

Modellierung der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf Quartiersebene – Eine Fallstudie in Berlin

Numerische Simulation des geologischen Untergrunds

Gefördert durch:

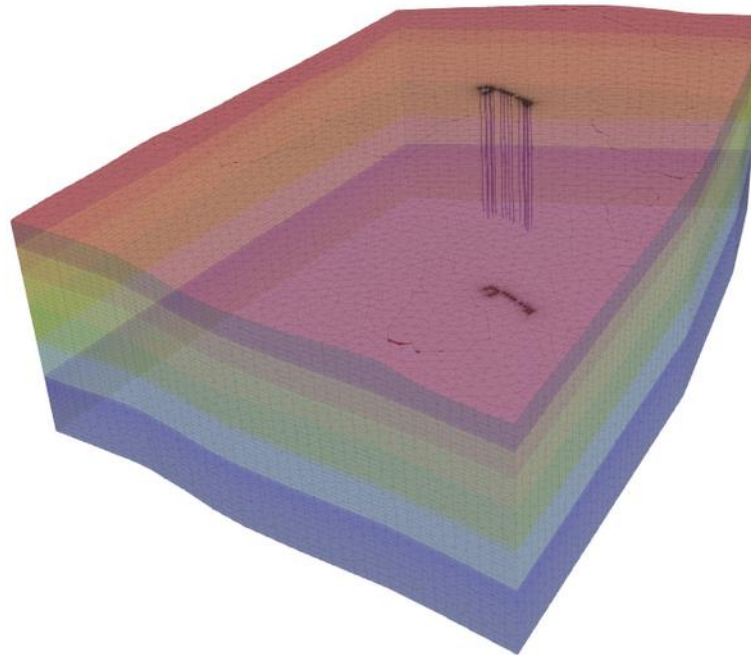


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

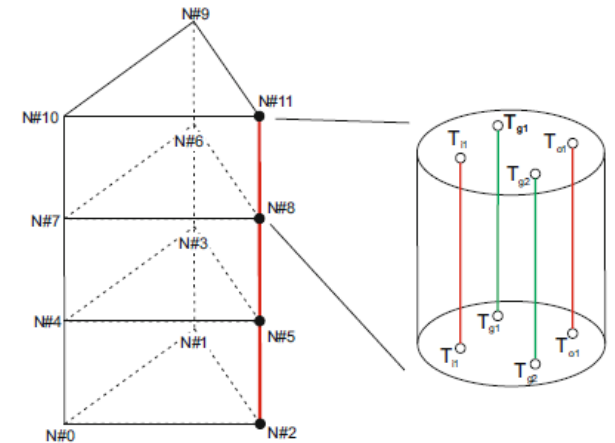
Wahrgenommene Realität



Physikalisches Modell



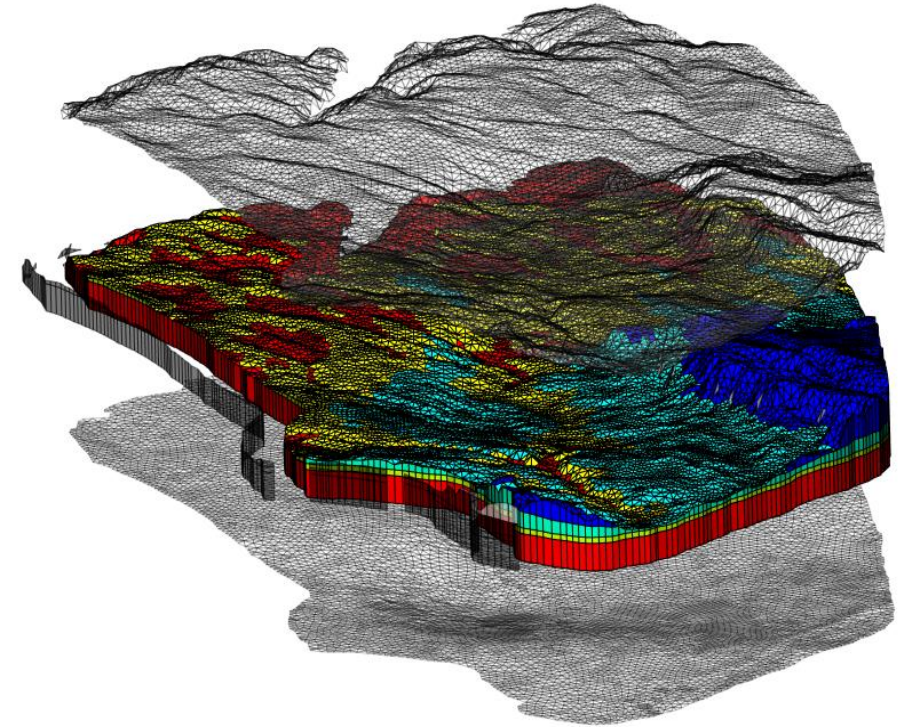
Numerisches (Simulations-) Modell



$$\begin{pmatrix} A^\pi & R^{\pi s} \\ R^{s\pi} & A^s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T^\pi \\ T^s \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} B^\pi \\ B^s \end{pmatrix}_{n,n-1}$$

Software für die Simulation des geologischen Untergrunds

- Simulation von Wärmetransport im geologischen Untergrund
- Kopplung mit hydraulischen und thermischen Prozessen
- Berechnung und Visualisierung von 3D-Modellen
- Vertreter:
 - FEFLOW (kommerziell)
 - OpenGeoSys (Open-Source Software)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization: a case study in Berlin

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- Oberflächennahe Geothermie zum Heizen und Kühlen eines öffentlichen Gebäudes in Berlin
- Datengrundlage: existierendes FEFLOW-Modell mit 16 Sonden
- Aufbau eines äquivalenten Modells in OpenGeoSys (OGS)
- Vergleich des Simulationsverhaltens und der Ergebnisse beider Software

Random et al. *Geothermal Energy* (2022) 10:1
<https://doi.org/10.1186/s40517-022-00211-9>

 Geothermal Energy


- Veröffentlichung der Ergebnisse in:
Geothermal Energy,
Februar 2022

RESEARCH

Open Access

Modeling neighborhood-scale shallow geothermal energy utilization: a case study in Berlin



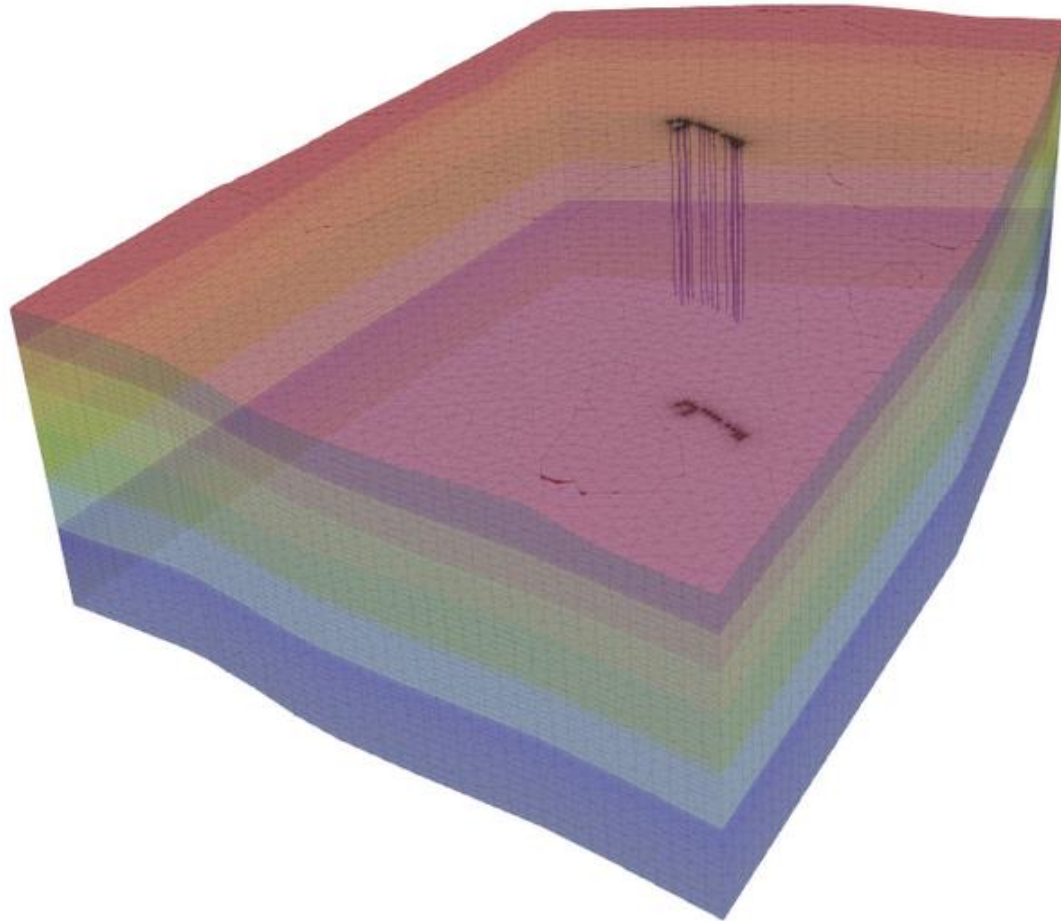
Jakob Random^{1,3}, Shuang Chen^{2,6}, Katrin Lubashevsky^{1,4}, Steve Thiel⁵, Tom Reinhardt⁵, Karsten Rink², Rüdiger Grimm⁵, Anke Bucher¹, Olaf Kolditz^{2,3} and Haibing Shao^{2*} 

Datengrundlage

Gefördert durch:

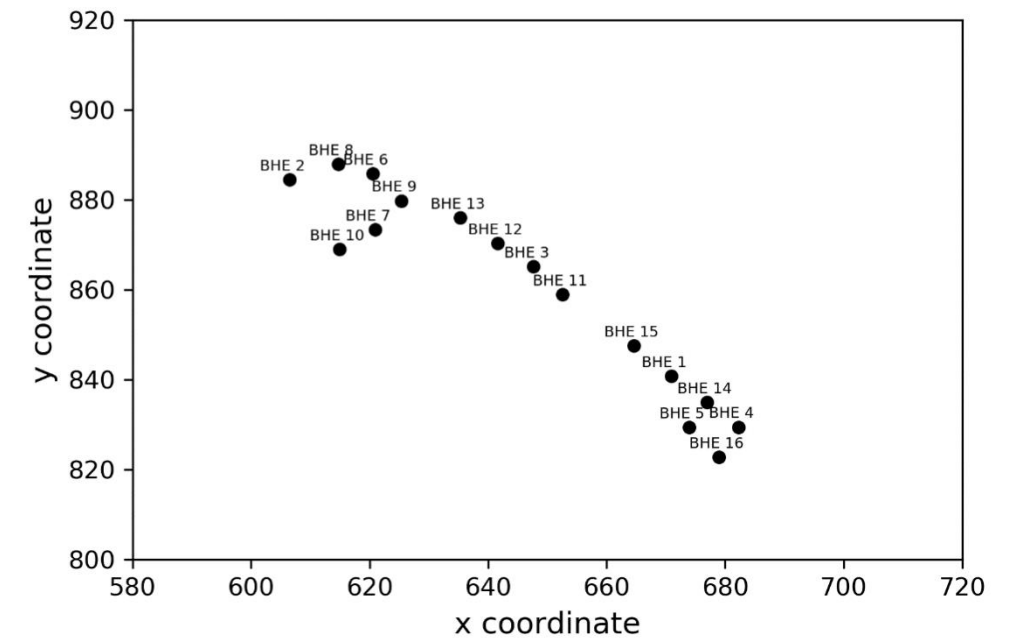


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Simulationsmodell (links) und
Standort der 16 Erdwärmesonden
(rechts)

- 1100m x 800m x 175m
- über 3 Mio. Elemente



Modellparameter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Sondentyp	–	2U	–
Sondenlänge	L	99	m
Bohrlochdurchmesser	D	0.16	m
Rohrabstand	w	0.07	m
Durchmesser der Vorlaufrohre	d_{in}	0.032	m
Wandstärke der Vorlaufrohre	b_{in}	0.003	m
Wärmeleitfähigkeit der Vorlaufrohre	λ_{in}	0.42	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Durchmesser der Rücklaufrohre	d_{out}	0.032	m
Wandstärke der Rücklaufrohre	b_{out}	0.003	m
Wärmeleitfähigkeit der Rücklaufrohre	λ_{out}	0.42	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit des Verpressmaterials	λ_g	2.0	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Ungestörte Untergrundtemperatur	θ_s	11.6	$^{\circ}\text{C}$
Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds	λ_s	<i>tiefenabhängig</i>	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds *	$\lambda_{s,mean}$	2.5	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität des Untergrunds	$\rho_s c_s$	<i>tiefenabhängig</i>	$\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Wärmekapazität des Kältemittels	$\rho_r c_r$	4.0	$\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Dichte des Kältemittels	ρ_r	1052	kgm^{-3}
Wärmeleitfähigkeit des Kältemittels	λ_r	0.48	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Dynamische Viskosität des Kältemittels	μ_r	5.2×10^{-3}	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
Durchflussrate je Sonde	\dot{V}_r	4.63×10^{-4}	m^3s^{-1}
Bohrlochwiderstand*	R_b	0.09	KmW^{-1}

* Nicht im Simulationsmodell verwendet.

Anfangs- und Randbedingungen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

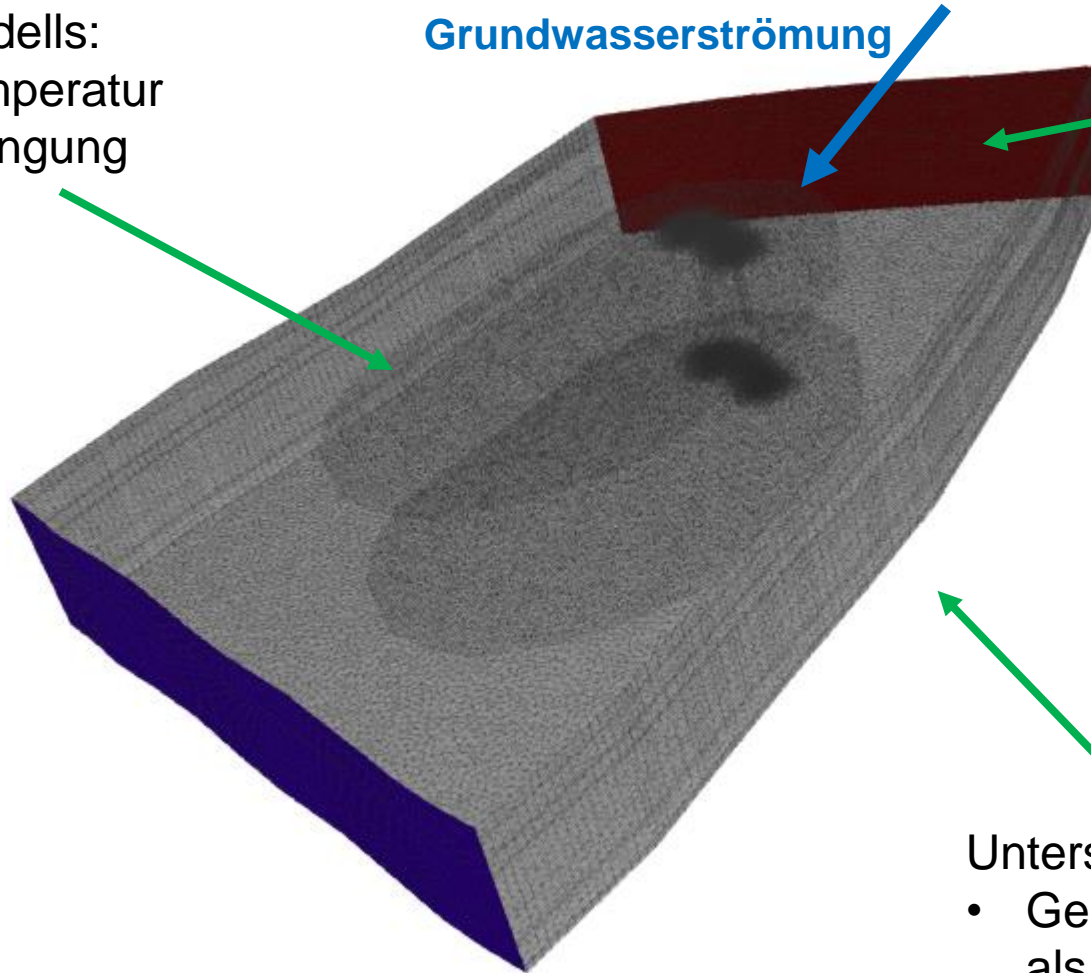
Oberseite des Modells:

- Oberflächentemperatur ohne Randbedingung

Grundwasserströmung

Anstromfläche:

- Eingang Grundwasserströmung
- Dirchlet-RB: $\vartheta = 11,6 \text{ °C}$



Unterseite des Modells:

- Geothermaler Wärmestrom als Neumann-RB

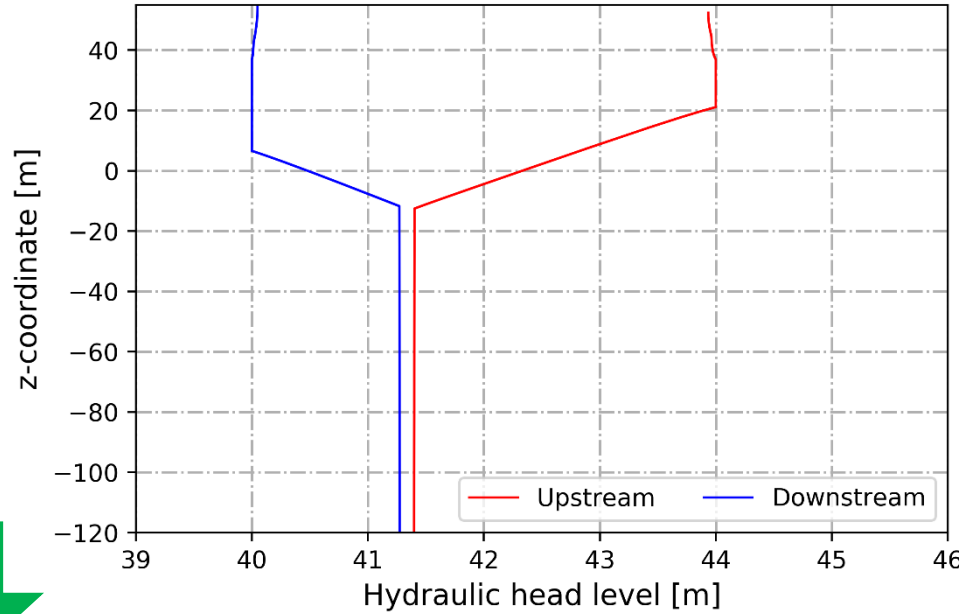
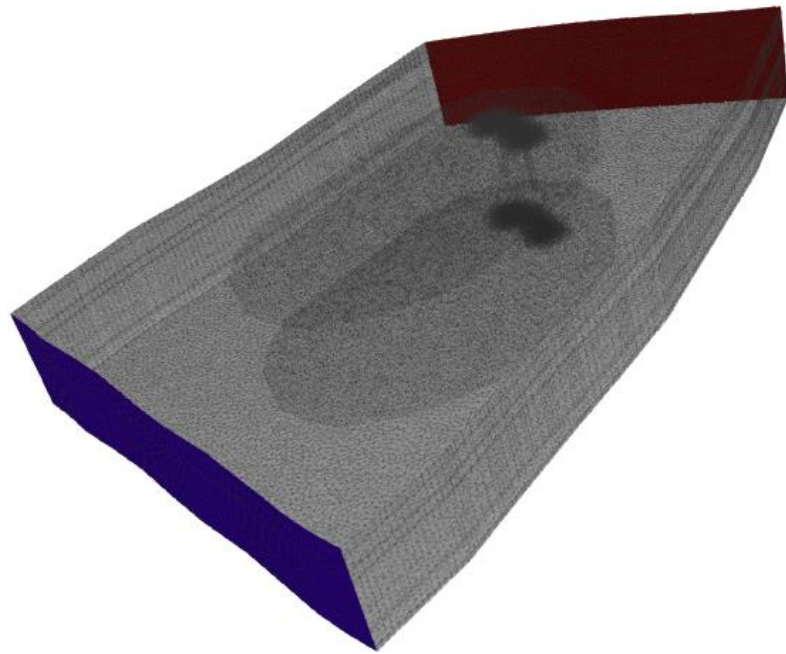
$$q_{geo} = 0,042 \frac{W}{m^2}$$

Anfangs- und Randbedingungen

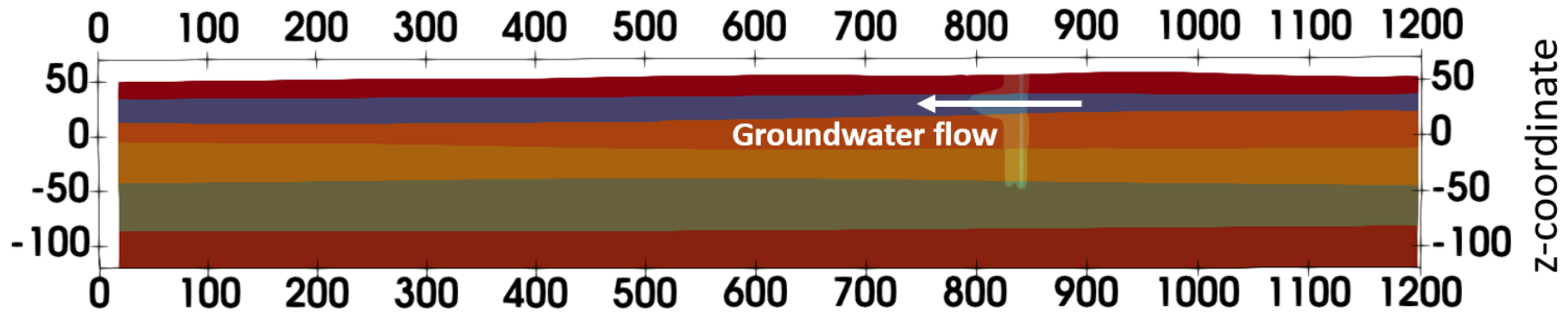
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



y-coordinate



Zielstellung und Methodik

- Abhängigkeit der Temperaturdifferenz und extrahierter Wärme:

$$\Delta T = T_{in}(t) - T_{out}(t) = \frac{\dot{Q}_{BHE}^{heating}(t)}{\rho_r c_r \dot{V}_r}$$

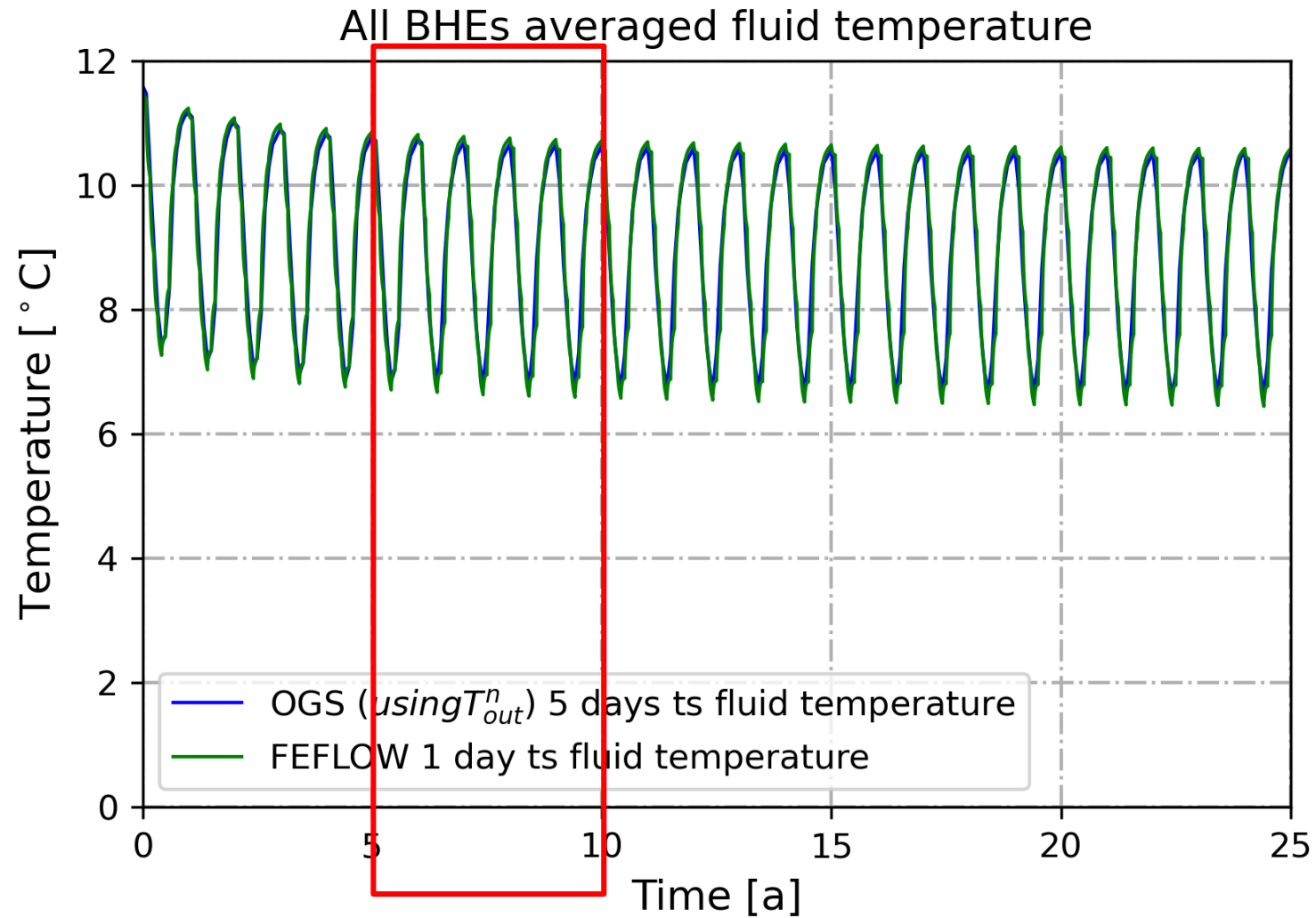
Monat	Relativer Wärmeanteil	Absoluter monatlicher Wärmebedarf des Sondenfelds [kWh]	Absoluter monatlicher Wärmebedarf je Sonde [kWh]	Temperaturdifferenz ($T_{out}(t) - T_{in}(t)$) pro Sonde nach Gl. (C.5) [K]
Jan	0.212	-20900	-1306.25	0.950
Feb	0.167	-16500	-1031.25	0.830
Mär	0.137	-13500	-843.75	0.614
Apr	0.043	-4240	-265	0.199
Mai	0.016	-1580	-98.75	0.072
Jun	0.003	-300	-18.75	0.014
Jul	0	0	0	0
Aug	0	0	0	0
Sep	0.012	-1180	-73.75	0.055
Okt	0.082	-8090	-505.625	0.368
Nov	0.139	-1370	-85.625	0.643
Dez	0.189	-1860	-116.25	0.845
Total	1	-98600	-6162.5	

Vergleich Fluidtemperaturen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

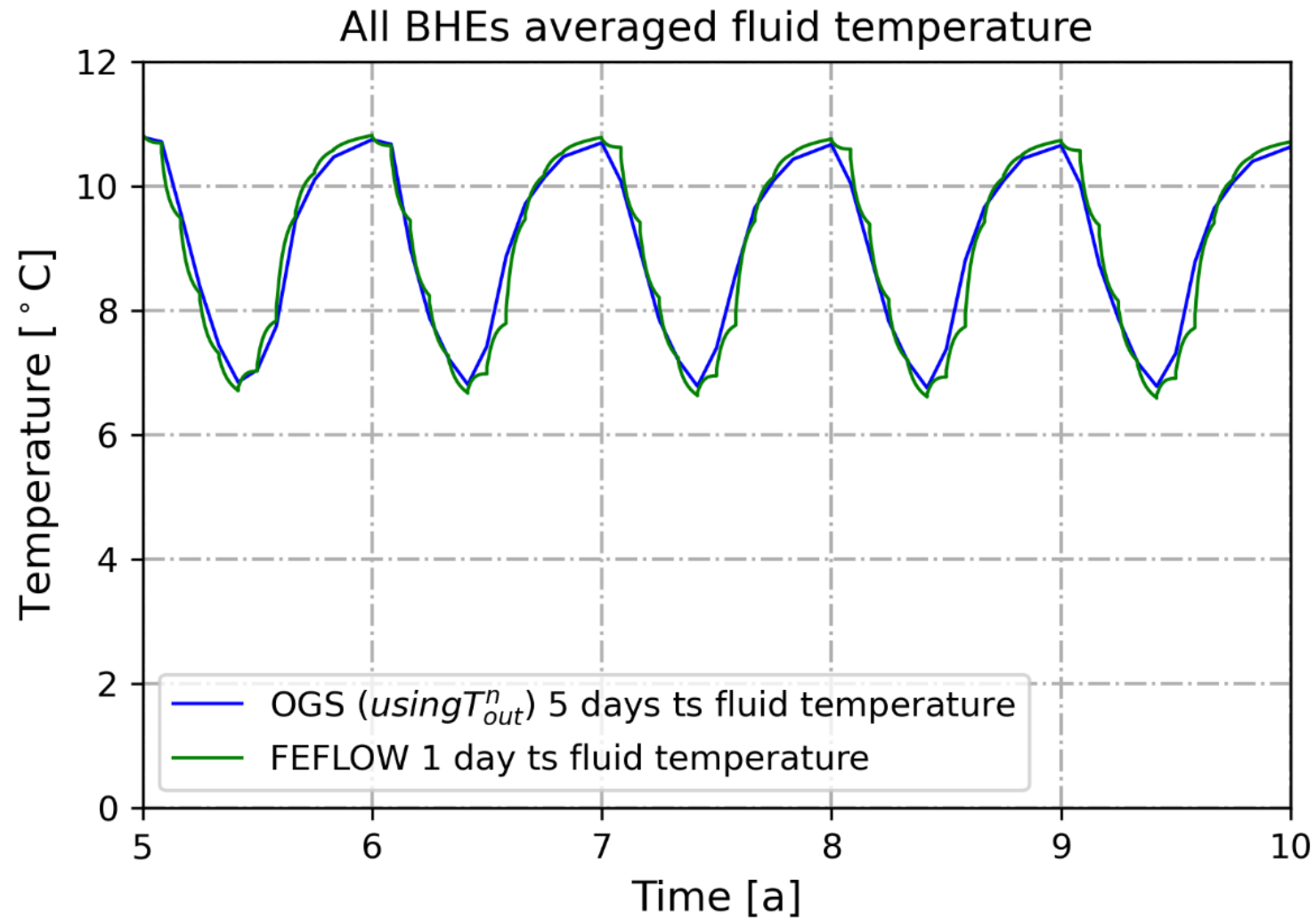


Vergleich Fluidtemperaturen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

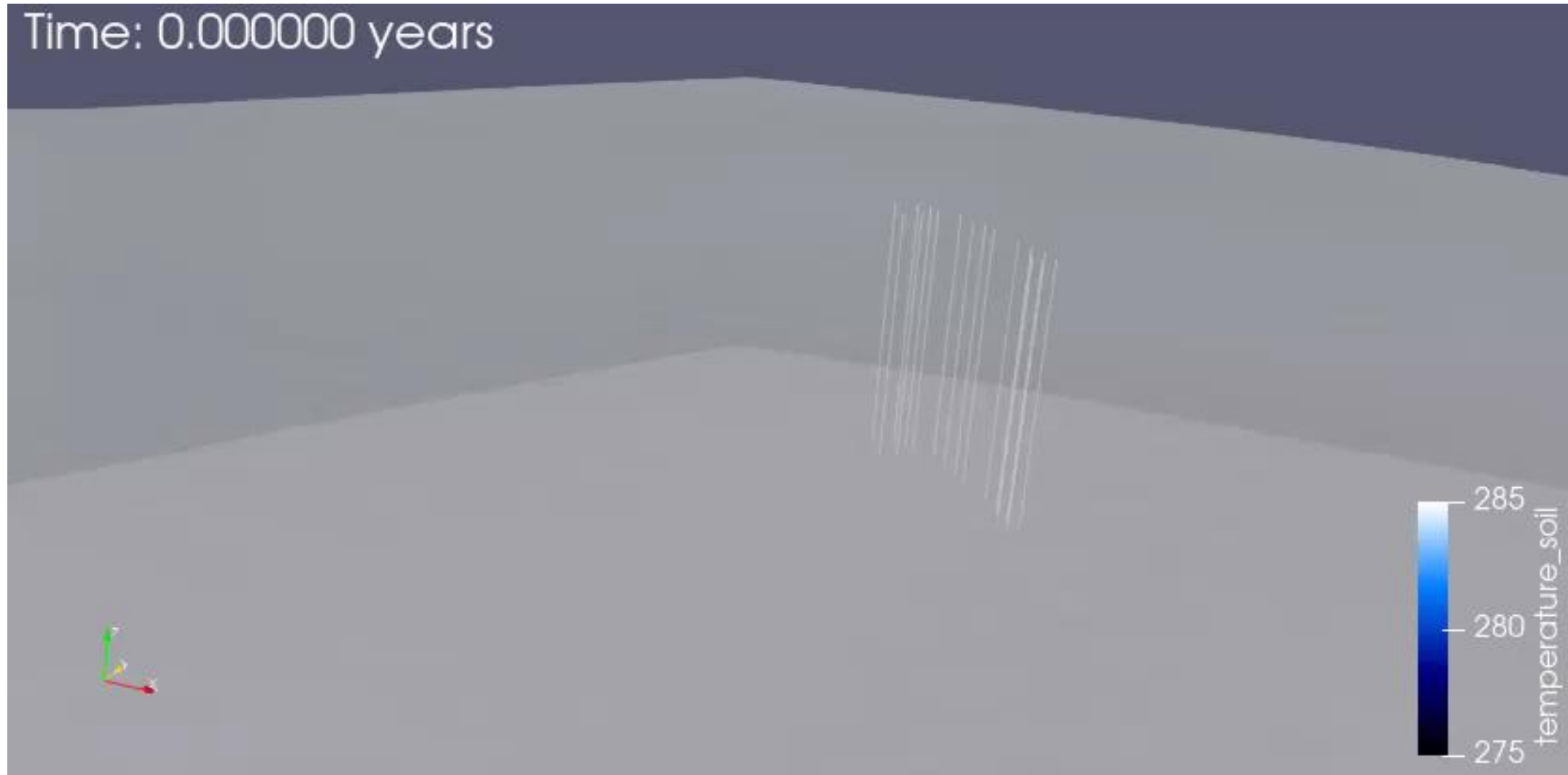


Simulation der Untergrundtemperatur im zeitlichen Verlauf

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

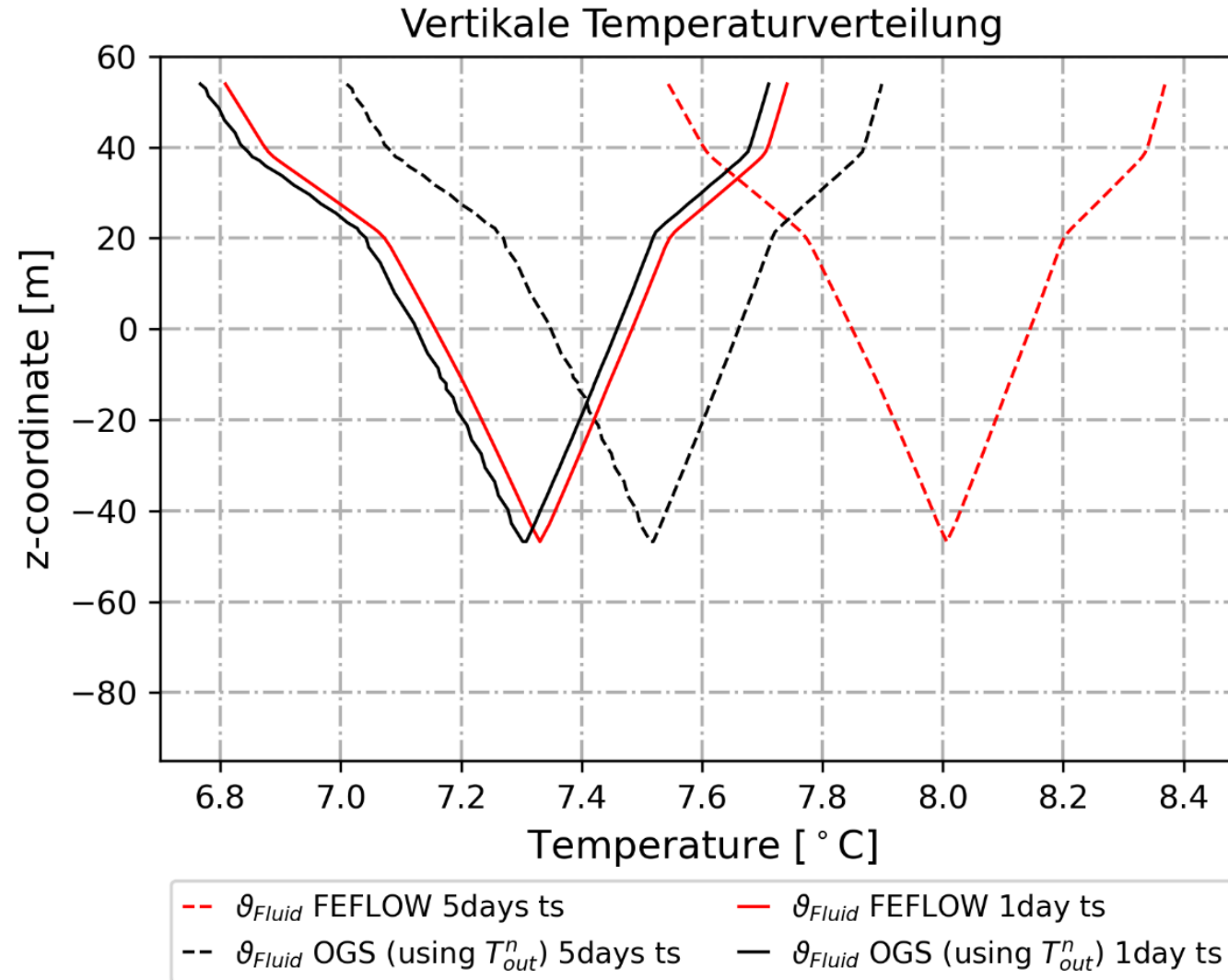


Vertikale Temperaturverteilung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



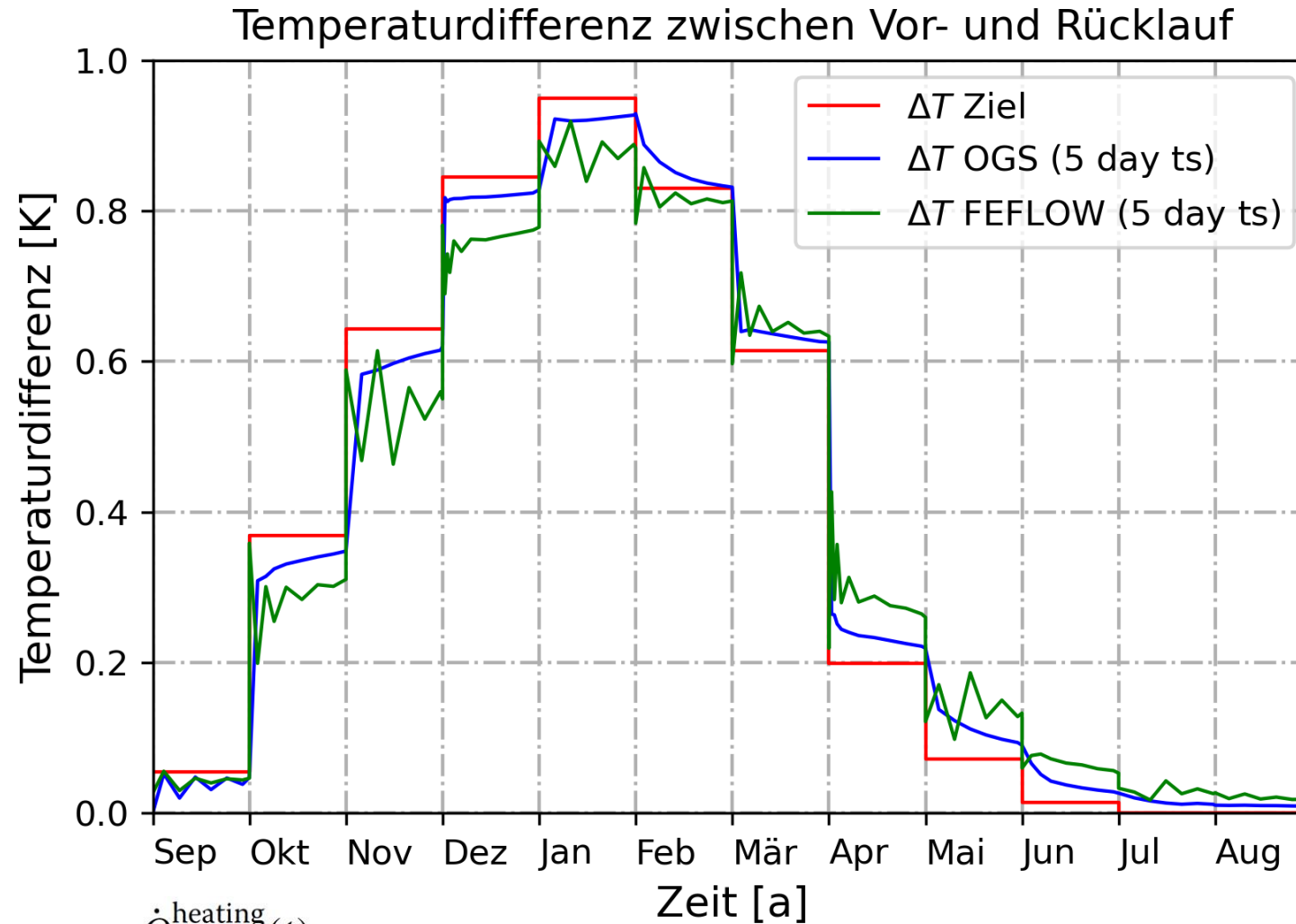
Vergleich der Temperaturdifferenz mit Zielwert

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



$$\Delta T = T_{\text{in}}(t) - T_{\text{out}}(t) = \frac{\dot{Q}_{\text{BHE}}^{\text{heating}}(t)}{\rho_r c_r \dot{V}_r}$$

Unterschiede in den Berechnungsmethodiken

- *Numerik liefert lineares Gleichungssystem zum Lösen des Problems*
- *FEFLOW und OGS gehen die Lösung der Matrix unterschiedlich an*

1. Annahme einer Rücklauftemperatur

- FEFLOW nutzt die Rücklauftemperatur des vorherigen Zeitschritts für die Lösung des Gleichungssystem im aktuellen Zeitschritt
- starke Vereinfachung der Gleichungen, führt allerdings zu Ungenauigkeiten
- OGS muss in iterativem Prozess Wertepaar aus Vor- und Rücklauftemperatur bestimmen, welche das Gleichungssystem löst

2. Iterative Lösung des Gleichungssystems

- OGS löst das Gleichungssystem iterativ (mehrfach) mit aktualisierten Werten bis bestimmte Toleranz eingehalten wird
- FEFLOW löst das Gleichungssystem nur einmal

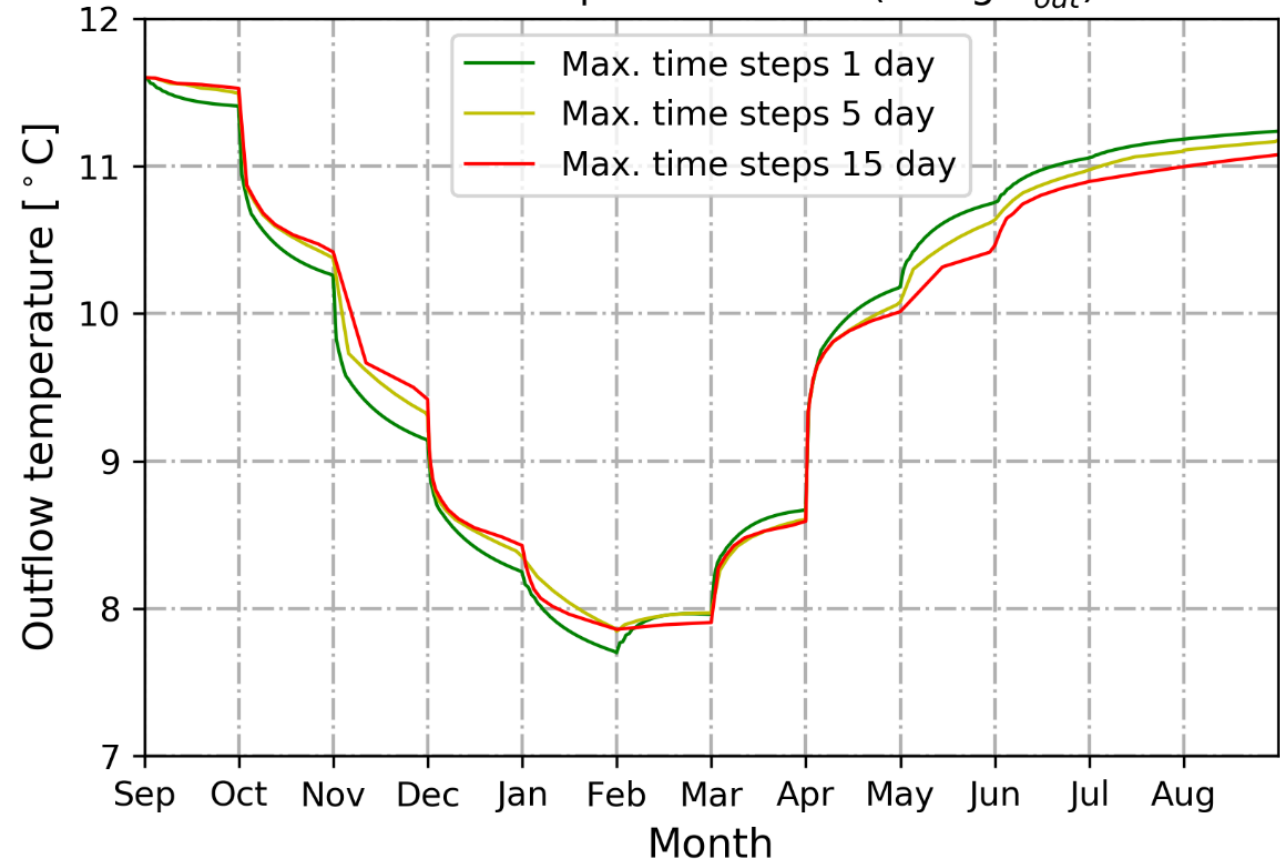
Abhängigkeit der Rücklauftemperatur von der Zeitschrittweite

Gefördert durch:

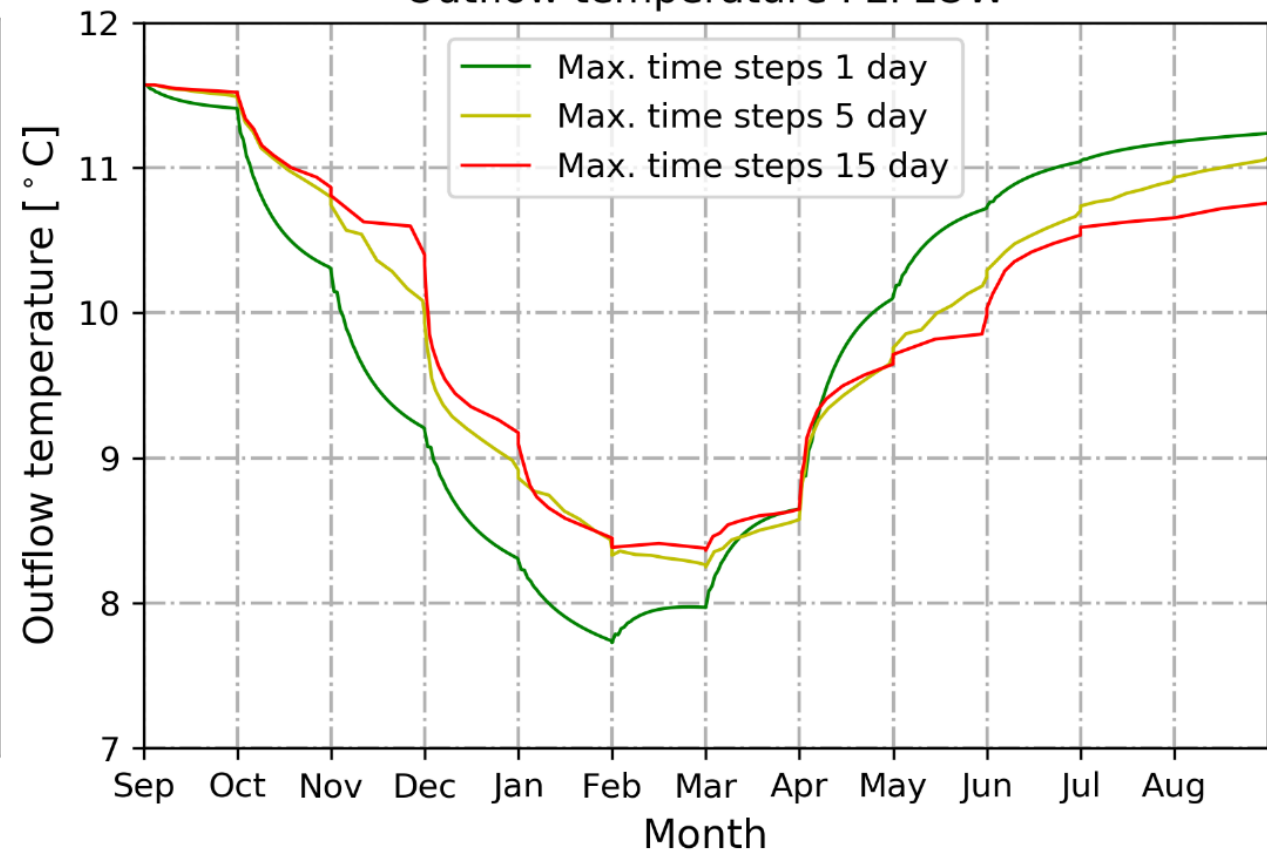


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Outflow temperature OGS (using T_{out}^n)



Outflow temperature FEFLOW



Zusammenfassung und Fazit

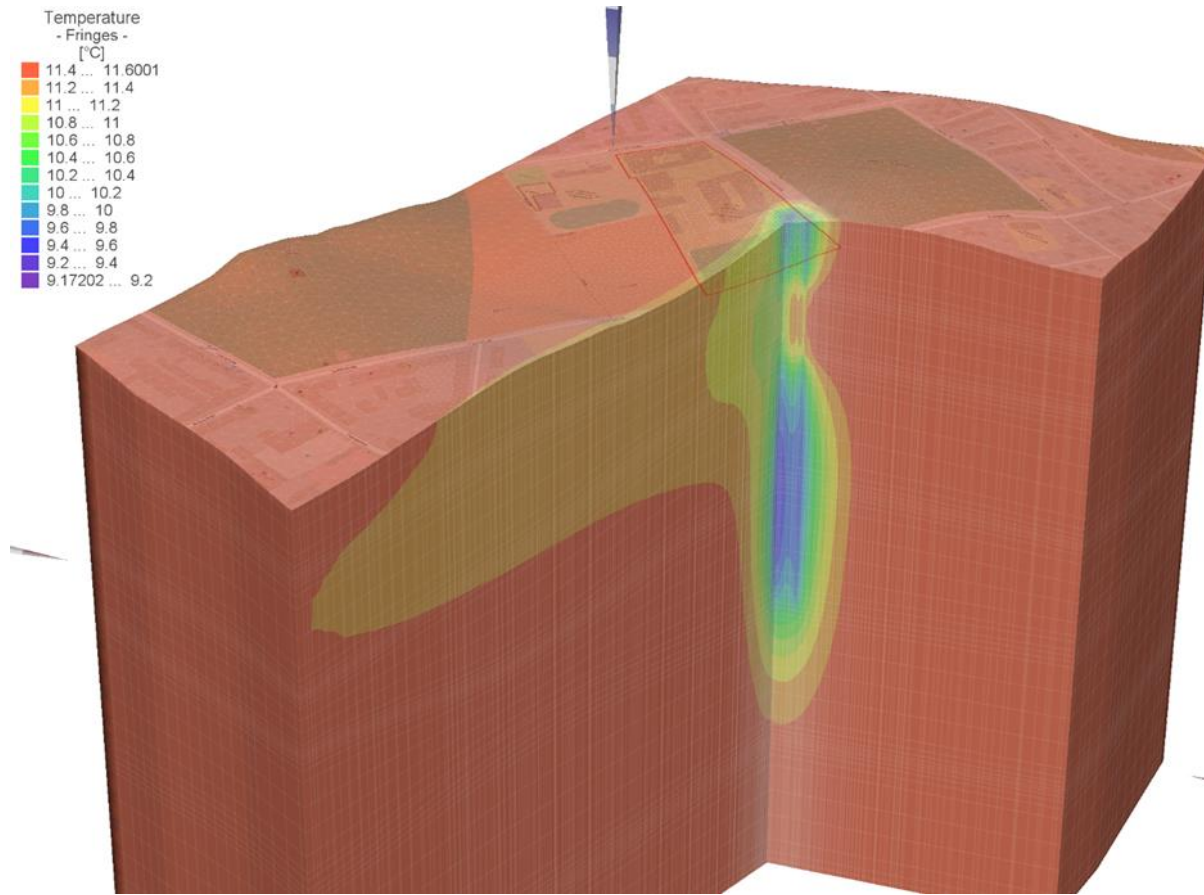
- numerische Simulation eines Erdwärmesondenfeldes mit 16 Sonden und Analyse der Langzeittemperaturentwicklung und –verteilung
- Nutzung zweier unabhängiger Software (FEFLOW und OGS) auf Grundlage der gleichen Parameter (gleiches Netz, Parameter, Randbedingungen)
- Bewertung der Qualität und Genauigkeit der Simulation anhand der Temperaturdifferenz infolge der zu extrahierenden Wärmemenge
- sowohl FEFLOW als auch OGS liefern genaue Ergebnisse, welche für Voraussagen und Analysen verwendet werden können
- FEFLOW nutzt eine Vereinfachung in der Berechnungsmethodik, was einen gewissen Grad an Genauigkeit für eine schnellere Berechnung einbüßt
- OGS ist resistenter gegen eine gröbere zeitliche Diskretisierung
- Vergleich Berechnungsdauer 5-Tages-Zeitschritte: *FEFLOW*: 114 Stunden | *OGS*: 244 Stunden
- Ziel, Schur-Komplement in OGS zu implementieren
- OpenGeoSys ist eine valide Alternative zu FEFLOW für die Modellierung und Simulation von Erdwärmepumpensystemen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!