

GeoLogik SF – Validierung Untergrundmodell

Programmversion: GeoLogik SF 0.93

Beispieldatei: Testfeld8.sfm

Vergleichsberechnungen in: Validierung Test8.xlsx

Ergebnisdateien:

Node x=79,76 m, y=-35,75 m: Node_x7976_y3575.txt

Node x=89,90 m, y=-24,90 m: Node_x8990_y2490.txt

Node x=44,17 m, y=-0,96 m: Node_x4417_y-096.txt

Node x=59,90 m, y=45,10 m: Node_x5990_y4510.txt

Für Temperaturfelder: Präfix "Test8"

Zur Validierung der Berechnung des numerischen Wärmetransportmodells wurde eine Vergleichsrechnung mit der analytischen Lösung herangezogen.

Die Temperaturdifferenz ΔT bei einer Linienquelle ergibt sich mit (s. z.B. CARSLAW & JAEGER 1959):

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q_h}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{r^2}{4at}\right)$$

mit

Q_h = spez. Leistung [W/m] = Leistung / Quellenlänge

r = radialer Abstand zur Quelle [m]

a = Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

t = Zeit [s]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]

Ei = Integralexponentialfunktion

Die Lösung von Ei in Spreadsheet erfolgt mit der numerische Näherungsgleichung angegeben in LOOSE (2007, 29f.)

Da es sich beim Beispiel um ein Sondenfeld von 8 Sonden handelt kommt das Superpositionsprinzip zur Anwendung, d.h. Temperaturdifferenzen werden für die einzelnen Abstände berechnet und aufsummiert:

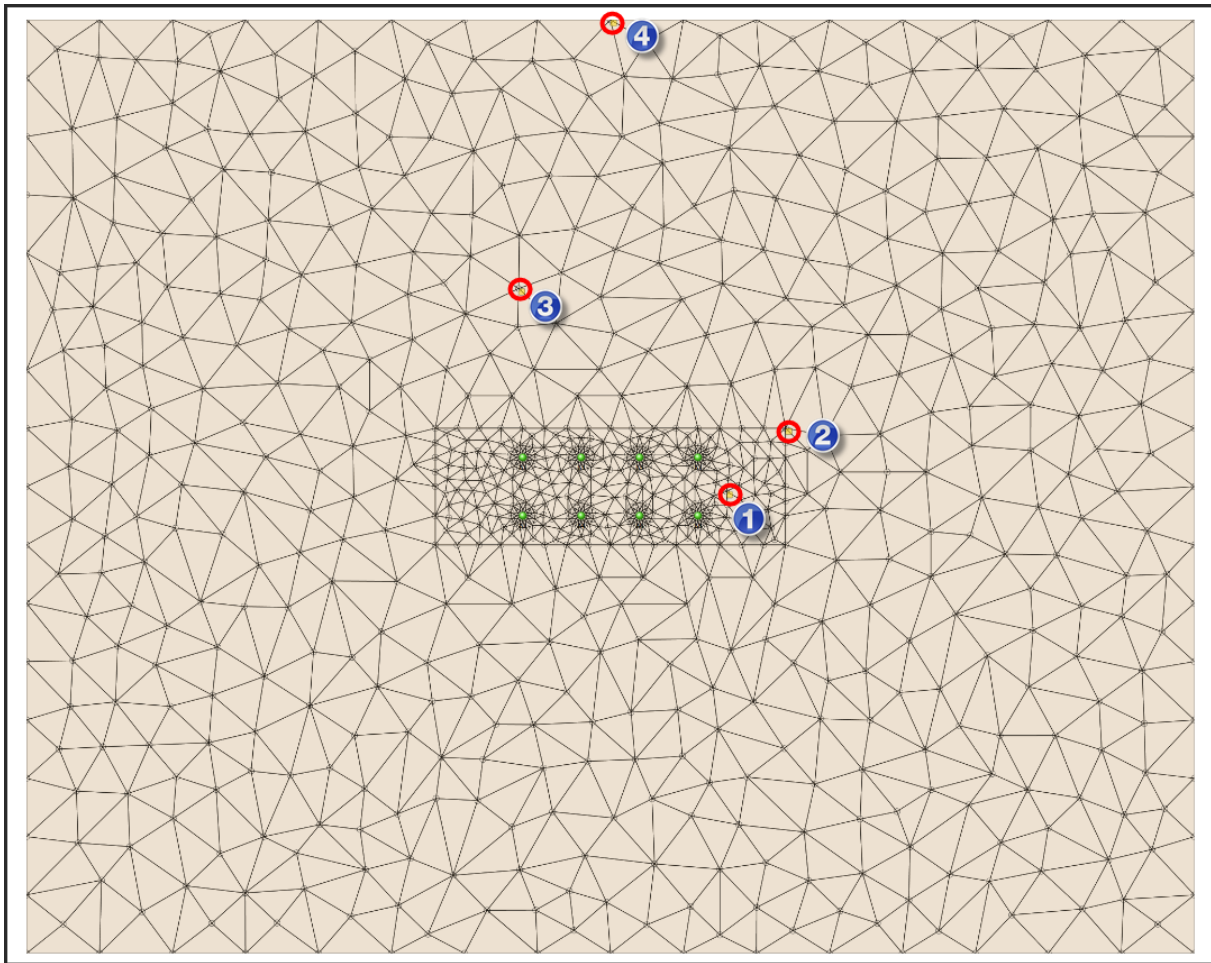
$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^n \Delta T(r_i, t)$$

mit

n = Anzahl der Sonden

r_i = radialer Abstand von der Sonde i

Diese Berechnung wurde für 4 „Points of Interest“ (POI) durchgeführt. Die POIs sind in der Abbildung unten durch rote Kreise hervorgehoben.



Modellbeschreibung

Entzogene Leistung: 24 kW, konstant

Sondenanzahl: 8

Leistung je Sonde: 3 kW

Spez. Leistung = 30 W/m

Tiefe: 100 m

Modellgröße: 200 m x 160 m

Randbedingung: adiabater Rand, d.h. Wärmefluss=const.=0

Simulationszeitraum: 50 Jahre

Wärmeleitfähigkeit: 2 W/m/K

Vol. Wärmekapazität: 2,5 MJ/m³/K

Initiale Temperatur: 10 °C

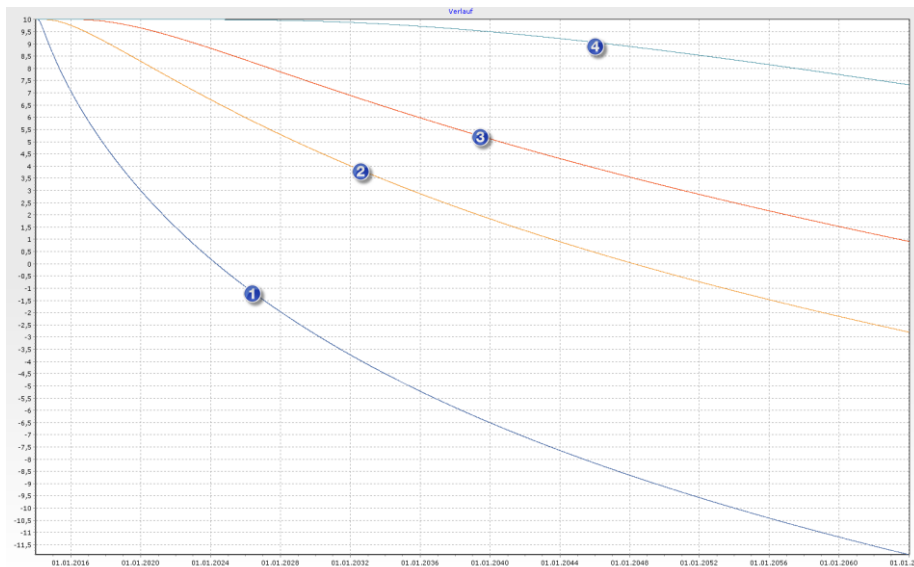
Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse zeigt die folgende Tabelle:

	POI1			POI2			POI3			POI4		
Zeit [d]	$\Delta T_{\text{analy}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{\text{sf}} [^{\circ}\text{C}]$	Differenz [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta T_{\text{analy}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{\text{sf}} [^{\circ}\text{C}]$	Differenz [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta T_{\text{analy}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{\text{sf}} [^{\circ}\text{C}]$	Differenz [$^{\circ}\text{C}$]	$\Delta T_{\text{analy}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{\text{sf}} [^{\circ}\text{C}]$	Differenz [$^{\circ}\text{C}$]
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100	0,175	0,151	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
365	1,463	1,447	0,016	0,033	0,037	0,004	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
1000	3,889	3,846	0,043	0,461	0,474	0,013	0,028	0,006	0,022	0,000	0,000	0,000
3650	9,877	9,794	0,083	3,252	3,285	0,033	1,208	1,189	0,019	0,003	0,002	0,001
7300	14,602	14,496	0,106	6,536	6,577	0,041	3,575	3,581	0,006	0,103	0,192	0,089

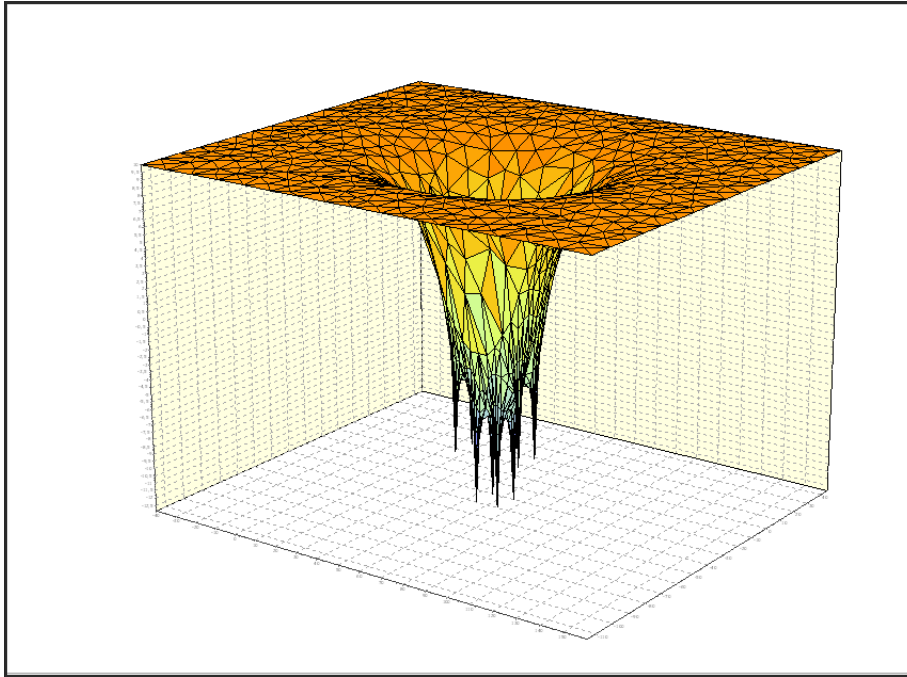
Die Differenz zwischen analytischer und numerischer Lösung liegt zumeist im Bereich einiger 1/100 $^{\circ}\text{C}$.

Da das Modellgebiet über keinerlei energetischen Zufluss verfügt macht sich ab ca. 15 Jahren Simulationsdauer die adiabate Randbedingung bemerkbar. Im unten stehenden Diagramm, welches die vollständige 50 jährige Simulationsdauer darstellt, zeigt somit POI4 das Fortschreiten des Temperaturfeld an den Rand an.



Bilanzierung

Um Festzustellen ob das berechnete Temperaturfeld mit der entzogenen Energie korreliert wurde das Feld nach 10-jähriger Simulationsdauer in Programm Surfer (Golden Software) dargestellt. Das Surfer-Grid wurde mittels linearer Triangulation mit den Standardeinstellungen erzeugt (Datei Test8_2024_01_01_00_00.grd). Nun wurde das Volumen des Temperaturtrichters gegenüber der Ursprungstemperatur berechnet, woraus sich wiederum die entzogene Energie berechnen lässt.



Die prozentuale Differenz, je nach Methodik der Volumenberechnung in Surfer, liegt zwischen 0,186 und 0,276 %.

Bewertung

Die vom Programm GeoLogik SF numerisch ermittelten Temperaturwerte stimmen mit den analytischen Lösungen bis auf einige zehntel Grad überein, wobei im untersuchten Szenario die Abweichung meist nur einige hundertstel Grad betrug.

Die Bilanzierung mit Hilfe des Temperaturfeldes zeigt ebenfalls keinerlei Unstimmigkeiten, der Bilanzfehler von ca. 0,2 % ist vernachlässigbar.

Das Programm GeoLogik SF ist für den Einsatzzweck „langfristige Berechnung von Temperaturfeldern im Untergrund“ geeignet.

Literatur

Carslaw, H. S. und J. C. Jaeger (1959). Conduction of heat in solids. London [u.a.], Clarendon Press.

Loose, P. (2007): Erdwärmenutzung.- 2. Aufl., C. F. Müller, Heidelberg.