] [h]
Januar	0,000	0,000	0,000 0,000
Februar	0,000	0,000	0,000 0,000
März	0,000	0,000	0,000 0,000
April	0,000	0,000	0,000 0,000
Mai	0,000	0,000	0,000 0,000
Juni	0,000	0,000	0,000 0,000
Juli	0,000	0,000	0,000 0,000
August	0,000	0,000	0,000 0,000
September	0,000	0,000	0,000 0,000
Oktober	0,000	0,000	0,000 0,000
November	0,000	0,000	0,000 0,000
Dezember	0,000	0,000	0,000 0,000
Graphik <u>Ü</u> bernehmen			

Abbildung 11 Eingaben in EED für Spitzenlast

Die Spitzenheizlasten werden in kW angegeben. Das Programm berechnet dann mithilfe der Jahresarbeitszahl, die bereits in dem Grundlast-Untermenü angegeben wurde, die maximal möglichen Temperaturdifferenzen aus.

2.1.3.7 Dauer der Simulation

Die Anzahl der Jahre, die die Simulation erfassen soll, wird unter dem Menüpunkt *Dauer der Simulation* angegeben (Abbildung 12). Auch der Monat, indem die Erdwärmesondenanlage in Betrieb geht, wird erfasst. Diese Angabe ist besonders bei Anlagen mit Heizung und Kühlung entscheidend, denn sie könnten zunächst eine Phase der Wärmeabgabe in den Boden oder des Wärmeentzugs aus dem Boden haben.

Dauer der Simulation	×
Dauer der Simulation Monat der Inbetriebnahme	25 2

Abbildung 12 Eingaben in EED für die Dauer und den Beginn der Simulation

2.1.3.8 Berechnung

Unter dem Pulldown-Menü *Berechnung* stehen zwei Berechnungsvarianten zur Verfügung.

Die erste Variante berechnet die mittlere Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit für eine gegebene Anlage. Die Anordnung entspricht dabei der in der Projektdatendatei angegebenen Anordnung.

Die zweite Variante berechnet die benötigte Bohrlänge um die Fluidtemperatur in einem gegebenen Limit zu halten.

Die erwünschten nicht zu überschreitenden Maximal- und Minimalfluid-Mitteltemperaturen können unter dem Punkt *Gewünschte Temperaturgrenzen des Fluids* eingegeben werden (Abbildung 13).

Gewünschte Temperaturgrenzen des Fluids	×
Niedrigste Fluid-Mitteltemperatur	-5,00 °C
Höchste Fluid-Mitteltemperatur	15,00 °C
🔽 Spitzenlasten einbeziehen	
<u><u><u> </u></u></u>	

Abbildung 13 Eingaben in EED für gewünschte Temperaturgrenzen des Fluids

Werden die Spitzenlasten mit einbezogen, dienen die Spitzenlasttemperaturen als Kriterium, ansonsten nimmt EED die Grundlasttemperaturen als kritische Temperaturen an.

Die Berechnung, die auf der Anordnung basiert, die im Untermenü Bohrungen und Erdwärmesonden eingegeben wurde, wird beim Klicken von Berechnen der benötigten Bohrlochtiefe gestartet.

2.1.3.9 Ausgabe der Ergebnisse

Nach Fertigstellung der Berechnung, öffnet sich ein Fenster und zeigt die Eingabedaten und die Ergebnisse. In Fällen, in welcher die Fluidtemperatur unter den Gefrierpunkt der Trägerflüssigkeit sinkt, wird eine Warnung herausgegeben.

Im Output-Menüpunkt von EED lassen sich zudem Graphen mit der Temperaturentwicklung anzeigen. Dabei werden die Fluidtemperaturen über die Monate des letzten Jahres der Simulation angezeigt (Abbildung 14).



Abbildung 14 Fluidtemperaturen des letzten Jahres der Simulation

Ein weiterer Graph zeigt die Entwicklung der höchsten und niedrigsten Temperaturen eines jeden Jahres der Simulationsperiode (Abbildung 15).



Abbildung 15 Entwicklung der höchsten und niedrigsten Temperaturen während der ganzen Simulationsperiode

2.1.3.10 Optimierung der Bohrlochlänge

Die Optimierungsoption gibt die minimale totale Bohrlänge oder die Bohrkosten für eine gegebene Gruppe von Parametern, Auswahl an Sondenanordnungen, Landfläche, Bohrlochabstände und Bohrtiefe, Anzahl der Bohrungen, an. Jede Anordnung wird mithilfe der verschiedenen Größen der Bohrlochabstände analysiert. Passt eine Anordnung in die angegebene Grundstücksfläche, wird eine Berechnung zur benötigten Bohrlänge durchgeführt und die Ergebnisse werden aufgelistet.

Bei der Option *automatisches Stufenraster* werden die Bohrlochabstände automatisch, soweit es die angegebene Grundstücksfläche erlaubt, im Abstand von 5 m generiert. Die zehn besten Optionen werden einer genaueren Analyse mit einem Bohrlochabstand von 1 m unterzogen.

2.1.3.11 Kosten

Bei EED lassen sich zusätzlich die spezifischen Kosten einer Erdwärmesondenanlage berechnen und analysieren (Abbildung 16 Eingaben in EED für die KostenberechnungAbbildung 16). Die Parameter sind die folgenden:

- Fixe Anfangskosten
- Fixe Kosten pro Bohrloch
- Kosten für gebohrte Längeneinheit
- Fixe Kosten pro Bohrloch für Bodenbohrung
- Kosten für gebohrte Längeneinheit im Boden
- Kosten pro Länge für die Gräben¹⁸ (BLOCON, 2008)

¹⁸BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer.S. 10ff

💽 Kosten		×		
Währung	EUR	_		
Investitionskosten	0,0	00 EUR		
Bohren		_		
Festkosten pro Bohrung	0,0	EUR		
Kosten pro Längeneinheit	0,0	00 EUR/m		
evtl. Lockergesteinsbohrung				
Festkosten pro Bohrung	0,0	0 EUR		
Kosten pro Längeneinheit	0,0	0 EUR/m		
Tiefe	0,0	00 m		
Graben				
Kosten pro Längeneinheit	0,0	0 EUR/m		
I				

Abbildung 16 Eingaben in EED für die Kostenberechnung

2.2 Beschreibung der Berechnungsmethoden von SPRING

Name	Numerisches Verfahren	Herkunft/ Haupt- anwendung	Eigenschaften	Bezugs- quelle
SPRING	Finite Elemente	Hydrogeologie	3D, instationär Grundwasserströmung Stofftransport Wärmetransport	delta h, Ingenieur- gesellschaft mbH

2.2.1 Simulation auf Basis Finiter Elemente mit numerischer Lösung

Tabelle 3 Überblick zu SPRING

SPRING (Tabelle 3) ist ein Programmsystem zur Erstellung und Berechnung von zweiund dreidimensionalen Grundwasserströmungs-, Stoff- und Wärmetransportmodellen nach der Methode der Finiten Elemente. Auch eine instationäre Betrachtung ist dabei möglich. Als ein numerisches Rechenverfahren ermittelt es die Lösung nicht als stetige Funktion sondern nur an ausgewählten diskreten Punkten. Dafür ist es notwendig, das Modellgebiet in Elemente und Knotenpunkte zu diskretisieren.

SPRING arbeitet mit der Finite-Elementmethode (FEM). An ausgewählten Orten in dem zu berechnenden Gebiet werden Knotenpunkte gesetzt.
2. Beschreibung der Berechnungsmethoden

Diese werden durch Dreieck- oder Viereckelemente bzw. Tetraeder oder Pentaeder im Dreidimensionalen verbunden. Dies ermöglicht es jedes beliebige Gebiet problemlos zu erfassen. Den Elementen können nun Attribute (Eigenschaften) zugewiesen werden.

Den Knoten wird entweder eine Entnahme- oder Zuflussmenge oder das Potenzial, die Standrohrspiegelhöhe, vorgegeben. SPRING ermittelt jeweils die korrespondierende Größe. Die Filtergeschwindigkeiten werden aus den Potenzialwerten der Knoten berechnet.

Dabei sind einige Stabilitätskriterien zu beachten, da die Stoff- beziehungsweise Wärmetransportberechnung empfindlich auf numerische Einflüsse, insbesondere aufgrund einer zu groben Diskretisierung, reagiert.

Zur Simulation wird sozusagen die reale Welt auf ein digitales Abbild übertragen. Diesen Übergang nennt man Modellbildung.

Die Erstellung eines solchen digitalen Modells zur Berechnung von Grundwasserströmungen, dem Stoff- oder Wärmetransport kann in vier Schritte unterteilt werden:

I. Problemerfassung

Zunächst muss die Aufgabenstellung definiert sein, um zu klären, was das Modell leisten soll. Anschließend müssen die vorliegenden hydrogeologischen Verhältnisse geklärt werden

II. Datenerfassung (netzunabhängig)

Die vorliegenden Daten müssen gesichtet und eventuell durch weitere Messungen ergänzt werden. Diese Daten werden daraufhin digitalisiert.

III. Modellbildung mit Berechnung

Das Modell wird in einem umfassenden Prozess, der neben der Erstellung des Modells auch die Berechnung und die Ergebnisdarstellung beinhaltet, gebildet. Da neue Modelle im Allgemeinen mehrmals kontrolliert und vor allem modifiziert werden, kann die Modellbildung als ein iterativer Prozess angesehen werden. Auf diesen Schritt wird in Kapitel 2.2.3 Umsetzung im Simulationsprogramm SPRING Version 4.0 näher eingegangen.

IV. Ergebnisinterpretation

Die Ergebnisse werden interpretiert und anschließend dokumentiert.

2.2.2 Physikalischer Hintergrund

Hier sollen die grundlegenden physikalischen Formeln zur Berechnung der Grundwasserströmung und des Stoff- und Wärmetransports beschrieben werden, wie sie im Programm SPRING integriert sind.

2.2.2.1 Die Strömungsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung und das Gesetz von DARCY können mathematisch mit dem Potenzial h oder mit dem Wasserdruck p als Variable beschrieben werden. Sind die Strömungsverhältnisse dichteabhängig, sind sie nur mit einer Formulierung mit der Variablen Wasserdruck erfassbar. Bei ungesättigten Verhältnissen werden in der Literatur für die Größen Sättigung und relativer K-Wert empirische, vom Druck abhängige Funktionen angegeben. Zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse wird zunächst die Differentialgleichung mit der Variablen Potenzial h abgeleitet. Anschließend wird diese in eine Formulierung in Abhängigkeit von dem Wasserdruck überführt.

2.2.2.2 Die Potenzialgleichung

Im gesättigten Grundwasserleiter mit konstanter Dichte lässt sich die Differentialgleichung zur Berechnung eines stationären Strömungszustandes durch Kopplung des Gesetzes von DARCY:

 $v_f = -K \nabla h$

mit der Massenbilanzgleichung:

$$\nabla v_f = Q$$

herleiten:

 $-\nabla(K\nabla h) = Q$

mit:

h= Potenzial [m]

 v_f = Filtergeschwindigkeit [m/s]

K = symmetrischer Tensor der Durchlässigkeit [m/s]

Q = Quellen-/Senkenterm [m³/m³/s] (Einströmen positiv, Ausströmen negativ)

Bei einer instationären Strömung muss der Speicherkoeffizient S_0 ergänzt werden. Dieser schwankt in Abhängigkeit von gespannten oder ungespannten Strömungsverhältnissen:

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla (K \nabla h) = Q$$

mit:

 S_0 = Speicherkoeffizient [1/m]

 S_0 = dränbare Porosität im ungespannten Zustand

 S_0 = Kompressibilität von Wasser und Festgestein im gespannten Zustand

Wenn auch ungesättigte Verhältnisse betrachtet werden, sollte für die Durchlässigkeit K einer relativen Durchlässigkeit k_r (0 <k_r< 1) eingesetzt werden.

2.2.2.3 Die Druckgleichung

Das Gesetz von HUBBERT liefert die Beziehung zwischen hydrostatischem Druck p und Potenzial h:

$$h = z + \frac{p}{\zeta g}$$

mit:

h = Potenzial [m]

- z = Lagehöhe [m]
- $p = Druck [N/m^2]$

 ρ = Dichte [kg/m³]

 $g = \text{Erdbeschleunigung } [\text{m/s}^2]$

Für die Filtergeschwindigkeiten gilt das generalisierte Gesetz von DARCY:

$$v_f = -\frac{k k_r}{\mu S_r} (\nabla p \zeta g \nabla z)$$

mit:

 v_f = Filtergeschwindigkeit [m/s]

k = symmetrischer Tensor der Permeabilität [m²]

 $k_r = k_r(S_r)$ relativer K-Wert [-] (im ungesättigten Bereich)

 $S_r = S_r(p)$ Sättigungsgrad [-] (im ungesättigten Bereich)

 μ = dynamische Viskosität [kg/m/s]

$$p = Druck [N/m^2]$$

 ς = Dichte [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

z = Lagehöhe [m]

Im gesättigten Grundwasserleiter, also wenn S_r = 1 und k_r = 1 ist, gilt:

$$K = \frac{g\varsigma}{\mu}k$$

mit:

K = Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

 ς =Dichte [kg/m³]

 μ = dynamische Viskosität [kg/m/s]

k =symmetrischer Tensor der Permeabilität [m²]

Zur Berechnung eines stationären Zustandes für den Druck lautet die Differentialgleichung:

$$-\nabla\left[\frac{\varsigma k k_r}{\mu}[\nabla p + \varsigma g \nabla z]\right] = q$$

mit:

q = Quellen - Senkenterm [kg/m³/s]

Für die instationäre Druckgleichung benötigt man den spezifischen Speicherkoeffizient S_{op} . Dieser berechnet sich aus der Porosität n des Aquifers, der Korngerüstkompressibilität und der Fluidkompressibilität:

$$S_{op} = \alpha (1-n) + \beta n$$

mit:

 S_{op} = spezifischer Speicherkoeffizient [kg/ms²]⁻¹

n = Porosität des Aquifers [-]

 α = Matrixkompressibilität [kg/ms²]⁻¹

 β = Fluidkompressibilität [kg/ms²]⁻¹

Zwischen dem Speicherkoeffizienten S_0 und dem spezifischen Speicherkoeffizienten S_{op} gilt im gesättigten Grundwasserleiter die Beziehung:

 $S_0 = g \zeta S_{op}$

Ist die Dichte ς im Aquifer konstant, so lautet die instationäre Druckgleichung:

$$\left[S_r \zeta S_{op} + n \zeta \frac{\partial S_r}{\partial p}\right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left[\frac{\zeta k k_r}{\mu} [\nabla p + \zeta g \nabla z]\right] = q$$

Diese partielle Differentialgleichung wird durch Randbedingungen ergänzt:

- vorgegebener Druck (Randbedingung 1. Art)
- vorgegebener Zu- oder Abfluss (Randbedingung 2. Art)
- Leakagebeziehung mit Mengenbeschränkung (Randbedingung 3. Art)

Zusätzlich wird bei instationären Berechnungen eine Anfangsbedingung für den Startzeitpunkt benötigt. Unbedingt erforderlich ist der Anfangsdruck zum Startzeitpunkt t₀ der instationären Rechnung.

Die Mengenbeschränkung macht es möglich Maximalwerte für die In- und Exfiltrationsvolumina bei Leakagebeziehungen anzugeben. Falls sich nach der Lösung der Strömungsgleichung in manchen Bereichen größere In- bzw. Exfiltrationsvolumina als die angegebenen Maximalwerte ergeben, so werden an den entsprechenden Knoten die Randbedingungen 3. Art ersetzt durch Randbedingungen 2. Art. Dabei werden die genannten Maximalwerte als Ex- bzw. Infiltrationsvolumina angesetzt. Anschließend wird die Strömungsgleichung erneut gelöst.

2.2.2.4 Temperatur- und dichteabhängige Strömung

Die Druckgleichung wird zur Beschreibung von Strömungsverhältnissen in porösen Medien verwendet. Sie wird aus dem Gesetz von DARCY

$$v_f = -\frac{k k_r}{\mu S_r} (\nabla p \zeta g \nabla z)$$

und der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial(nS_r\zeta)}{\partial t} + \nabla(nS_r\zeta v) = q$$

hergeleitet (siehe Kapitel 2.2.2.3 Die Druckgleichung):

$$\left(S_r \zeta S_{op} + n \zeta \frac{dS_r}{dp}\right) \frac{\partial p}{\partial t} \quad + \quad n S_r \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad - \quad \nabla \left(\frac{\zeta k k_r}{\mu} (\nabla p + \zeta g \nabla z)\right) = q$$

Speicherterm

Dichterspeicherterm

Massenfluss

Quellenterm

Da die Dichte und die Viskosität von der Konzentration und der Temperatur abhängen, entsteht eine Kopplung der Strömungsgleichung mit einem überlagerten Konzentrations- und Temperaturfeld.

Im Fall konstanter Dichte entfällt der Dichtespeicherterm in der Strömungsgleichung:

$$nS_r \frac{\partial \varsigma}{\partial t} = 0$$

Jetzt ist es möglich die Druck-Formulierung der Strömungsgleichung unter Anwendung des Gesetzes von HUBBERT (Beziehung zwischen hydrostatischem Druck p und Potenzial h):

$$h = z + \frac{p}{\zeta g}$$

in eine Potenzialgleichung mit der Unbekannten h umzuformulieren.

2.2.2.5 Die Wärmetransport - Energiegleichung

Der Transport und die Speicherung eines idealen Tracers finden nur in den Poren des porösen Mediums statt. Die Wärmeleitung und die Wärmespeicherung finden sowohl in den Poren als auch in der Feststoffmatrix selbst statt. Im Einzelnen beinhaltet die Wärmetransportgleichung die Vorgänge der Konvektion, Dispersion/Diffusion sowie die Wärmeleitung und die Wärmespeicherung.

Die Konvektion von Energie mit der Abstandsgeschwindigkeit v und der Wärmemassenfluss aufgrund von hydromechanischer Dispersion werden wie bei der Stofftransportgleichung beschrieben:

$$j_k = vT$$
 und $j_d = -D\nabla T$

D stellt hierbei den symmetrischen Dispersionstensor dar. Dessen Koeffizienten sind wie folgt definiert:

$$D_{11} = \alpha_{\rm L} \frac{v_4^2}{v} + \alpha_{\rm TH} \frac{v_2^2}{v} + \alpha_{\rm TV} \frac{v_3^2}{v}$$
$$D_{22} = \alpha_{\rm TH} \frac{v_4^2}{v} + \alpha_{\rm L} \frac{v_2^2}{v} + \alpha_{\rm TV} \frac{v_3^2}{v}$$

$$D_{33} = \alpha_{TV} \frac{\boldsymbol{\nu_1^2}}{\boldsymbol{\nu}}_{+} \alpha_{TV} \frac{\boldsymbol{\nu_2^2}}{\boldsymbol{\nu}} + \alpha_{L}$$

33

 $D_{21} = D_{12} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_1 v_2}{v}$

$$D_{31} = D_{13} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{\boldsymbol{v}_1 \boldsymbol{v}_3}{\boldsymbol{v}}$$

mit:

 v_1 , v_2 , v_3 = Geschwindigkeiten im kartesischen Koordinatensystem [m/s]

v = Betrag des Abstandsgeschwindigkeiten [m/s]

 α_L = longitudinale Dispersivität [m]

 α_{TH} = transversal-horizontale Dispersivität [m]

 α_{TV} = transversal- vertikale Dispersivität [m]

Der Energiefluss aufgrund von Wärmeleitfähigkeiten sowohl des Fluids als auch der Matrix werden durch das erste FICK'sche Gesetz beschrieben:

$$j_{m,w} = -\lambda_w \nabla T$$
 im Fluid und $j_{m,s} = -\lambda_s \nabla T$ in der Matrix

Das Gesetz der Energieerhaltung liefert die allgemeine Energiegleichung:

$$\frac{\partial (n\rho S_r c_w T)}{\partial t} + \frac{\partial ((1-n) c_s T)}{\partial t} + \nabla \left(n\rho S_r c_w (j_k + j_{m,w} + j_d) + (1-n) c_s j_{m,s} \right) = q c_w T^* + R_T$$
[W/m³]

wobei T die Summe aller Energiequellen und -senken und T* die Temperatur zu- und abfließender Mengen darstellt.

Wendet man die Produktregel auf den Konvektionsterm an, setzt die Kontinuitätsbedingung der Strömungsgleichung ein und führt zudem den Wärmediffusionsparameter $\sigma_w = \lambda_w / (\rho c_w)$ und $\sigma_s = \lambda_s / (\rho c_w)$ ein, ergibt sich die instationäre Energiegleichung:

$$(nS_r\rho c_W)\frac{\partial T}{\partial t} + ((1-n)\rho_s c_s)\frac{\partial T}{\partial t} + (nS_r\rho c_w)v\nabla T - \nabla \times (nS_r\rho c_w(\sigma_w I + D)\nabla T)$$
$$-\nabla ((1-n)\rho c_w\sigma_s I\nabla T) = qc_w(T^{in} - T) + nS_r\rho_w c_w\gamma_w + (1-n)\rho_s c_s\gamma_s [W/m^3]$$

mit:

 $\rho_{w,s}$ = Dichte des Fluids (w) oder der Matrix (s) [kg/m³]

c_{w,s} = spezifische Wärmekapazität [Ws/(kg K)]

 $\lambda_{w,s} = W$ ärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

 $\varsigma_{w,s} = Diffusions parameter = \lambda_{w,s} / (\rho_{w,s} c_{w,s}) = [m^2/s]$

 $D = Dispersionstensor [m^2/s]$

Sr = Sättigungsgrad [-]

n = durchflusswirksamer Porenraum [-]

q = div v (aus Kontinuitätsbedingung) [1/s]

Bei der Strömungsgleichung und der Energiegleichung handelt es sich um ein gekoppeltes System von Differentialgleichungen. Der Dichtespeicherterm der Strömungsgleichung lautet in diesem Fall:

$$nS_r \frac{\partial \rho}{\partial t} = \left(nS_r \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \frac{\partial T}{\partial t}$$

2.2.2.6 Ortsdiskretisierung

Die Modellierung der komplexen geologischen Strukturen in der Natur erfordert die Diskretisierung mit Elementen unterschiedlicher Dimensionalität (Abbildung 17). Mit der Methode der Finiten Elemente stehen verschiedene Elementtypen zur Verfügung: Linienelemente beschreiben im allgemeinen Fall Fließkanäle. In zweidimensionalen Modellen werden damit auch Klüfte nachgebildet. Flächenelemente (Drei- oder Viereck) modellieren in dreidimensionalen Modellen die Klüfte oder Störungen. Mit diesem Elementtyp wird das Kontinuum in zweidimensionalen Beispielen approximiert. Volumenelemente (Tetraeder, Pentaeder oder Hexaeder) dienen zur Beschreibung des Kontinuums (Kluftmatrix) in dreidimensionalen Modellen. Diese Elemente können in SPRING beliebig kombiniert werden.



Abbildung 17 Kopplung von 1D-, 2D- und 3D-Elementen¹⁹ (König, 2012)

2.2.2.7 Stabilitätsbedingung für die Ortsdiskretisierung

Durch die Konvektion, entsteht ein unsymmetrisches Gleichungssystem. Gewöhnlich wird dieses mit einem Gauß-Eliminations-Verfahren gelöst. Die Größe der Konvektion verändert zudem die Genauigkeit der berechneten Konzentrationsverteilung. Die berechneten Konzentrationen oszillieren umso stärker, je größer die Konvektion gegenüber der Diffusion-Dispersion ist. Die Maßzahl für das Verhältnis von Konvektion zu Diffusion-Dispersion ist die Pecletzahl. Sie berechnet sich aus dem Quotienten der Konvektion und der Diffusion-Dispersion.

$$P_{e} = \frac{v\Delta l}{D}[-]$$

mit:

 Δl = Länge der Diskretisierung, steht im Verhältnis zur verwendeten Elementlänge

Sie bildet im Zwei- und Dreidimensionalen die längste Stromlinie in Richtung der Geschwindigkeit.

Die Pecletzahl sollte bei der numerischen Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente den Wert 10 als Stabilitätsgrenze nicht überschreiten. Dazu sollten die Bereiche, in denen sich die Stofffahne ausdehnt, sehr fein diskretisiert sein.

2.2.2.8 Stabilitätskriterium für die Zeitdiskretisierung

Ein weiteres Stabilitätskriterium ist die Courantzahl:

¹⁹König, C. M. (2012). SPRING Benutzerhandbuch Version 4.1. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

$$C_o = \frac{\Delta t v}{\Delta l}$$

mit:

 Δt – Zeitschrittweite [s]

 Δl = längste Stromlinie in Richtung der Geschwindigkeit in einem Element [m]

v = Geschwindigkeit [m/s]

Die Courant-Zahl darf den Wert 1 nach dem Courant-Kriterium nicht überschreiten. Sie ist die Stabilitätsgrenze für das instationäre konvektive Transportproblem. Aus diesem Stabilitätskriterium lässt sich die maximal erlaubte Größe für den Zeitschrittwert Δt

errechnen. Die gewählte Zeitschrittlänge und die zugehörige Courantzahl haben einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der berechneten Approximation.

Für die Diskretisierung der instationären Strömungsgleichung wird ein implizites Eulerverfahren als Zeitdiskretisierung verwendet:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = L(p) \rightarrow \frac{p(t + \Delta t) - p(t)}{\Delta t} = \theta L(p(t + \Delta t)) + (1 - \theta)L(p(t))$$

Die instationären Randbedingungen werden dabei voreingestellt voll implizit behandelt.

Es gilt:

 $\theta = 1$

Bei Mengenrandbedingungen ist alternativ eine explizite Behandlung der instationären Randbedingungen möglich.

Dann gilt:

 $\theta = 0$

Bei der Anwendung der Methode der Finiten Elemente sollten die Zeitschrittwerte als auch die Elemente möglichst klein gehalten werden. Werden die Stabilitätskriterien verletzt, so wird die Lösung der Stofftransportgleichung ungenau und es treten Oszillationen, numerische Dispersion, auf.²⁰ (König, 2009)

2.2.3 Umsetzung im Simulationsprogramm SPRING Version 4.0

Um ein Grundwassermodell aufzubauen, ist zuerst die Erstellung des Finite-Element-Netzes erforderlich. Über *Datei NEU* erscheint folgendes Fenster (Abbildung 18) zur Erstellung eines neuen Projekts. Hier lassen sich grundlegende Daten, wie zur Art des Modells, Zeiteinheit, Maßstab, Ausdehnung in x-y-Richtung angeben.

riter							
SPRING 4.0							
Tutorial, Schritt 1							
2D-Modell							
Тур		Zeiteinheit		Maßs	tab		
e Horizontalmodell		Jahr	Monat	X-Richtung Y-Richtung		10000	
🗇 Vertikalmodell		🔘 Tag	🔘 Sekunde			10000	
Gebietsgrenzen							
minimale X-Koordinate	0		maximale X-Ko	ordinate	100		
minimale Y-Koordinate	0		maximale Y-Ko	ordinate 80			

Abbildung 18 Neues Projekt anlegen in SPRING

Liegen alle notwendigen Daten zur Modellerstellung vor und ist die generelle Entscheidung über den Modelltyp, 2D,3D oder eine Kombination aus beiden, und die Abgrenzung getroffen, so lässt sich ein systematischer Modellaufbau folgendermaßen untergliedern:

²⁰König, C. (2009). SPRING Benutzerhandbuch Version 3.4. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

- I. Erzeugen von Strukturdaten
- II. Erstellung von Konturdaten
- III. Knotenerzeugung
- IV. Erzeugung von Elementen
- V. Zuweisung von Attributen

Es folgt eine kurze Beschreibung der einzelnen Modellschritte.

I. Erzeugen von Strukturdaten

Als Strukturdaten werden Punkte, Linien und Polygone bezeichnet. Neben ihrer geometrischen Lageinformation können sie auch Dateninformationen beinhalten. Es ist somit möglich, die Rohdaten eines Modells auch unabhängig von der späteren Netzgeometrie zu erfassen und zu speichern. Bei der Erstellung von Strukturdaten und ihrer Belegung mit Daten gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Eine Extraktion aus tabellarischen Dateien ist dabei ebenso möglich wie eine interaktive Erstellung am Bildschirm.

II. Erstellung von Konturdaten

Vor der Erstellung eines FE-Netzes ist es notwendig die geometrischen Lageinformationen auszuwählen, die als Netzknoten oder Elementkanten in der späteren Netzgeometrie abgebildet werden sollen. Meistens erfolgt dies aus den Strukturdaten, wenn zum Beispiel die Lage von Brunnenreihen als Zwangsgeometrien in Konturen umgewandelt wird. Anschließend werden diese Konturen mit weiteren Parametern zur Netzgenerierung, zum Beispiel Brunnenparameter für die exponentielle Knotengenerierung um Brunnenknoten oder maximale Abstände oder Teilungspunkte bei langen Streckenkonturen, versehen. Vor der Netzerstellung ist allerdings noch eine Optimierung der Konturen notwendig. Probleme bei der Netzgenerierung in Form von sich schneidenden, überlagernden oder zu nahe aneinander liegenden Konturen können so vermieden werden. Aus den Konturen muss sich ein äußerer Konturrand definieren. Dieser begrenzt das Modell nach außen.

III. Knotenerzeugung

Die Erzeugung von Knoten aus den Konturen lässt sich in mehrere Unterschritte einteilen. Zunächst erfolgt eine Generierung auf den Konturen und ihrer Umgebung mit einem Randknotengenerator. Danach erfolgt die Generierung in konturenfreien Bereichen mithilfe eines Rasterknotengenerators. In Übergangsbereichen kann abschließend eine Generierung per Hand erfolgen.

IV. Erzeugung von Elementen

Nach Abschluss der Knotengenerierung werden die Knoten zu Elementen vernetzt. Ein Triangulierungsalgorithmus erzeugt zunächst Dreieckselemente unter Berücksichtigung aller Knoten. Anschließend können geeignete Dreieckselemente zu Vierecken zusammengefügt werden, um Rechen- und Speicheraufwand zu reduzieren.

V. Zuweisung von Attributen

Attribute werden nach Abschluss der Netzgenerierung und einer Kontrolle der Netzgeometrie zugewiesen. Attribute können aus den Strukturdaten zugewiesen werden. Eine andere Möglichkeit ist die Interpolation von Attributen mithilfe verschiedener Interpolationsalgorithmen. Zudem ist eine Zuweisung von Einzelwerten oder die Erzeugung stochastisch verteilter Knoten- und Elementwerten möglich. Eine Bearbeitung einzelner Knoten und Elemente, sowie die Modifizierung, Verrechnung und Darstellung bereits vorhandener Daten ist ebenfalls möglich.

Die eigentliche Modellbildung ist jetzt abgeschlossen. Nun muss geprüft werden, ob das Modell in sich stimmig ist oder Fehler enthält. Dies geschieht durch Aufrufen des Moduls DADIA unter dem Punkt *Modellprüfung*. DADIA liest die Datei, kontrolliert sie und legt sie in einer binären Hintergrund- Bibliothek ab.

Nun kann die gewünschte Berechnung gestartet werden. Die Rechenmodule speichern die Ergebnisse ebenfalls in erwähnter Hintergrund- Bibliothek ab.

Eine grafische Darstellung der Eingabedaten und Ergebnisse ist unter anderem mithilfe von PLOGEO möglich.²¹ (König, 2012)

²¹ König, C. M. (2012). SPRING Benutzerhandbuch Version 4.1. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

3.1 Projektbeschreibung des Bürogebäudes

In Dortmund plante eine Firma die Errichtung eines Bürogebäudes mit Wohnungen. Das geplante Gebäude soll mittels geothermischer Energie beheizt und gekühlt werden. Die geothermische Energie soll dabei durch die Installation von Erdwärmesonden bereitgestellt werden.

Wie bereits erwähnt, ist insbesondere bei Anlagen mit zusätzlichen Wärmequellen und –senken sowie Anlagen mit einer Wärmepumpen-Gesamtleistung von > 30 kW eine Berechnung der Anlagenauslegung mittels Planungswerkzeugen erforderlich²² (VDI 4640-2, 2008). Für das geplante Bürogebäude beträgt die Heizlast 77 kW und die Kühllast 70 kW. Eine Auslegung der geothermischen Anlage mittels Planungswerkzeugen ist somit nach VDI 4640-2 erforderlich.

Die Simulationsberechnungen für die Projektplanung wurden mit dem Earth Energy Designer für drei verschiedene Lastfälle, reines Heizen, aktives und passives Kühlen, vorgenommen. Für einen Vergleich mit dem Simulationsprogramm SPRING wurde nur der Lastfall reines Heizen betrachtet.

Eine numerische Simulation mit SPRING wurde nach Abschluss des Projektes im Rahmen der Bachelorarbeit durch die Autorin durchgeführt. Mit SPRING wurden Simulationsrechnungen für den reinen Heizfall mit mehreren Varianten durchgeführt und mit dem Ergebnis von EED verglichen. Eine Variante wurde mit einer einheitlichen Untergrundtemperatur, wie sie in EED verwendet wird, betrachtet. Eine weitere Variante berücksichtigt eine über die Tiefe ansteigende Untergrundtemperatur.

Eine Grundwasserströmung wurde im vorliegenden Fall nicht angesetzt, da diese zum einen im Programm EED keine Berücksichtigung finden kann und zum anderen auch am Standort des Bauvorhabens keine signifikante Grundwasserströmung vorhanden ist. Prinzipiell ist aber die Berücksichtigung einer Grundwasserströmung mit SPRING möglich.

²²VDI 4640-2. (2008). Thermische Nutzung des Untergrunds, Blatt 2. Berlin: Beuth Verlag GmbH. S. 19

3.2 Berechnungsbeispiel mit EED

Das folgende Kapitel befasst sich mit den durchgeführten Berechnungseingaben des realen Projekts in Dortmund.

3.2.1 Untergrundeigenschaften

Die Auswertung des Thermal Response Tests ergab eine Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 2,38 W/(mK) (Tabelle 4). Eine spezifische Wärmekapazität von 2,3 MJ/(m³K) für die Region Dortmund wurde der Datenbank entnommen. Eine ungestörte Bodentemperatur von 13,8 °C wurde beim Thermal Response Test festgestellt. Dieser ging direkt in die Berechnung ein, indem der geothermische Wärmefluss auf 0 W/m² gesetzt wurde. Eine programminterne Berechnung der ungestörten Bodentemperatur war also nicht mehr nötig.

Untergrundeigenschaften	Eingabewert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	2,38	W/(mK)
Spezifische Wärmekapazität	2,3	$MJ/(m^3K)$
Mittlere Temperatur an der Erdoberfläche	13,8	°C
Geothermischer Wärmefluss	0	W/m ²

Tabelle 4 Untergrundeigenschaften

3.2.2 Bohrungen und Erdwärmesonden

Für das Sondenfeld des Gebäudes wurden 12 Doppel-U-Erdwärmesonden der Firma Frank GmbH gewählt (Tabelle 5). Die einzelne Sonde hat einen Außendurchmesser von 32 mm und eine Wandstärke von 2,9 mm. Ihre Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,4 W/(mK). Als U-Rohr-Mittenabstand wurde ein Wert von 70 mm angesetzt.

Angeordnet sind die Bohrungen in einem Rechteck aus 2 x 6 Bohrungen (Abbildung 19). Dieses entspricht der Konfigurationsnummer 237 2 x 6, rectangle.

3. Berechnungsbeispiel Bürogebäude in Dortmund



Abbildung 19 Überblick Sondenanordnung in EED

Die Tiefe jeder Bohrung beträgt 140 m und der Abstand untereinander beträgt 7,5 m. Der Bohrdurchmesser ist 150 mm. Ein Übergangswiderstand von 0,01(mK)/W zwischen Rohr und Verfüllung wurde angenommen. Als Verpressmaterial wurde das Produkt Geosolid 240 mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,4 W/(mK) der Firma Fischer verwendet. Das Umwälzvolumen der Sondenanlage für alle Bohrungen beträgt 3,9 l/s.

Bohrungen und Erdwärmesonden	Eingabewert	Einheit
Sondentyp	Doppel-U	
Sondenanordnung	237	
Tiefe	140	m
Sondenabstand	7,5	m
Bohrdurchmesser	150	mm
Übergangswiderstand Rohr/Verfüllung	0,01	(mK)/W
Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung	2,4	W/(mK)
Umwälzvolumen für alle Bohrungen Q	3,9	1/s
Außendurchmesser	32	mm
Wandstärke	2,9	mm
Wärmeleitfähigkeit	0,4	W/(mK)
U-Rohr-Mittenabstand	70	mm

Tabelle 5 Bohrungen und Erdwärmesonden

3.2.3 Thermischer Bohrlochwiderstand

Der Wert für den thermischen Bohrlochwiderstand wurde durch den Thermal Response Test ermittelt. Er beträgt 0,090 (mK)/W (Tabelle 6).

Thermischer Bohrlochwiderstand	Eingabewert	Einheit
Messwert	0,090	(mK)/W
Taballa (Thamaia ahan Dabula ahaai danatan d		

Tabelle 6 Thermischer Bohrlochwiderstand

3.2.4 Wärmeträgerflüssigkeit

Als Wärmeträgerflüssigkeit wurde das Produkt OptiFlow[®]N der Firma GWE des Konzerns Bauer mit einer Konzentration von 20% des Trägermittels in einem Gemisch mit Wasser eingesetzt. Bei einer Temperatur von 0 °C besitzt es eine Wärmeleitfähigkeit von 0,48 W/(mK) und eine spezifische Wärmekapazität von 3850 J/(kgK) (Tabelle 7). Die Dichte entspricht unter genannten Bedingungen 1021 Kg/m³ und die Viskosität beläuft sich auf 0,0032 Kg/(ms). Bei einer Konzentration von 20% der Wärmeträgerflüssigkeit liegt der Gefrierpunkt bei -10 °C.

Wärmeträgerflüssigkeit	Eingabewert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	0,48	W/(mK)
Spezifische Wärmekapazität	3850	J/(kgK)
Dichte	1021	Kg/m³
Viskosität	0,0032	Kg/(ms)
Gefrierpunkt	-10	°C

Tabelle 7 Wärmeträgerflüssigkeit

3.2.5. Grundlast

Die Wärmeenergie des Gebäudes wurde mit 122,4 MWh ermittelt. Die Kühlenergie beträgt 42,24 MWh. Diese gesamte Jahreswärme- beziehungsweise Jahreskühlenergie wird mit einer vorgegebenen Verteilung auf das Jahr prozentual verteilt. Die Verteilung über das Jahr kann nachfolgender Tabelle 8 entnommen werden.

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe beträgt 4,1.

Grundlast	Eingabewert	Eingabewert	Eingabewert			
	Heizen	Kühlen	Erdseite			
Gesamtjahr	122,4MWh	42,240MWh				
Jahresarbeitszahl	4,1	4,1				
	%	%	MWh			
Januar	0,174	0	21,054			
Februar	0,171	0	20,686			
März	0,150	0	18,116			
April	0,108	0,016	9,154			
Mai	0,011	0,149	-6,811			
Juni	0,008	0,203	-9,926			
Juli	0,001	0,292	-15,250			
August	0,002	0,232	-12,005			
September	0,013	0,088	-3,421			
Oktober	0,028	0,020	1,540			
November	0,127	0	15,301			
Dezember	0,207	0	25,093			
Summe	1	1	63,531			

3.	Berechn	ungsbeisp	oiel Büro	gebäude	in D	ortmund
•••						01011001100

Tabelle 8 Grundlast

Im Lastfall reines Heizen wird nur die benötigte Wärmeenergie als Belastung in EED angesetzt.

3.2.6 Spitzenlast

Die Heiz- und Kühlspitzen, ihre Verteilung über das Jahr und ihre Dauer lassen sich untenstehender Tabelle 9 entnehmen.

Die maximale Heizlast entspricht der maximalen Heizleistung der Wärmepumpe.

In den kältesten Monaten des Jahres, von Dezember bis Februar, sind 24 Stunden kontinuierliche, maximale Heizleistung möglich. Der entsprechende Wert wurde eingetragen.

Im Sommer werden nicht mehr als 10 Stunden maximale Kühlleistung erwartet. Früh am Morgen und während der Nacht ist normalerweise keine Kühlung erforderlich. Daraus ergibt sich eine maximale Dauer von 10 Stunden.

3. Berechnung	sbeispiel Bürogebä	ude in Dortmund		
Spitzenlast	Eingabewert	Eingabewert	Eingabewert	Eingabewert
	Heizspitzen		Kühlspitzen	
	Leistung	Dauer	Leistung	Dauer
	kW	h	kW	h
Januar	77	24	0	0
Februar	77	24	0	0
März	77	12	0	0
April	77	6	0	0
Mai	0	0	0	0
Juni	0	0	70,4	4
Juli	0	0	70,4	8
August	0	0	70,4	10
September	0	0	70,4	8
Oktober	77	6	0	0
November	77	12	0	0
Dezember	77	24	0	0

3	Berechnung	sheisniel	Biirog	ebäude	in D	ortmund
э.	Dereemung	sucispici	Durog	coauac	$m \nu$	ortinunu

Tabelle 9 Spitzenlast

Für den Vergleich mit SPRING wurden keine Spitzenlasten beachtet.

3.2.7 Dauer der Simulation

Die Dauer der Simulation wurde auf 25 Jahre gesetzt und als Monat der Inbetriebnahme der Anlage wurde der Dezember angenommen (Tabelle 10).

Dauer der Simulation	Eingabewert	Einheit					
Dauer der Simulation	25	Jahre					
Monat der Inbetriebnahme	Dezember	[-]					

Tabelle 10 Dauer der Simulation

3.2.8 Berechnung

Eine mittlere über mehrere Wochen andauernde Grundlasttemperatur von unter 0 °C sollte vermieden werden und die Temperaturen sollten auch in Spitzenlast-Zuständen vorzugsweise nicht unter -5 °C sinken.

Für die minimale Fluid-Mitteltemperatur wurde 2 °C angenommen (Tabelle 11).

Für den Lastfall Heizen wurde eine Maximum-Fluidtemperatur von 17 °C angenommen.

Als Kriterium sollte sowohl die Spitzenlasttemperaturen, als auch die Grundlasttemperaturen beachtet werden. Für die reale Auslegung der Anlage wurden die Spitzenlasttemperaturen als Kriterium angesehen. Für den Vergleich mit SPRING gilt die Grundlasttemperatur als kritische Grenze.

Fluidbeschränkungen	Eingabewert	Einheit
Minimale Fluid-Mitteltemperatur	2	°C
Maximale Fluid-Mitteltemperatur	17	°C

Tabelle 11 Fluidbeschränkungen

Die Ergebnisse des Projekts mit EED werden in Kapitel 4.1 Ergebnis EEDvorgestellt.

3.3 Berechnungsbeispiel mit SPRING

Bei der Umsetzung des Beispiels in SPRING wurde nur der Lastfall Heizen ohne Betrachtung der Spitzenlasten abgebildet. Bei der Umsetzung in SPRING geht es in erster Linie um das generelle Vorgehen mit einem numerischen Rechnungsverfahren. Der Unterschied, der durch andere Lastfälle und das Integrieren einer Kühlung ergibt, besteht im Wesentlichen in einer Veränderung der instationären Eingabedatei über den Wärmeentzug mithilfe des Attributs QKON.

Wie in Kapitel 2.2.3 Umsetzung im Simulationsprogramm SPRING Version 4.0 bereits erwähnt, ist mit SPRING zunächst ein Modell passend zum geplanten Standort zu erstellen.

Als Modellrand wurde ein Kreis mit einem Durchmesser von 20 km gewählt, um jegliche Beeinflussung des Randes auf die Erdwärmesonden auszuschließen.

Die folgenden Kapitel beschreiben die durchgeführten Bearbeitungsschritte bis ein nutzbares Modell erstellt ist.

3.3.1 Erstellen von Strukturdaten

Die Strukturen (Abbildung 20) sind zur Erstellung des Elementnetzes und zur Datenzuweisung verwendet worden. Es gibt beispielsweise eine Struktur für den Modellrand und für die Sondenanordung.



Abbildung 20 Strukturen im Modell Dortmund

3.3.2 Erstellung von Konturdaten

Aus Strukturen, die eine Zwangsgeometrie für das spätere Elementnetz darstellen, werden Konturen erstellt. Als Konturen wurde ein äußerer Kreis, der das Modell begrenzt, erstellt (Abbildung 21). Zwei weitere Konturen verbinden die einzelnen Erdwärmesonden.



Abbildung 21 Konturdaten im Modell Dortmund

3.3.3 Knotenerzeugung

Mit Hilfe des Randknoten- und Rasterknotengenerators in SPRING werden die Knoten für das Modell erzeugt. Das Modell Dortmund besteht aus 31159 Knoten (Abbildung 22 und Abbildung 23).



Abbildung 22 Knotenerzeugung im Modell Dortmund

+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$^+$	+	+	+	+	+	+	+
$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	+
+	+	+	+	$^+$	+	+	+	$^+$	+	$^+$	+	+	+	$^+$	+	+	+	+	+	$^+$	+	+	$^+$	$^+$	+	$^+$	$^+$	+	$^+$	$^+$	+
+	+	+	+	+	$^+$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$^+$	+	+	+	+
$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	$^+$	+	$^+$	+	+	$^+$	$^+$	+	$^+$	$^+$	+	+	$^+$	$^+$	+	$^+$	$^+$	$^+$	+	$^+$	+	$^+$	$^+$	+	$^+$	$^+$	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	$^+$	$^+$	+	+	+	+	$^+$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$^+$	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$^+$	$^+$	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++		#	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	#		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	+++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Abbildung 23 Ausschnitt nach Knotenerzeugung im Modell Dortmund

3.3.4. Erzeugung von Elementen

Die erzeugten Knoten werden mit einem Elementgenerator in SPRING zu einem Elementnetz verbunden. Das Modell Dortmund enthält 31921 Elemente. Die Elementfläche nimmt zu den geplanten Erdwärmesonden hin ab (Abbildung 24).



Abbildung 24 Erzeugung von Elementen im Modell Dortmund

3.3.5 Stabilitätskriterien für FE- Modelle

3.3.5.1 Horizontale Diskretisierung

An den Modellrändern haben die Elemente eine Kantenlänge zwischen 65 m und 170 m. Wohingegen die Elementkanten rund um die Erdsonden eine Länge zwischen 0,30 m und 3,10 m aufweisen. Das Stabilitätskriterium besagt, dass die Elementfläche im Bereich der Ausbreitung möglichst klein sein soll.

Ein Ausschnitt des Modells, welches die horizontale Diskretisierung im Bereich der Erdwärmesonde zeigt, ist in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25 Raster der Erdwärmesonden

3.3.5.3 Vertikale Diskretisierung

Die vertikale Diskretisierung wird unter anderem durch die hydrogeologische Schichtung im Untersuchungsraum festgelegt. Entsprechend eines Baugrundgutachtens wurde ein hydrogeologisches Schichtmodell gemäß Tabelle 12 verwendet. Aufgrund der vorliegenden Baugrundaufschlüsse und den Angaben in den geologischen und hydrogeologischen Karten ist im geplanten Baubereich mit einer relativ homogenen Schichtenabfolge zu rechnen.

Das Modell Dortmund wurde in 5 m mächtige Elemente diskretisiert, um einen möglichst regelmäßigen Entzug der Wärme abbilden zu können. Unterhalb der Erdsonde ist die vertikale Diskretisierung ebenfalls mit einer Mächtigkeit von 5 m versehen worden, um einen regelmäßigen Vertikalschnitt zu erhalten. Für das vorliegende Modell sind so 40 Elementschichten konstruiert worden. Die obersten zwei Schichten stellen das Quartär mit einer Gesamtmächtigkeit von 10 m dar. Zudem wurde die Tiefe der Erdwärmesonden bei 140 m, also -40 m NN im Elementnetz berücksichtigt. Die abschließenden Schichten reichen bis in eine Tiefe von -100 NN.

Geologische Einheit	OK [m NN]	Basis [m NN]	Mächtigkeit [m]
Quartär	100	90	10
Karbon	90	-100	190

Tabelle 12 Geologischer Aufbau

3.3.6 Zuweisung von Attributen

Damit mit dem erzeugten Modell Berechnungen durchgeführt werden können, müssen noch den Knoten und Elementen Attribute zugewiesen werden. In den folgenden Kapiteln werden die zugewiesenen Attribute kurz beschrieben.

3.3.6.1 Geländehöhe (Attribut GELA)

Das Attribut GELA beschreibt die Geländehöhe, die in dem Modell Dortmund 100 m NN beträgt.

3.3.6.2 Durchlässigkeitsbeiwert (Attribut KWER)

Für das Quartär wurde eine mittlere Durchlässigkeit von 6 * 10^{-5} m/s angesetzt. Das Karbon besteht größtenteils aus Sandstein und Tonstein. Ihm wurde ein Durchlässigkeitswert von 10^{-7} m/s zugewiesen.

3.3.6.3 Dispersivität (Attribut DISP)

Die Dispersivitäten wurden aus Literaturwerten (Abbildung 26) entnommen. Feldversuche haben gezeigt, dass die Größenordnung der Dispersivitäten unter anderem von der Größenordnung der beobachteten Ausbreitungslänge abhängt. Die Dispersivität wurde daher konstant mit 0,001 m angesetzt.



Abbildung 26 Longitudinale Dispersivität in Abhängigkeit von der Ausbreitungslänge aus unterschiedlichen Feldversuchen²³ (Gelhar, Welty, & Rehfeldt, 1992)

3.3.6.4 Temperaturen (Attribute AKON und 1KON)

Das ungestörte Temperaturprofil wurde durch einen Thermal Response Test ermittelt und konnte somit für die Variante mit den über die Tiefe steigenden Temperaturen als Anfangstemperatur, Attribut AKON, übernommen werden. Für die Variante mit konstanter Temperatur wurde die mittlere, ungestörte Untergrundtemperatur von 13,8 °C, ebenfalls ermittelt durch den Thermal Response Test, angesetzt. Dem Modellrand wurde zusätzlich eine konstant bleibende Temperatur, Attribut 1KON, zugewiesen.

3.3.6.5 Grundwasserstand (Attribute EICH und POTE)

Für beide Varianten ohne Grundwasserströmung wurde ein Grundwasserstand von 94 m NN angenommen.

Das Attribut POTE stellt dabei die gleichbleibende Randbedingung des Grundwassers dar. Das Attribut EICH steht für das Sollpotenzial. Dieses muss zunächst durch SPRING dichtekorrigiert werden. Eine Erläuterung dazu findet sich in Kapitel 3.2.8 Berechnung

²³Gelhar, L. W., Welty, D., & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resources Research.

3.3.6.6 Porosität (Attribut PORO)

Dem Karbon wurde ein Porenanteil von 0,05 zugewiesen. Da das Karbon den größten Anteil, etwa 93 %, im Bereich der Erdwärmesonde ausmacht, konnte auf eine Zonierung verzichtet werden und der Porenanteil des Karbons wurde über die gesamte Mächtigkeit angesetzt.

3.3.6.7 Wärmeflussrate (Attribut QKON)

QKON entspricht der Wärmeleistung, die dem Erdreich entnommen wird, dividiert durch das Innenvolumen aller Sonden. Seine Einheit ist W/m³. Ein positives Vorzeichen der Wärmeleistung bedeutet einen Wärmezufluss in den Untergrund hinein. Da dies bei einer Erdwärmesondenanlage bei reiner Heizlast nicht der Fall ist, ist das Vorzeichen negativ, da dem Boden Wärme entzogen wird. Bei dem reinen Kühlen des Gebäudes ist das Vorzeichen entsprechend positiv.

$$QKON = \frac{-W"armeleistung}{Fluidvolumen} [W/m^3]$$

 $W"armeleistung = \frac{-W"armemenge aus Erdreich}{Betriebsstunden} [W]$

Die Wärmemenge, die dem Untergrund entnommen wird, ist die Heizlast des Gebäudes abzüglich des Bedarfs der Wärmepumpe, der durch Strom geliefert wird und somit nicht aus der Erde entnommen werden muss. Die beiden Anteile berechnen sich mit:

Wärmemenge aus Erdreich = Heizlast* $(1 - \frac{1}{Jahresarbeitszahl})$ [W]

 $Bedarf W \ddot{a} rmepumpe = Heizlast^* \left(\frac{1}{Jahresarbeitszahl}\right) [W]$

Bei EED wird dieser Wert pro Monat ermittelt, deshalb wird auch für die Berechnung mit SPRING eine monatliche Wärmemenge und somit ein monatsbezogenes QKON ermittelt.

Die Monatsheizlast entspricht der Jahresheizlast multipliziert mit ihrem monatlichen Anteil. Die Monatsheizlast berechnet sich mit:

Monatsheizlast = Jahresheizlast * Monatsanteil

Der monatliche Anteil der Lastverteilung ist regional unterschiedlich.

Die Jahresheizlast des Gebäudes entspricht 122,4 MWh. Ihre Jahresarbeitszahl beträgt 4,1. Nun lassen sich die Wärmemenge, die der Erdseite entzogen werden soll und der Bedarf der Wärmepumpe berechnen (Tabelle 13).

Monat	Anteil	Monats-heizlast [Wh]	Erdseite Entzug/Monat [Wh]	Bedarf Wärme- pumpe [Wh]
Januar	0,174	21.297.600	16.103.063,41	5.194.536,59
Februar	0,171	20.930.400	15.825.424,39	5.104.975,61
März	0,15	18.360.000	13.881.951,22	4.478.048,78
April	0,108	13.219.200	9.995.004,878	3.224.195,122
Mai	0,011	1.346.400	1.018.009,756	328.390,244
Juni	0,008	979.200	740.370,732	238.829,268
Juli	0,001	122.400	92.546,341	29.853,659
August	0,002	244.800	185.092,683	59.707,317
September	0,013	1.591.200	1.203.102,439	388.097,561
Oktober	0,028	3.427.200	2.591.297,561	835.902,439
November	0,127	15.544.800	11.753.385,37	3.791.414,63
Dezember	0,207	25.336.800	19.157.092,68	6.179.707,32

Tabelle 13 Übersicht über die Berechnung der Wärmemenge aus dem Erdreich und des Bedarfs der Wärmenumpe

Bedarfs der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist 1590 Betriebsstunden im Jahr im Einsatz.

$$monatlicheW"armeleistung = \frac{monatlicheW"armemenge aus Erdreich\left[\frac{Wh}{Monat}\right]}{Betriebsstunden\frac{h}{Jahr}}*$$

$$monatlicher Anteil Betriebsstunden\left[\frac{1}{Jahr}\right] [W]$$

Nun lässt sich die monatliche Wärmeleistung errechnen (Tabelle 14).

Monatliche Wärmemenge aus Erdreich [Wh]	Anteil	Monatliche Wärmeleistung [W]
-16.103.063,41	0,174	-1762,222
-15.825.424,39	0,171	-1701,980
-13.881.951,22	0,15	-1309,618
-9.995.004,878	0,108	-678,906
-1.018.009,756	0,011	-7,043
-740.370,732	0,008	-3,725
-92.546,341	0,001	-0,058
-185.092,683	0,002	-0,233
-1.203.102,439	0,013	-9,837
-2.591.297,561	0,028	-45,633
-11.753.385,37	0,127	-938,792
-19.157.092,68	0,207	-2494,037

Tabelle 14 Berechnung der monatlichen Wärmeleistung

Um das QKON auszurechen, muss anschließend das Fluidvolumen bestimmt werden.

 $QKON = \frac{-W"armeleistung}{Fluidvolumen} [W/m^3]$

Das Fluidvolumen ist das Volumen aller insgesamt 48 Erdwärmesondenrohre (Abbildung 27) in den 12 Erdwärmebohrungen. (Abbildung 28)



Abbildung 27 Sondenfeld mit 12 Bohrungen und 48 Erdwärmesonden



Abbildung 28 Querschnitt einer Erdwärmesonde

Das Fluidvolumen einer einzelnen Erdwärmesonde (Abbildung 29) ergibt sich mit folgender Formel:

Fluidvolumen = $\pi * r^2 * h * 4 [m^3]$



Abbildung 29 Übersicht Größen an einer Erdwärmesonde

Die Höhe beziehungsweise Länge der Erdwärmesonde beträgt 140 m. Daraus ergibt sich ein Fluidvolumen pro Sonde von:

Fluidvolumen pro Sonde = $\pi * 0,0131 \text{m}^2 * 140 \text{m}$

Fluidvolumen pro Sonde = $0,07547802 \text{ m}^3$

Pro Bohrung mit seinen vier Erdwärmesondenrohren ergibt sich ein Fluidvolumen von 0,303 m³ und ein gesamtes Fluidvolumen für alle 12 Bohrungen von 3,622 m³.

Mit der Annahme, dass an allen Bohrungen die gleiche Wärmeleistung entzogen wird, lässt sich das QKON berechnen (Tabelle 15).

 $QKON = \frac{-W"armeleistung}{Fluidvolumen} [W/m^3]$

Monat	Monatliche	Monatliche Wärmeleis-	QKON pro
	Wärmeleistung [W]	tung pro Bohrung [W]	Bohrung [W/m ³]
Januar	-1762,222	-146,852	-489,506
Februar	-1701,980	-141,832	-472,772
März	-1309,618	-109,135	-363,783
April	-678,906	-56,575	-188,585
Mai	-7,043	-0,587	-1,956
Juni	-3,725	-0,310	-1,0348
Juli	-0,058	-0,0049	-0,016
August	-0,233	-0,019	-0,065
September	-9,837	-0,820	-2,732
Oktober	-45,633	-3,803	-12,676
November	-938,792	-78,233	-260,776
Dezember	-2494,037	-207,836	-692,788

Tabelle 15 Werte für QKON im Modell Dortmund

Das QKON pro Bohrung wird anschließend noch durch 29 dividiert, da an einer Bohrung im Modell 29 Knotenschichten existieren. Dadurch wird ein gleichmäßiger Wärmeentzug aus dem Erdreich simuliert. Da die Berechnung über 25 Jahre erfolgen soll, wird aus diesen Werten für ein Jahr eine instationäre Eingabedatei erstellt, in der sich der Wärmeentzug 25 Mal wiederholt. Der erste Wärmeentzug findet, analog zu den Berechnungen in EED, im 12. Monat, im Dezember statt.

3.3.6 Berechnung

Ziel der Modellerstellung ist es den Wärmetransport zu berechnen. Dabei sollte die Berechnung der Sättigung, der Dichte und der Viskosität iterativ erfolgen. Ein Dämpfungsfaktor von 0,5 wurde angesetzt und die Anzahl der Iterationen auf zwei begrenzt. Eine höhere Anzahl an Iterationen war in diesem Beispiel nicht erforderlich, da sich die Werte nach erfolgter zweiter Iteration kaum noch veränderten.

Im nächsten Schritt wurden die Parameter für die dichteabhängige Berechnung eingegeben. Die Referenztemperatur wurde mit 13,8 °C angenommen. Diese Temperatur stellt die mittlere ungestörte Bodentemperatur dar und wurde in der Mitte der Erdwärmesondenanlage in 70 m Tiefe ermittelt. Die Dichte der Referenztemperatur entspricht 999,271 kg/m³. Die dichteabhängige Steigungskurve verläuft exponentiell. SPRING verwendet programmintern jedoch nur eine lineare Gerade. Daher wird die dichteabhängige Steigungskurve nur annähernd wiedergespiegelt (Grüne Gerade Abbildung 30).



3. Berechnungsbeispiel Bürogebäude in Dortmund

Abbildung 30 Dichteabhängige Steigungskurve in SPRING

Durch eine manuelle Änderung der Dichtesteigung von den voreingestellten -0,375 kg/(m^{3} °C) auf -0,0375 kg/(m^{3} °C) verläuft diese verbesserte Gerade (Rote Gerade Abbildung 30) im Bereich von 0 °C bis 20 °C wesentlich näher an der ursprünglichen dichteabhängigen Kurve.

Unter dem Punkt *Strömung* wurde als Gleichungslöser das iterative Lösungsverfahren gewählt.

Als Anfangsbedingung sollte die Startpotenziale (EICH) dienen.

Unter dem Registerreiter *Wärme* wurden verschiedene Parameter zum Fluid und zu der Matrix bestimmt.

Der Thermal Response Test ergab eine Gesamtwärmeleitfähigkeit des Untergrundes von 2,38 W/(mK). Dieser muss bei SPRING in die einzelnen Wärmeleitfähigkeiten des Fluids und der Matrix aufgeteilt werden. Da sich die größte Fläche der Erdwärmesonde im Karbon befindet, geht der Porenanteil des Karbons, angenommen mit 0,05, in die Berechnung ein.

Die Wärmeleitfähigkeit der Matrix berechnet sich mit:

Wärmeleitfähigkeit Fluid * Porenanteil + Wärmeleitfähigkeit Matrix * Porenanteil Matrix = Gesamtwärmeleitfähigkeit

0,6 W/(mK) * 0,05 + X * 0,95 =2,38 W/(mK)

Daraus ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit der Matrix von 2,47 W/(mK).

Das EED Programm gibt eine spezifische Wärmekapazität für den Raum Dortmund für Tonstein und Sandstein von 2,3 MJ/m³K vor. Bei SPRING muss jedoch eine Wärmekapazität in kJ/kgK angegeben werden. Eine Umrechnung, die die Dichte miteinbezieht, ist deswegen noch erforderlich.

Die Umrechnung erfolgt mit:

Wärmekapazität * Dichte = spezifische Wärmekapazität

Wärmekapazität = spezifische Wärmekapazität / Dichte

 $2300 \text{ kJ/m^3K} / 2650 \text{ kg/m^3} = 0,868 \text{ kJ/kgK}$

Eine Übersicht der eingegebenen thermischen Bodenkennwerte findet sich in Tabelle 16.

Stoff	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Wärmekapazität [kJ/kgK)]	Trockenrohdichte [kg/m³]
Fluid	0,6	4,182	1000
Matrix	2,47	0,868	2650

Tabelle 16 Thermische Bodenparameter

Als Matrixparameter wurde die Dichte der Matrix mit 2650 kg/m³ angenommen. Ihre spezifische Wärme beträgt 868 J/kgK. Die Wärmeleitfähigkeit der Matrix wurde auf 2,47 W/mK angesetzt.

Für die Fluidparameter wurde ein Skalierungsfaktor für die Viskosität mit dem Faktor 1 angesetzt. Die spezifische Wärme des Fluids beträgt 4182 (J/kg K). Die Wärmeleitfähigkeit des Fluids wurde mit 0,6 W/mK ermittelt.

Anschließend konnten verschiedene Skalierungsfaktoren für die Dispersivität festgelegt werden. Der Einfluss der Dispersivität wurde mittels einer Variantenberechnung untersucht. Doch auch mit veränderten Skalierungsfaktoren änderten sich die Temperaturen nach erfolgter Berechnung nur kaum, weshalb die voreingestellten Werte letztendlich übernommen wurden. Der Skalierungsfaktor für die transversal, vertikale Ebene wurde mit 0,01 angenommen und für die transversal horizontale Ebene wurde 0,10 festgesetzt.
4. Ergebnisse beider Programme

4.1 Ergebnis EED

Die Ergebnisse werden für den reinen Lastfall Heizen beschrieben.

Diese Betrachtung stellt eine rein theoretische Betrachtung dar, da für das Bürogebäude eigentlich eine Kühlung erfolgen soll. Findet keine Kühlung für das Gebäude statt, kann es zu keiner Regeneration im Untergrund kommen. Dieser Lastfall stellt somit eine Extremsituation dar. Doch trotzdem sollte die Anlage im Stande sein den Wärmebedarf des Gebäudes zu decken.

Die Berechnung mit EED lieferte die folgenden mittleren Fluidtemperaturen. Abbildung 31 zeigt die Entwicklung der Fluidtemperatur während der Simulationsdauer von 25 Jahren für den reinen Heizlastfall für einen Betriebsbeginn im Dezember.



Abbildung 31 Lastfall Heizen, Entwicklung Fluidtemperatur während 25 Jahre Betriebszeit²⁴ (delta h Ingenieurgesellschaft mbH, 2011)

In Abbildung 32 sind die mittleren Fluidtemperaturen im 25. Betriebsjahr für den Lastfall Heizen dargestellt.

²⁴ delta h Ingenieurgesellschaft mbH. (2011). *Geothermische Energieversorgung eines Bürogebäudes in Dortmund.* Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.



Abbildung 32 Lastfall Heizen, mittlere Fluidtemperatur im 25. Betriebsjahr²⁵ (delta h Ingenieurgesellschaft mbH, 2011)

Die gewünschten Temperaturgrenzen für diesen Lastfall betragen 2 °C für die mittlere Minimumtemperatur des Fluids und 17 °C für die mittlere Maximaltemperatur.

Die mittlere Fluidtemperatur sinkt auf minimal weniger als -1 °C, obwohl keine Regeneration des Untergrundes durch Kühlung stattfindet. Somit ist auch eine Wärmebereitstellung ohne zusätzliche Kühlung gewährleistet.

4.2 Ergebnis SPRING

Die Ergebnisse werden für zwei Varianten beschrieben. Die Variante mit in der Tiefe ansteigenden Untergrundtemperaturen stellt die tatsächlichen Verhältnisse gut dar. Die zweite Variante mit einer einheitlichen Temperatur des Untergrundes von 13,8 °C wurde gewählt um einen Vergleich mit EED zu ermöglichen, welches ebenfalls nur eine konstante Temperatur annimmt. Eine Beschreibung einer Variante mit Grundwasserströmung wurde ausgelassen, da Versuche zeigten, dass eine so geringe Strömung, wie sie im Bereich der Erdwärmesonden in Dortmund vorkommt, kaum Auswirkungen auf die Temperaturänderung nach 25 Jahren besitzt.

²⁵ delta h Ingenieurgesellschaft mbH. (2011). *Geothermische Energieversorgung eines Bürogebäudes in Dortmund*. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

- I. Variante mit einheitlicher Untergrundtemperaturen
- II. Variante mit ansteigender Untergrundtemperatur

4.2.1 Variante mit einheitlicher Untergrundtemperatur

Nach 25 Jahren kühlt der Boden in der Mitte der Erdwärmesonde von 13,8 °C auf 11,2 °C ab. Die jahreszeitlichen Schwankungen betragen ungefähr 2°C.

4.2.2 Variante mit ansteigender Untergrundtemperatur

Bei der Variante mit der ansteigenden Temperaturverteilung im Untergrund kühlt sich der Boden von 13,8 °C auf 10,5 °C ab. Auch hier betragen die jahreszeitlichen Schwankungen ungefähr 2 °C.

4.2.3 Grafische Auswertung

Eine grafische Auswertung wurde für die Variante mit ansteigender Untergrundtemperatur durchgeführt.

Bei einem Horizontalschnitt durch die Sondenmitte in 70 m Tiefe (Abbildung 33) lässt sich erkennen, dass sich der Untergrund rund um die Erdwärmesondenanlage gleichmäßig abkühlt.



Abbildung 33 Horizonalschnitt in Schicht 15 nach 25 Jahren

Die vier Erdwärmesonden in der Mitte der Sondenkonfiguration besitzen dabei die größte Beeinflussung untereinander. Erst in etwa 50 m Entfernung findet sich eine ungestörte Untergrundtemperatur wieder.

SPRING ermöglicht zudem die Erstellung von Vertikalschnitten. Die folgenden Vertikalschnitte sind in markierter Lage in Abbildung 34 entstanden.



Abbildung 34 Lage der Vertikalschnitte

Abbildung 35 zeigt die Temperaturveränderung an der oberen Erdwärmesondenreihe nach 24 Monaten.

4. Ergebnisse beider Programme



Abbildung 35 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 24 Monaten

Der 24. Monat stellt den Dezember des zweiten Jahres dar. Der erste Wärmeentzug fand im 12. Monat, im Dezember des ersten Jahres, statt. Im Bereich der Erdwärmesonden kühlt sich der Untergrund erwartungsgemäß am stärksten ab.

Abbildung 36 zeigt die Temperaturveränderung der oberen Sondenreihe nach 30 Monaten.



Abbildung 36 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 30 Monaten

Der 30. Monat ist ein Juni. In einem Sommermonat findet fast kein Wärmeentzug statt. Der Boden kann sich regenerieren. Es sind keine "Kühlspitzen" zu erkennen.

Abbildung 37 zeigt die Temperaturveränderung nach 300 Monaten.



Abbildung 37 Ergebnis SPRING, Vertikalschnitt, Temperaturen nach 300 Monaten

Der Untergrund hat sich im Bereich der Erdwärmesonden zackenförmig ausgekühlt.

Eine weitere Möglichkeit, die SPRING bietet, ist die Temperaturen der einzelnen Erdwärmesonden zu vergleichen.



Abbildung 38 Vergleich der Temperaturen der einzelnen Erdwärmesonden

Abbildung 38 zeigt die unterschiedlichen Temperaturen an den verschiedenen Erdwärmesonden. Die Legende benennt die einzelnen Sonden mit ihrer Knotennummer, die ihnen im Modell in SPRING zugewiesen wurden. Die Knotennummern 600361 bis 600366 stellen dabei, wie in der Legende angegeben, die obere Erdwärmesondenreihe dar. Die restlichen Nummern stehen für die untere Sondenreihe. Der Abbildung 38 lässt sich entnehmen, dass die Erdwärmesonden in der Mitte der Konfiguration am stärksten abkühlen (grüner und lila Graph in Abbildung 38). Die äußeren Erdsonden kühlen sich am wenigstens ab (orangener und dunkelblauer Graph in Abbildung 38). Die Differenz zwischen inneren und äußeren Erdsonden beträgt in etwa 0,3 °C.

Anschließend wurde der Temperaturverlauf an ausgewählten Stellen einer Erdwärmesonde untersucht und verglichen.



Abbildung 39 Vergleich der Temperaturen am Bohrlochrand an unterschiedlichen Stellen an der Sonde

Abbildung 39 zeigt, dass der Verlauf der Temperaturen nicht in allen Bereichen der Sonde gleich ist. Bislang wurde lediglich die Sondenmitte betrachtet. Am Sondenfuß verläuft die Amplitude der Auskühlung weitestgehend jahresunabhängig. Auch geht die Temperatur in 140 m Tiefe nur von 14 °C auf ungefähr 13,7 °C zurück. Diese geringe Auskühlung erklärt sich in der wesentlichen besseren Regeneration am Sondenfuß, da es auch von unten vom "warmen" Gestein umgeben ist.

Ganz anders sieht das an der Erdoberfläche aus. Bei SPRING wurde keine Regeneration, durch beispielsweise Regen oder Sonnenschein, angegeben. Die Auskühlung ist also wesentlich ausgeprägter. Nach 25 Jahren ist die Temperatur von anfangs 10 °C auf ungefähr 6,6 °C zurückgegangen.

5. Gegenüberstellung der Ergebnisse

5.1 Anpassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse von EED und SPRING können nur unter Berücksichtigung weiterer Faktoren miteinander verglichen werden. EED betrachtet den Temperaturverlauf des Fluids in der Erdwärmesonde. In dem Modell von SPRING existieren keine Sonden. Mithilfe des Attributs QKON wird dem Boden zwar Wärme entzogen, aber der Wärmeentzug findet in keinem abgeschlossenen System statt, wie es bei EED der Fall ist. Betrachtet wird in SPRING, wie sich der Untergrund an sich, also das Gestein, durch einen Wärmeentzug verändert. Die Ergebnisse von EED und SPRING müssen also zunächst angepasst werden.

Anhand der in Kapitel 2.1.2.1 Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstandsvorgestellten Berechnung des effektiven Bohrlochwiderstandes, lässt sich die Differenz der beiden unterschiedlichen Berechnungsergebnisse von SPRING und EED überschlägig ermitteln.

$$R_b = \frac{\vartheta_B - \vartheta_F}{\dot{q}_{EWS}}$$

mit:

 R_b = Thermischer Bohrlochwiderstand von Fluid bis Bohrradius [Km/W]

 ϑ_{B} = Temperatur am Bohrlochrand [°C]

 ϑ_F = Mittlere Fluidtemperatur [°C]

 \dot{q} = Spezifische Wärmeentzugsleistung [W/m]

Damit beträgt die Differenz der beiden Temperaturen:

 $\vartheta_B - \vartheta_F = R_b \ge \dot{q}_{EWS}$ [°C]

Der Bohrlochwiderstand ist bereits anhand eines Thermal Response Tests ermittelt worden und beträgt 0,09 Km/W. Die spezifische Wärmeentzugsleistung variiert je nach Monat (Tabelle 17).

Monat	Spezifische W/m	Wärmeentzugsleistung
Januar	10,91	
Februar	10,72	
März	9,4	
April	6,77	
Mai	0,69	
Juni	0,50	
Juli	0,06	
August	0,13	
September	0,81	
Oktober	1,75	
November	7,96	
Dezember	12,97	

Tabelle 17 Spezifische Wärmeentzugsleistung pro Monat

Daraus ergibt sich eine monatsabhängige Differenz zwischen dem Ergebnis von EED und SPRING zum Beispiel für den Januar von:

 $\boldsymbol{\vartheta}_{\!_{\boldsymbol{B}}} - \boldsymbol{\vartheta}_{\!_{\boldsymbol{F}}} {=}~0,\!09~\mathrm{Km/W} \ge 10,\!91~\mathrm{W/m} = 0,\!9819~^\circ\mathrm{C}$

Alle weiteren Temperaturdifferenzen finden sich in Tabelle 18.

Monat	Spezifische Wärmeentzugs- leistung W/m	Temperaturdifferenz [°C]
Januar	10,91	0,9819
Februar	10,72	0,9648
März	9,4	0,846
April	6,77	0,6093
Mai	0,69	0,0621
Juni	0,50	0,045
Juli	0,06	0,0054
August	0,13	0,0117
September	0,81	0,0729
Oktober	1,75	0,1575
November	7,96	0,7164
Dezember	12,97	1,1673

Tabelle 18 Temperaturdifferenz zwischen Bohrlochrand und Fluid

Nun ist ein Vergleich zwischen den Ergebnissen möglich.

5.2 Vergleich der Ergebnisse

Abbildung 40 zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse für die Fluidtemperaturen von EED und SPRING.



Abbildung 40 Vergleich der Fluidtemperaturen zwischen EED und SPRING

Für das SPRING Ergebnis wurde der Knoten 600363, der sich in der oberen Erdwärmesondenreihe befindet, gewählt. Bei dem Ergebnis mit EED liegen nur die einzelnen Monatswerte der Jahre 1, 2, 5, 10 und 25 vor. Dies erkennt man in der Abbildung aufgrund des unterschiedlichen Aussehens dieser einzelnen Amplituden. Für die restlichen Jahre wurde jeweils die Maximalfluidtemperatur im Juni angesetzt. Die minimale Fluidtemperatur wurde für den Dezember erfasst.

5. Gegenüberstellung der Ergebnisse

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Ergebnisse von SPRING und EED zumindest in der gleichen Größenordnung liegen. Die Amplitude von den EED Werten ist jedoch deutlich ausgeprägter. Auch findet der Verlauf der Auskühlung deutlich intensiver bei EED statt, als bei SPRING.

Erklären lässt sich dies mit der grundsätzlich unterschiedlichen Berechnung der beiden Simulationsprogramme. Obwohl man durch die Verrechnung mithilfe des Bohrlochwiderstandes zumindest theoretisch die gleiche Ausgangsgröße betrachtet, ist dabei nicht inbegriffen, dass SPRING bei seiner Berechnung die komplette Matrix miteinbezieht. Eingangsgröße ist dabei das komplette Gesteinsumfeld des Wärmeentzugs. Dieser reagiert, aufgrund seiner enormen Masse, wesentlich träger als das Wärmeträgerfluid.

6. Fazit

Der Earth Energy Designer und SPRING ermöglichen die Berechnung der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Erdwärmesonden in einem Sondenfeld, inklusive dem Langzeitverhalten, anhand der Temperaturveränderung im Erdreich. Dies macht eine Auslegung beziehungsweise Dimensionierung der Geothermieanlage erst möglich. EED bezieht sich dabei auf ein analytisches Lösungsverfahren mithilfe sogenannter g-Funktionen. SPRING liefert Ergebnisse anhand Finiter Elemente durch eine Modellerstellung.

Doch die Programme EED und SPRING unterschieden sich deutlich hinsichtlich ihrer Modellierungstiefe, ihrem Umfang und ihrer Komplexität. Daraus ergeben sich auch unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen zur Auslegung geothermischer Anlagen.

EED ist ein Programm mit schneller Berechnung annehmlicher Konfigurationen für Erdwärmesondenanlagen. Es ermöglicht bereits in der Planungsphase ein schnelles Erstellen von diversen Alternativen²⁶ (www.buildingspysics.com). Es kann sehr einfach variiert werden, ob nur geheizt werden soll oder ob zusätzlich aktiv oder passiv gekühlt wird.

Mit wenigen Eingaben erhält man schnell die benötigte Bohrlänge oder die mittleren Fluidtemperaturen. Die meisten Aufgabenstellungen lassen sich also alleine mit EED abbilden.

Doch bei manchen Problemen ist eine numerische Betrachtung unbedingt erforderlich. Dies ist der Fall, wenn zum Beispiel der thermische Einfluss größerer Geothermieanlagen auf strömendes Grundwasser berechnet werden soll.

Denn nur mit SPRING lässt sich der konvektive Einfluss des Grundwassers miteinbeziehen.

Auch wenn die Erdwärmesondenkonfiguration komplexer ausfallen soll, kann auf SPRING zurückgegriffen werden.

Hiermit lassen sich nahezu alle relevanten Geometrien, Randbedingungen und Betriebszustände nachbilden.

²⁶www.buildingspysics.com. (kein Datum). Abgerufen am 20. Juni 2012 von www.buildingspysics.com/index-filer/Page1099.htm

Die Erdwärmesonden können unterschiedlich tief oder mit einem unterschiedlichen Abstand zueinander gewählt werden. Das ganze vorhandene Baugebiet kann somit einbezogen werden. EED bietet zwar 798 verschiedene Erdwärmesondenfeldkonfigurationen, doch muss sich auch wirklich nur an diese Konfigurationen gehalten werden. Unterschiedliche Abstände und Tiefen sind nicht möglich.

Mit SPRING ist im kompletten Modell die Berechnung und Ausgabe der Temperaturen und Wärmeströme numerisch mit örtlicher und zeitlicher Auflösung möglich. Das Programm EED kann als kleinsten Zeitschritt 3 Stunden berechnen. Effekte von kürzerer Dauer sind somit nicht abbildbar²⁷ (Huber & Pahud). Mit SPRING können die Veränderungen in sekündlicher Auflösung berechnet werden. Zudem sind Aussagen zum Langzeitverhalten, auch über 25 Jahre hinaus, im Gegensatz zu EED, und zur Beeinflussung der Umgebung möglich.

EED bietet nur eine geringe Flexibilität durch feste Zeitschrittwerte und der Eingabe ausschließlich jahresperiodischer Lasten. Zudem bietet es eine geringe Detailschärfe, da es zum Beispiel keine Ortsauflösung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes gibt. Bei SPRING lassen sich durch die Zuweisung der Attribute, die tatsächlichen Untergrundverhältnisse, so genau wie erwünscht, darstellen.

SPRING bietet ferner die Möglichkeit die Ergebnisse grafisch darzustellen. Dabei sind zum Beispiel, im Gegensatz zu EED, farbliche Abbildungen von Temperaturausbreitungen möglich. Es lassen sich in jeder gewünschten zeitlichen und örtlichen Auflösung Horizontal- oder Vertikalschnitte erstellen. SPRING bietet hier zudem die Auswahl an verschiedensten Detaileinstellungen.

Doch diese Flexibilität, die SPRING auszeichnet und die Mächtigkeit bei der Anwendung bringen in der Praxis auch einige Nachteile mit sich. Es ist ein Experten-Knowhow und große Erfahrung bei der Anwendung nötig. Das Ergebnis muss auf Plausibilität überprüft werden. Um mathematische Probleme direkt zu erkennen und ein zuverlässiges Ergebnis zu erzielen, ist ausreichende Erfahrung notwendig.

Zudem entstehen recht hohe Kosten durch den dadurch bedingten höheren Arbeits- und Zeitaufwand. Es fällt eine etwa fünffach höhere Lizenzgebühr für das Programm für gewerbliche Kunden an. Die Rechenzeiten sind bei umfangreichen Aufgabenstellungen relativ lang.

²⁷Huber, A., & Pahud, D. (1999). *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?* Bern: Bundesamt für Energie. S.10

Diese umfangreichen Aufgabenstellungen sind zum Beispiel große Berechnungsgebiete, hohe örtliche beziehungsweise zeitliche Auflösung, instationäre Betrachtung oder ein langer Betrachtungszeitraum²⁸ (Koenigsdorff, 2011).

Mit SPRING ist die benötigte Bohrlänge nur durch das Ausprobieren verschiedener Varianten ermittelbar. Im Gegensatz zu EED erscheint kein Ergebnisdatenblatt, dass direkt die benötigte Bohrlänge wiedergibt. Das Modell muss dahingehend verändert werden, dass das Attribut QKON, die Wärmeentzugsrate, Wärme in unterschiedlichen Tiefen entnimmt. Danach muss anhand des Ergebnisses der Untergrundtemperatur beziehungsweise der Fluidtemperatur abgeschätzt werden, ob die Länge ausreichend war oder nicht. Auch lassen sich bei EED sehr einfach Spitzenlasten miteinbeziehen. Bei SPRING muss zunächst die Spitzenlasten per Hand gerechnet werden und in der instationären Eingabedatei verändert werden.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass in den meisten Fällen das Berechnen der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen mit EED völlig ausreicht. Es ist ein schnelles, relativ kostengünstiges Programm und erzielt ausreichend gute Ergebnisse. Bei komplexeren Problemstellungen zum Beispiel mit Grundwassereinfluss liefert SPRING jedoch ein aussagekräftigeres Ergebnis. Mit SPRING lassen sich nahezu alle komplexeren Aufgabenstellungen lösen. Unsymmetrische Konfigurationen stellen kein Problem dar. Es ermöglicht die Berechnung in jeglicher örtlichen und zeitlichen Auflösung. Grafische Darstellungen in jeder gewünschten Form sind ebenfalls möglich. Diese Flexibilität muss jedoch durch einen höheren Arbeitsaufwand bezahlt werden.

²⁸Koenigsdorff, R. (2011). Oberflächennahe Geothermie für Gebäude- Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 199

Literaturverzeichnis

BLOCON. (26. Mai 2008). EED 3.0 Earth Energy Designer.

Bornitz, C. (2011). *Geothermie-Bohrungen für Anwendungen in Gebäuden: Dimensionierung und Ausführung.* Paris: CMB Bohrtechnik für Erdwärme GmbH.

delta h Ingenieurgesellschaft mbH. (2011). Geothermische Energieversorgung eines Bürogebäudes in Dortmund. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*.Lund: Lund Institute of Technology.

Gelhar, L. W., Welty, D., & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on fieldscale dispersion in aquifers. Water Resources Research.

Hellström, G. (1991). Ground Heat Storage- Thermal Analyses of Duct Storage Systems- Theory.Lund: University of Lund.

Huber, A. (2009). *Programm EWS Version 4.0 Berechnung von Erdwärmesonden*. Zürich: Huber Energietechnik AG.

Huber, A., & Pahud, D. (1999). *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?* Bern: Bundesamt für Energie.

Koenigsdorff, R. (2011). *Oberflächennahe Geothermie für Gebäude- Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

König, C. M. (2009). *SPRING Benutzerhandbuch Version 3.4*. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

König, C. M. (2012). *SPRING Benutzerhandbuch Version 4.1*. Witten: delta h Ingenieurgesellschaft mbH.

Rumohr, Dr., S., & Schäfer, I. (2009). *Planung und Bemessung von Erdwärmesondenanlagen- Einbindung der Erdwärmesonden in das System- Typen, Wärmeübertragung und Optimierung*. Idstein: Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften Fachsektion Hydrogeologie. **VDI 4640-2**. (2008). *Thermische Nutzung des Untergrunds, Blatt 2*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

www.buildingspysics.com. Abgerufen am 20. Juni 2012 von www.buildingspysics.com/index-filer/Page1099.htm

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Jacqueline Valencienne Orlikowski, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema "Vergleich der Berechnungsmethoden zur Auslegung eines geothermisch genutzten Erdwärmesondenfeldes zwischen EED (Earth Energy Designer) und SPRING (Simulation of Processes in Groundwater)" selbstständig im Rahmen der mir bekannten Prüfungsbedingungen angefertigt habe Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht. Die elektronische Fassung der Arbeit stimmt mit der gedruckten Version überein.

Dortmund, 17. Juli 2012

Jacqueline Valencienne Orlikowski

Matrikelnummer: 152 330 43