

**Auszug aus dem
Praxisprojekt**

Validierung des Carnot Erdwärmesondenmodells

Inhalt

Einleitung.....	1
1. Modellbeschreibung.....	1
1.1 Modell der Erdwärmesonde (EWS)	1
2. Validierung.....	2
2.1 Validierung der Erdwärmesonde	2
Testläufe basierend auf der Arbeit von Dr. Arthur Huber	2
Testläufe basierend auf der Arbeit von Dr. Fabian Ochs	13
TRT-Testlauf (Thermal Response Test)	19
Testlauf mit zyklischem Wechsel von Wärmeentzugsleistung und -bezugsleistung	20
3. Zusammenfassung	21
Quellen	22

Einleitung

Die folgende Dokumentation beschreibt die Validierung aus der Carnot-Toolbox des Programms Matlab/Simulink (Quelle: CARNOT Toolbox Ver. 6.3, 10/2018 for Matlab/Simulink R2016b, © Solar-Institut Juelich)

1. Modellbeschreibung

1.1 Modell der Erdwärmesonde (EWS)

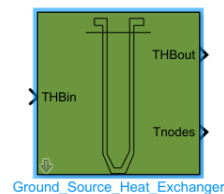


Bild 1-1: Simulink-Block der Erdwärmesonde

Das EWS-Modell dient zur dynamischen Simulation von Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden. Das Modell basiert auf den von Huber und Schuler (1997) beschriebenen Gleichungen, welche in Matlab/Simulink implementiert wurden. Zu den Parametern, die ausgewählt werden können, gehören unter anderem die Geometrieparameter, welche Bohrloch- und Bohrlochfeldgeometrien definieren. Die Genauigkeit und Rechenzeit der Berechnungen wird durch ein vom Benutzer festgelegtes Berechnungsgitter beeinflusst. Die Fluideigenschaften werden basierend auf einer durchschnittlichen Temperatur berechnet und sind während einer Simulation konstant.

Die Außenradiustemperaturen der EWS errechnen sich aus g-Funktionen von Eskilson (1987), welche als Ansatz und als Grenze für die anderen Berechnungsknoten verwendet werden. Die nach oben strömende Fluidtemperatur bestimmt die Auslasstemperatur am letzten Knoten. Diese findet man im THB_{out} .

THB ist ein Vektor, der Auskunft über die Fluide gibt, welche in den Modellblock eintreten und diesen verlassen (z.B: die Temperatur, den Massenstrom, die Art des Fluids, die Fluidmischung und den Druck).

Die g-Funktionen von Eskilson wurden für fünf verschiedene Bohrlochkonfigurationen implementiert (1 Sonde; 2 Sonden, $B/H = 0,1$; 2 Sonden, $B/H = 0,05$; 3x6 Sonden, $B/H = 0,1$; 5x10 Sonden, $B/H = 0,1$). B/H gibt dabei das Verhältnis von Bohrlochabstand zu Bohrlochtiefe an. Die g-Funktionen werden im Initialisierungsskript basierend auf einigen importierten g-Funktionswerten generiert. Die g-Funktionswerte werden in einer Lookup-Tabelle in Simulink angegeben.

(Quelle: „Report-Software for modelling and simulation of ground source heating and cooling systems“; Tomas Persson, Ole Stavset, Randi Kalskin Ramstad, Maria Justo Alonso, Klaus Lorenz; 29.09.2016, letztes Update 12.11.2021)

2. Validierung

2.1 Validierung der Erdwärmesonde

Bei der Validierung des EWS-Modells liegt der grundsätzliche Fokus auf Erdsondenfeldern. Es müssen sowohl die Alterung als auch die Regeneration der Sondenfelder im Modell abgebildet werden.

Die Validierung zeigt ein plausibles Verhalten, wenn der im Modell ermittelte Temperaturverlauf sich in der Tendenz wie die Referenzdaten verhält. Bei Carnot Modellen besteht gemäß den Guidelines eine Anforderung an die maximale Abweichung der Energiebilanz von unter 5 %.

Für typische TGA-Komponenten wie Kessel, Wärmepumpen oder Warmwasserspeicher wird als Betrachtungszeit der Energiebilanz ein Zeitschritt von 2-5 Minuten empfohlen. Für Erdwärmesonden, die in ihrem Alterungs- und Regenerationsverhalten validiert werden sollen, ist dieser Zeitschritt zu kurz. In der vorliegenden Arbeit werden Abweichungen im Zeitschritt von Stunden bis mehreren Jahren betrachtet.

Testläufe basierend auf der Arbeit von Dr. Arthur Huber

(Quelle: „Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder“; Arthur Huber, Daniel Pahud; Dezember 1999)

Für die Testläufe nach Arthur Huber wurden die in der nachfolgenden Tabelle angegebenen Parameter verwendet. Dabei wurden die meisten Parameter für typische Geländeeigenschaften und für typische Eigenschaften einer Doppel-U-Rohrsonde ausgewählt.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Sondenlänge	verschieden	Wärmeleitfähigkeit Erde λ_{Erde}	2.5 W/mK
Sonden-anordnung / -anzahl	verschieden	Dichte ρ_{Erde}	2200 kg/m ³
Sonden-abstand B	verschieden	spez. Wärmekapazität $c_{p\text{Erde}}$	1000 J/kgK
Sonden-durchmesser innen D_i	26 mm	Wärmeleitfähigkeit Füllung λ_{Fill}	0.81 W/mK
Bohr-durchmesser D_b	120 mm	Dichte Füllung ρ_{Fill}	1180 kg/m ³
thermischer Sonden-widerstand R_a	0,35 Km/W	spez. Wärmekapazität Füllung $c_{p\text{Fill}}$	3040 J/kgK
thermischer Bohr-lochwiderstand R_b	0,1 Km/W	kin. Viskosität der Sole ν_{Sole}	4.15 mm ² /s
Solemassenstrom pro Sonde	0,139 kg/s (Wasser-Glycol 25%)	Wärmeleitfähigkeit Sole λ_{Sole}	0.5 W/mK
Mittlere Erdtemperatur oben	0 °C	Dichte Sole ρ_{Sole}	1053 kg/m ³
Temperatur-gradient	0 °C/m	spez. Wärmekapazität $c_{p\text{Sole}}$	3875 J/kgK
Sonden-Rücklauftemperatur	verschieden	Entzugsleistung	verschieden

Tabelle: 2-1 Zur Validierung definierte Grundparameter

Zum Validierungsprozess wurden 13 Testläufe der 20 Testläufe von Arthur Huber über Matlab-Simulink mit Hilfe der Carnot Toolbox durchgeführt, welche in der folgenden Tabelle aufgeführt sind. Die fehlenden 7 Testläufe konnten über das Simulink-Modell der EWS nicht durchgeführt werden, da das EWS-Modell der Carnot-Toolbox nur bestimmte feldgeometrische Anordnungen der Erdwärmesonden zulässt.

Test-lauf	Anzahl Sonden	Sonden-länge H [m]	Sonden-abstand B [m]	Simula-tionszeit [Jahre]	Entzugs-leistung [W/m]	Sonden-Rücklauf [°C]	Entzugs-profil [h/a]	Sonden-zeitkonst. t_s [Jahre]
1	1	50	-	60	-10	-	8760	7,8
2	1	50	-	60	-	10	8760	7,8
3	1	100	-	60	-	10	8760	31
4	1	200	-	60	-	10	8760	124
5	2	50	2,5	30	-	10	8760	7,8
6	2	50	5	30	-	10	8760	7,8
7	3x6	50	5	30	-	10	8760	7,8
8	10x5	50	5	30	-10	-	8760	7,8
9	10x5	50	5	30	-	10	8760	7,8
10	10x5	50	5	15	-20	-	4380	7,8
11	10x5	50	5	15	50	-	168 im 1. Jahr	7,8
12	10x5	50	5	15	50	-	1680 im 1. Jahr	7,8
13	10x5	50	5	15	50	-	16800 total	7,8

Tabelle 2-2: Definition der Validierungsfälle

Als Hinweis sei noch angegeben, dass der Vergleich von mittlerer Temperatur oder Austrittstemperatur in der Arbeit von Huber wechselt und nicht vollständig nachvollziehbar angegeben ist. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten liegen nicht tabellarisch als Zahlenwerte vor, sondern wurden aus den in der Arbeit verwendeten Grafiken herausgelesen.

Testlauf 1:

Für den ersten Testlauf wurde eine Einzelsonde mit einer konstanten Wärmeentzugsleistung von 10 W/m und einem Volumenstrom von 0,139 kg/s simuliert.

Während des Testlaufs wurde die durchschnittliche Temperaturentwicklung ($T_{\text{Durchschnitt}}$) des durchströmenden Mediums in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 60 Jahren berechnet (Bild 2-1).

$$T_{\text{Durchschnitt}} = \frac{T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}}{2}$$

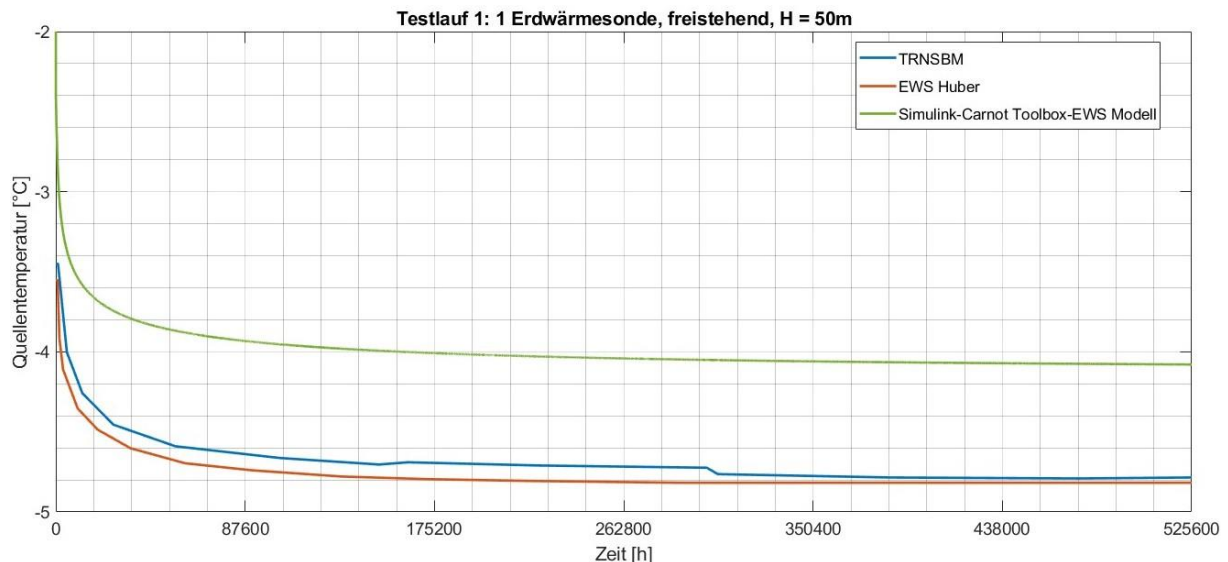


Bild 2-1: Testlauf 1: Dargestellt sind die durchschnittlichen Temperaturentwicklungen des durchströmenden Mediums einer 50 m langen EWS mit einer konstanten Entzugsleistung von 10 W/m, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 1 mit Wärmeentzug aus einer Einzelsonde liegt bei einer Temperaturabweichung von ca. 0,7 K. Bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 3 K ist dies ein Fehler von über 20 %.

Testlauf 2:

Im Testlauf 2 kam die gleiche Sonde wie im ersten Testlauf mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen zum Einsatz. Anstelle der konstanten Wärmeentzugsleistung wurde die Eintrittstemperatur des Fluids auf 10 °C und der Volumenstrom auf 0,139 kg/s eingestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur der EWS in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 60 Jahren berechnet (Bild 2-2).

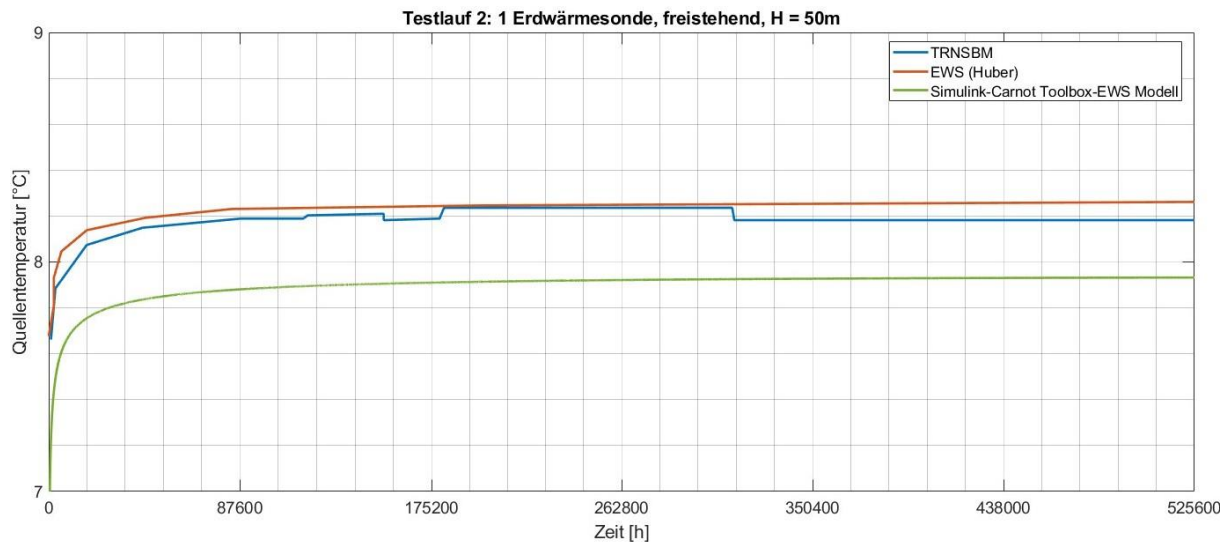


Bild 2-2: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang einer 50 m langen EWS mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 2 mit Wärmezufuhr in eine Einzelsonde liegt mit einer Temperaturabweichung unter 0,3 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 2 K bei einer Leistungsabweichung von 15 %.

Testlauf 3:

Der Unterschied zwischen Testlauf 3 und Testlauf 2 ist die Länge der EWS von 100 m anstelle der im Testlauf 2 verwendeten 50 m Länge. Ansonsten wurden die restlichen Parameter in den beiden Testläufen gleich eingestellt.

Auch Während dieses Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 60 Jahren berechnet (Bild 2-3).

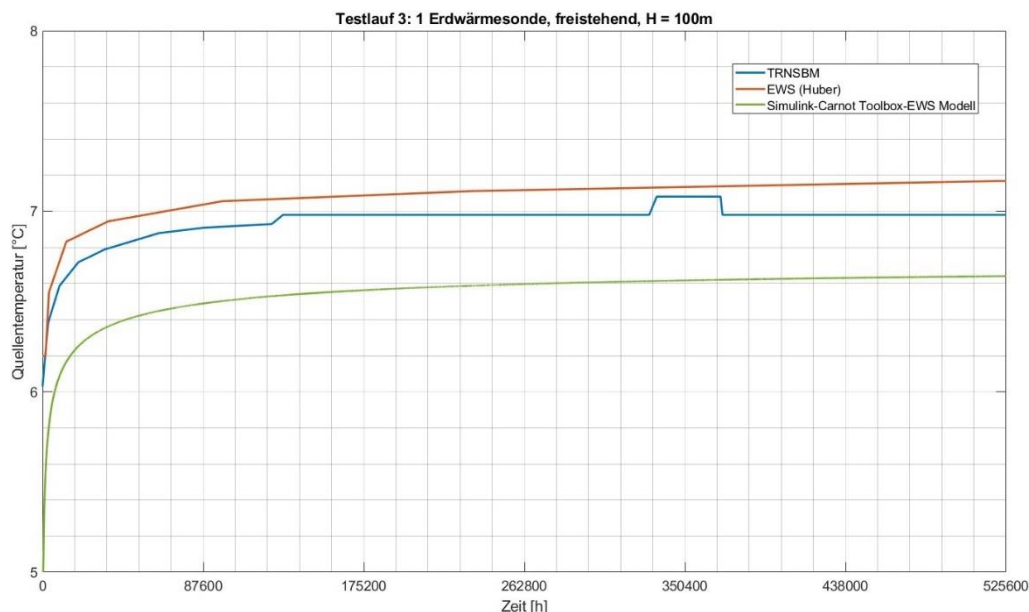


Bild 2-3: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang einer 100 m langen EWS mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 3 mit Wärmezufuhr in eine Einzelsonde liegt mit einer Temperaturabweichung der Temperatur von ca. 0,4 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 3 K bei einer Leistungsabweichung von etwa 13 %.

Wichtig ist im Vergleich zu Testfall 2, dass die Tendenz korrekt abgebildet wird: eine längere Erdwärmesonde führt bei Wärmezufuhr zu niedrigerer Temperatur.

Testlauf 4:

Der Unterschied zwischen Testlauf 4 und Testlauf 3 ist die weitere Verdopplung der EWS-Länge auf 200 m anstelle der im Testlauf 3 verwendeten 100 m Länge. Ansonsten wurden die restlichen Parameter wie auch schon in den Testläufen 2 und 3 gleich eingestellt.

Während des Testlaufs wurde wiederum die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 60 Jahren berechnet (Bild 2-4).

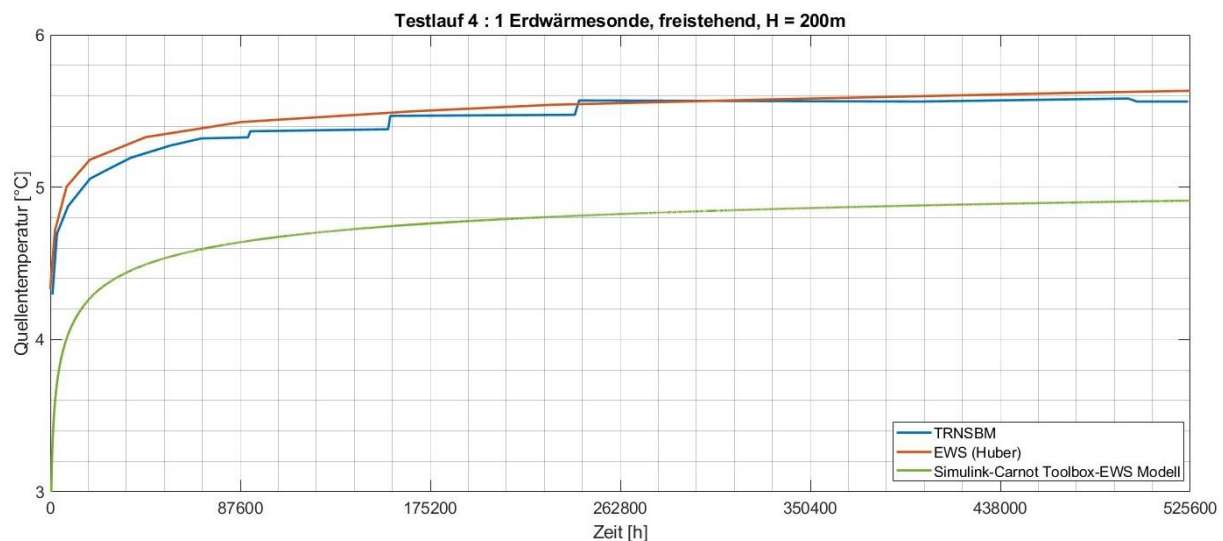


Bild 2-4: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang einer 200 m langen EWS mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 4 mit Wärmezufuhr in eine Einzelsonde liegt mit einer Temperaturabweichung von ca. 0,7 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 4,5 K bei einer Leistungsabweichung von 16 %.

Wichtig ist im Vergleich zu Testfall 2 und 3, dass die Tendenz korrekt abgebildet wird: eine längere Erdwärmesonde führt bei Wärmezufuhr zu niedrigerer Temperatur.

Testlauf 5

In diesem Testlauf wurden 2 Erdwärmesonden mit jeweils einer Länge von 50 m und einem Abstand von 2,5 m simuliert. Die Eintrittstemperatur des Fluids wurde auf 10 °C und der Volumenstrom auf 0,139 kg/s gestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bild 2-5).

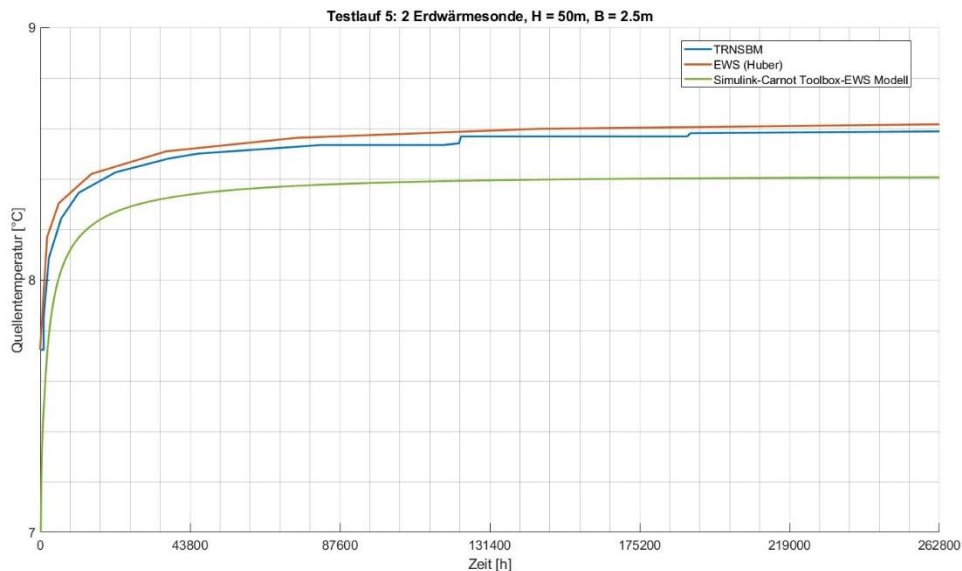


Bild 2-5: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang zweier 50 m langen und mit einem Abstand von 2,5 m zueinander liegenden Erdwärmesonden mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 5 mit Wärmezufuhr in zwei parallele Sonden liegt mit einer Temperaturabweichung ca. 0,2 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 1,5 K bei einer Leistungsabweichung von 13 %.

Testlauf 6:

Der Unterschied zwischen Testlauf 5 und Testlauf 6 ist der Abstand der Erdwärmesonden zueinander. Anstelle dem im Testlauf 5 verwendeten 2,5 m Abstand wird in diesem Testlauf ein Abstand von 5 m gewählt. Ansonsten wurden die restlichen Parameter in den beiden Testläufen gleich eingestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bild 2-6).

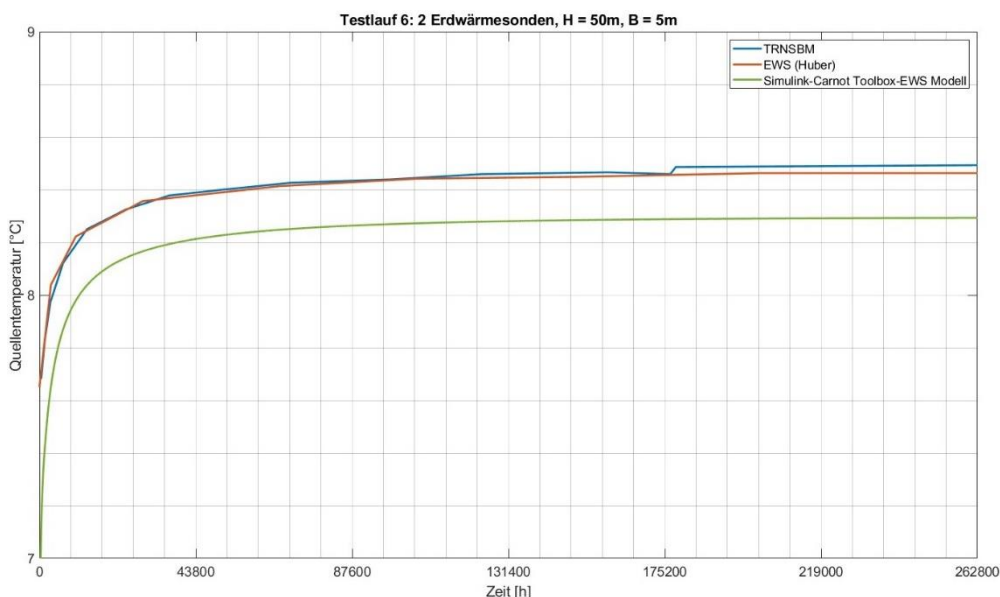


Bild 2-6: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang zweier 50 m langen und mit einem Abstand von 5 m zueinander liegenden Erdwärmesonden mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 6 mit Wärmezufuhr in zwei parallele Sonden liegt mit einer Temperaturabweichung ca. 0,2 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 1,6 K bei einer Leistungsabweichung von 12,5 %.

Wichtig ist, dass die korrekte Tendenz im Vergleich zu Testlauf 5 abgebildet wird: ein größerer Sondenabstand führt bei Wärmezufuhr zur niedrigeren Temperatur.

Testlauf 7

In diesem Testlauf wurde ein Sondenfeld mit 3 x 6 Erdwärmesonden mit jeweils einer Länge von 50 m und einem Abstand von 5 m zueinander simuliert. Die Eintrittstemperatur des Fluids der 18 Sonden wurde auf 10 °C und der Volumenstrom auf 0,139 kg/s gestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bild 2-7).

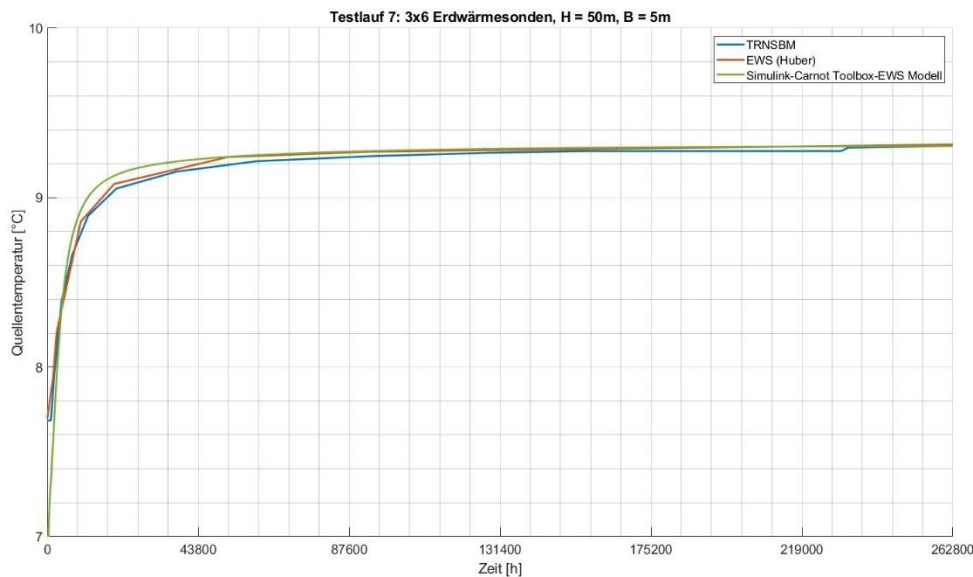


Bild 2-7: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang des Fluids der Erdwärmesonden (3x6 Sondenfeld, Abstand von 5 m und jeweils 50 m Länge) mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 7 mit Wärmezufuhr in ein Erdsondenfeld liegt bei einer nicht feststellbaren Temperaturabweichung im Langzeitbereich. Die Abweichungen bei Simulationsstart lassen sich durch unterschiedliche Initialisierungen der Starttemperaturen erklären.

Testlauf 8

In diesem Testlauf wurde ein Sondenfeld mit 5 x 10 Erdwärmesonden, mit jeweils einer Länge von 50 m und einem Abstand von 5 m zueinander simuliert. Die Wärmeentzugsleistung wurde konstant auf 10 W/m und der Volumenstrom auf 0,139 kg/s gestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Durchschnittstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bild 2-8).

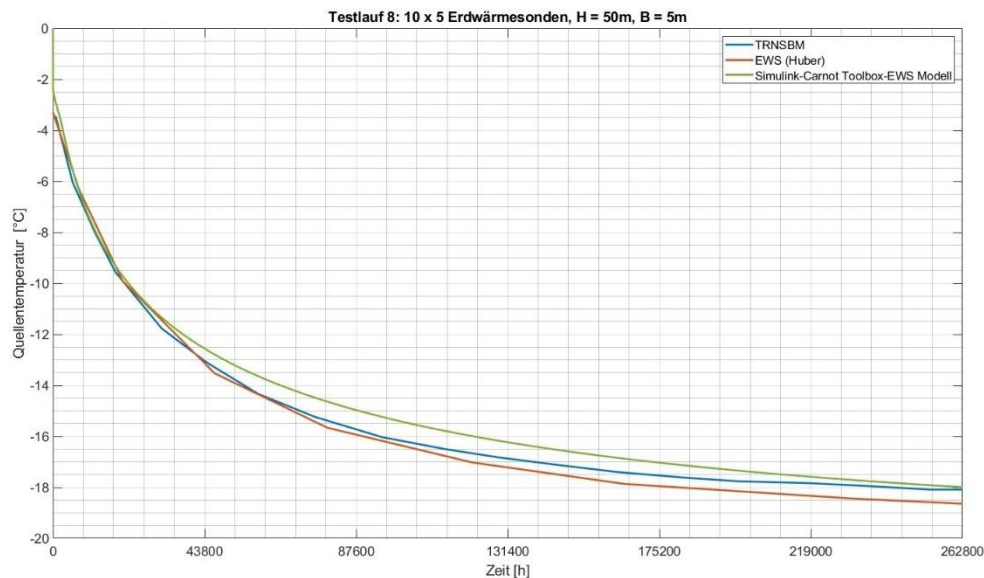


Bild 2-8: Dargestellt sind die durchschnittlichen Temperaturentwicklungen des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 5 m und jeweils 50 m Länge) mit einer konstanten Entzugsleistung von 10 W/m, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 8 mit Wärmeentzug aus einem Erdsondenfeld liegt bei einer maximalen Temperaturabweichung von ca. 0,5 K und zeigt ein gutes Langzeitverhalten. Bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 2 K ist dies ein Fehler von 25 %.

Testlauf 9

Im Testlauf 9 kommt wie im Testlauf 8 ein Sondenfeld mit 5 x 10 Erdwärmesonden, welche jeweils eine Länge von 50 m und einem Abstand von 5 m zueinander haben, zum Einsatz. Jedoch wurde anstelle der konstanten Wärmeentzugsleistung die Eintrittstemperatur des Fluids auf 10 °C und der Volumenstrom auf 0,139 kg/s gestellt.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Ausgangstemperatur des Fluids der Sonde in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bild 2-9).

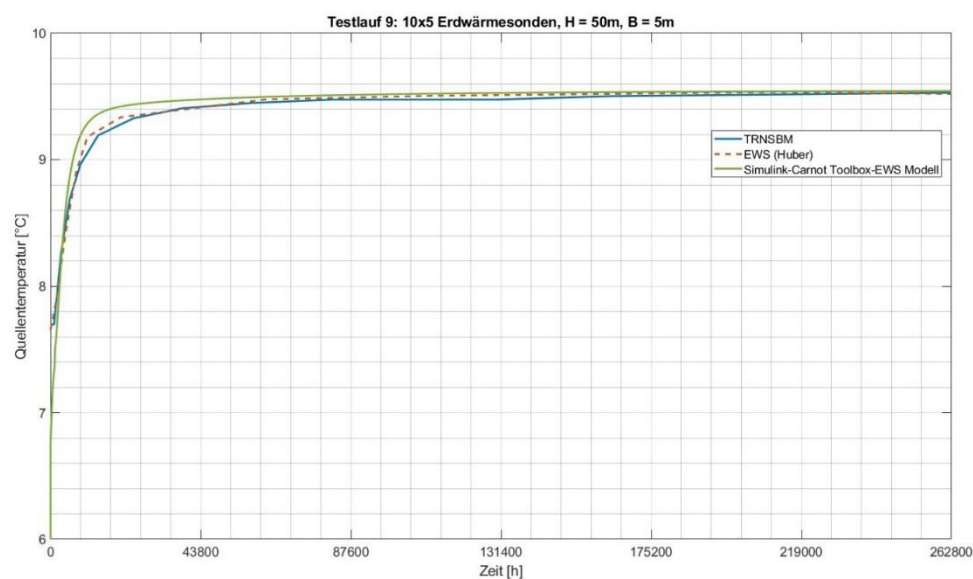


Bild 2-9: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 5 m und jeweils 50 m Länge) mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 10 °C, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 9 mit Wärmezufuhr in ein Erdsondenfeld liegt bei einer nicht feststellbaren Temperaturabweichung im Langzeitbereich. Die Abweichungen bei Simulationsstart lassen sich durch unterschiedliche Initialisierungen der Starttemperaturen erklären.

Testlauf 10 a und 10 b

Der Aufbau von Testlauf 10 a ist wie im Testlauf 8 (10x5 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge), jedoch mit einer **zyklischen** Wärmeentzugsleistung von 20 W/m je Sonde. Im 6-monatigen Wechsel wurde die Entzugsleistung der Erdwärmesonden auf 20 W/m und auf 0 W/m gestellt.

Der Aufbau von Testlauf 10 b ist gleich dem von Testlauf 10 a (10x5 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge), jedoch mit einer **kontinuierlichen** Wärmeentzugsleistung von 20 W/m je Sonde.

Während beider Testläufe wurde die Entwicklung der Durchschnittstemperatur des Fluids der Sonden in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 30 Jahren berechnet (Bilder 2-10 und 2-11).

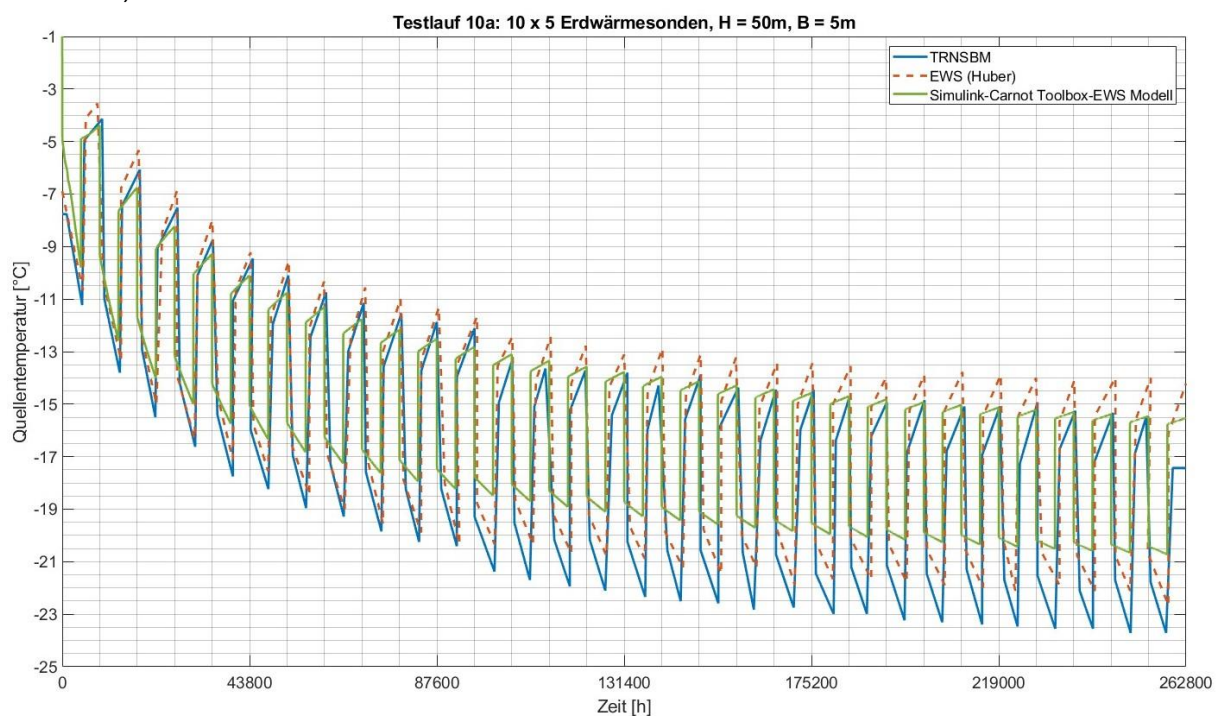


Bild 2-10: Dargestellt sind die durchschnittlichen Temperaturentwicklungen des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 5 m und jeweils 50 m Länge) mit einer zyklischen Entzugsleistung von 20 W/m auf 0 W/m, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Im Testlauf 10 a ist die zyklische Wärmeentnahme nicht sehr exakt abgebildet, es gibt aber auch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Referenzdaten.

Das Simulink-Carnot EWS-Modell liegt immer zwischen den Referenzdaten und bildet die Tendenz korrekt ab.

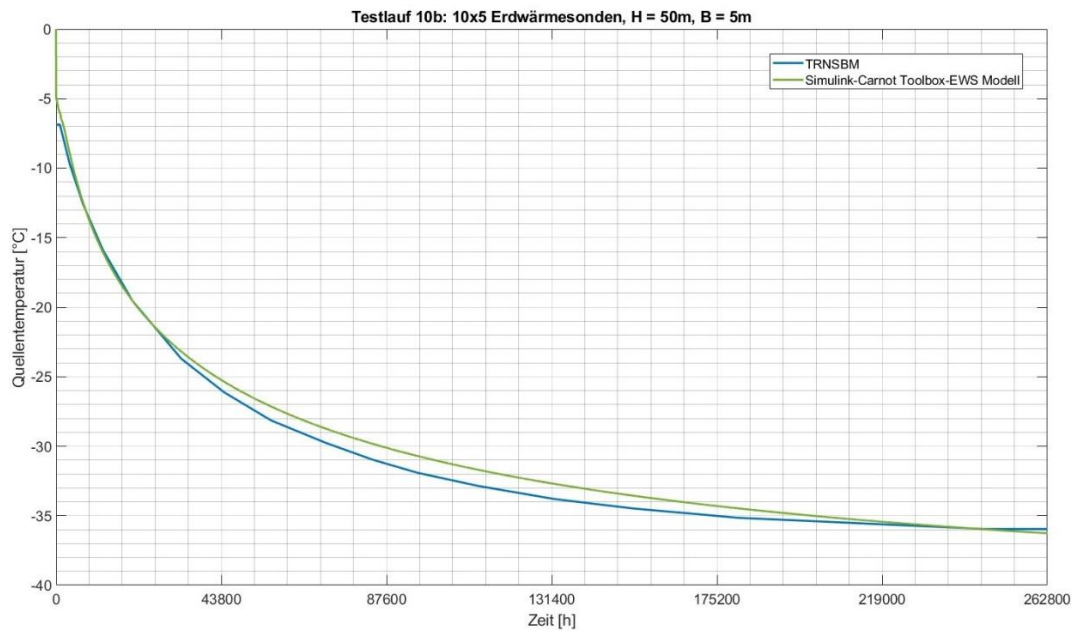


Bild 2-11: Dargestellt sind die durchschnittlichen Temperaturentwicklungen des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge) mit einer konstanten Entzugsleistung von 20 W/m, welche mit dem TRNSBM-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 10 b mit einer konstanten Wärmeentnahme aus dem Erdsondenfeld liegt mit einer Temperaturabweichung 0,2 K bei einem Fehler von 0,7 % und zeigt somit ein gutes Langzeitverhalten.

Testlauf 11

Der Aufbau von Testlauf 11 ist gleich dem von Testlauf 10 (10x5 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge), jedoch wird für 168 Stunden eine kontinuierliche Wärmeentzugsleistung von 50 W/m je Sonde eingestellt, mit anschließender Entspannungsphase.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Durchschnittstemperatur des Fluids der Sonden in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet (Bild 2-12).

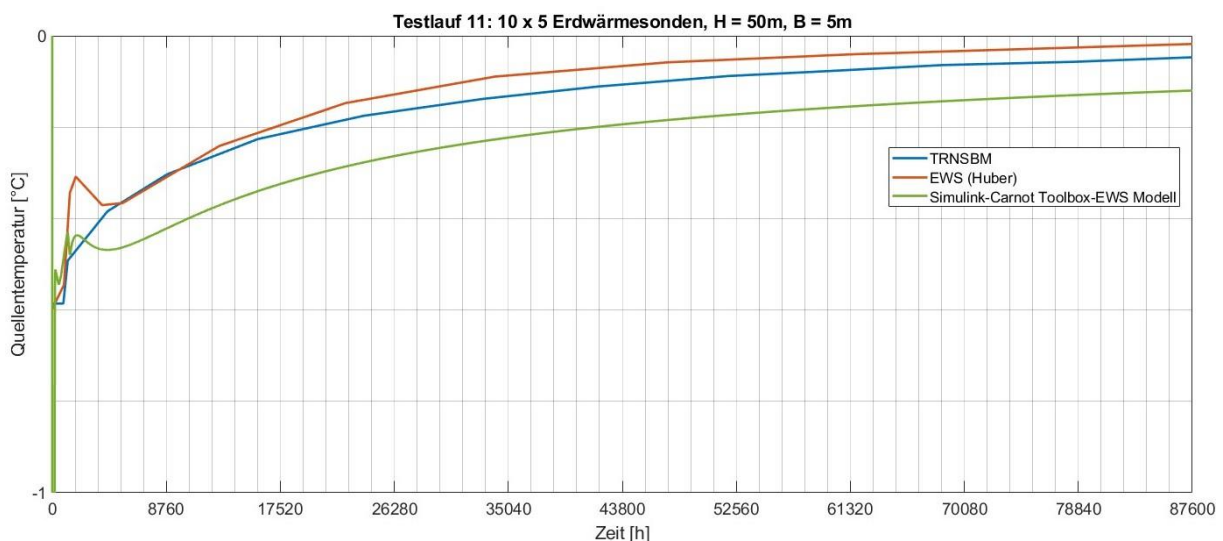


Bild 2-12: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge) mit einer konstanten Entzugsleistung von 50 W/m über 168 Stunden mit anschließender Entspannung, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 11 zeigt in der Tendenz einen akzeptablen Temperaturverlauf, bei Temperaturabweichungen um die 0,1 K.

Testlauf 12

Der Aufbau von Testlauf 12 ist gleich dem von Testlauf 11 (10x5 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge), jedoch wird für die verzehnfachte Zeitdauer von 1680 Stunden eine kontinuierliche Wärmeentzugsleistung von 50 W/m je Sonde eingestellt, mit anschließender Entspannungsphase.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Durchschnittstemperatur des Fluids der Sonden in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet (Bild 2-13).

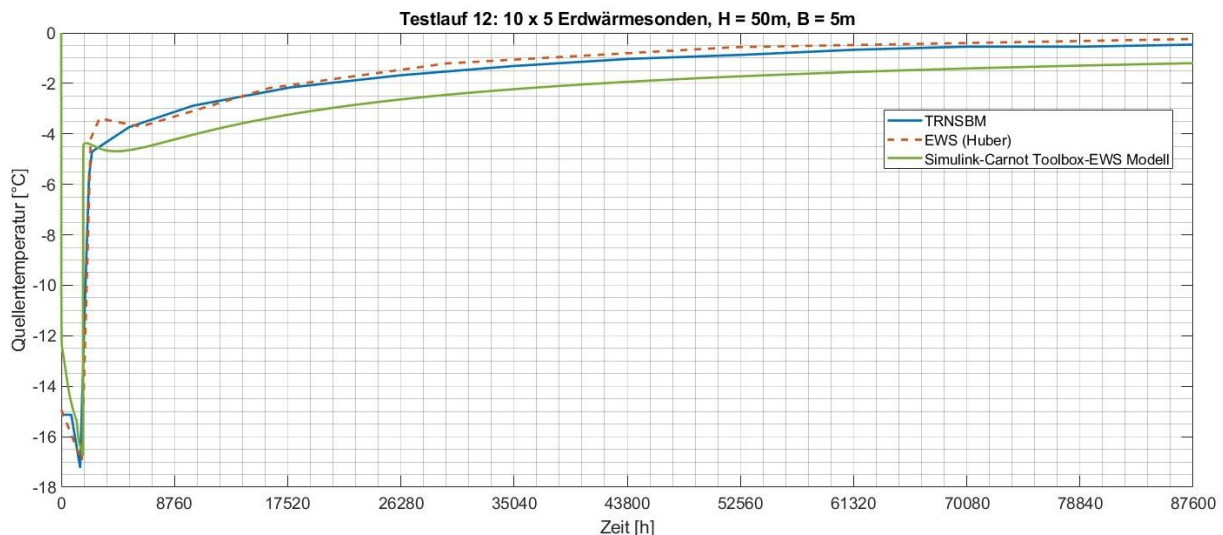


Bild 2-13: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge) mit einer konstanten Entzugsleistung von 50 W/m über 1680 Stunden mit anschließender Entspannung, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Im Testlauf 12 wurden offensichtlich unterschiedliche Verfahren zur Festlegung der Starttemperaturen angewandt. Der Testlauf zeigt während der Wärmenahme von der Tendenz her einen guten Temperaturverlauf, mit einer Temperaturabweichung unter 0,3 K. Die Temperaturerholungsphase nach der Wärmeentnahme ist in der Tendenz korrekt dargestellt, jedoch mit einer Temperaturabweichung von etwa 1 K.

Testlauf 13

Der Aufbau von Testlauf 13 ist gleich dem von Testlauf 12 (10x5 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge), jedoch wird für eine wiederum verzehnfachte Zeitdauer von 16800 Stunden eine kontinuierliche Wärmeentzugsleistung von 50 W/m je Sonde eingestellt, mit anschließender Entspannungsphase.

Während des Testlaufs wurde die Entwicklung der Durchschnittstemperatur des Fluids der Sonden in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet (Bild 2-14).

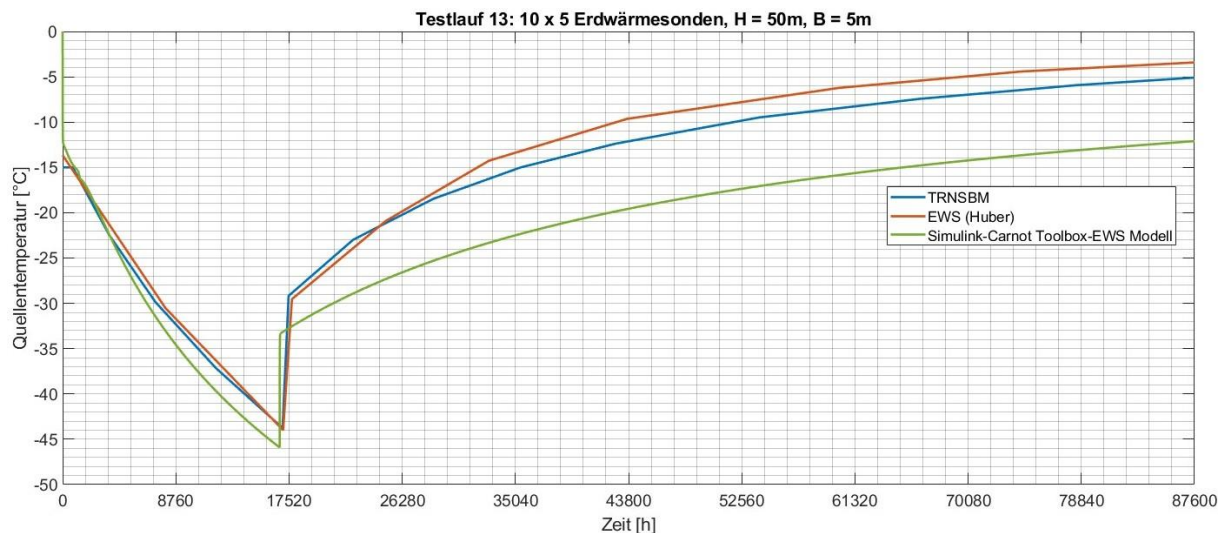


Bild 2-14: Dargestellt sind die Temperaturentwicklungen am Ausgang des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 50 m und jeweils 5 m Länge) mit einer konstanten Entzugsleistung von 50 W/m über 16800 Stunden mit anschließender Entspannung, welche mit dem TRNSBM-, dem EWS-Programm und dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Der Testlauf 13 zeigt sehr ähnliche Starttemperaturen. Während der Wärmentnahme weist der Testlauf von der Tendenz her einen guten Temperaturverlauf auf, mit einer Temperaturabweichung von 2 K. Die Temperaturerholungsphase nach der Wärmeentnahme ist in ihrer Tendenz korrekt dargestellt, jedoch mit einer Temperaturabweichung von etwa 5 K.

Testläufe basierend auf der Arbeit von Dr. Fabian Ochs

(Quelle: „CARNOT EWS model - Model for vertical ground heat exchanger“; Fabian Ochs; Innsbruck 2012; zu finden im Carnot-Toolbox Verzeichnis:

[Path_to_Carnot]\public\library_simulink\Source\Heat_Pump\Ground_Source_Heat_Exchange\doc\pdf)

Testlauf 14: Thermal Response Test (Kurzzeitverhalten)

Für den Testlauf 14 wurden die Parameter verwendet, welche in den folgenden Tabellen (2-3; 2-4) angegeben sind.

	Füllung	Boden
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	2,1	2,3
Dichte ρ [kg/m ³]	2500	2500
spez. Wärmekapazität c_p [J/(kg K)]	800	800

Tabelle 2-3: Thermische Eigenschaften der Füllung und des Bodens

Typ	2-U
Höhe H [m]	193
Bohrlochdurchmesser D_b [m]	0,2
Sondendurchmesser D [mm]	40/3,7
Massenstrom \dot{m} [kg/s]	0,44 (Wasser)
Ungestörte Bodentemperatur [°C]	14,7

Tabelle 2-4: Bohrlocheigenschaften und -parameter

Für diesen Testlauf wurden die aus Messungen einer TRT-Messung (Thermal Response Test) ermittelten Eintrittstemperaturen des Fluids der Erdwärmesonde implementiert. Während des Testlaufs wurde die Rücklauf temperaturentwicklung des durchströmenden Mediums in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 24 Stunden berechnet (Bild 2-15).

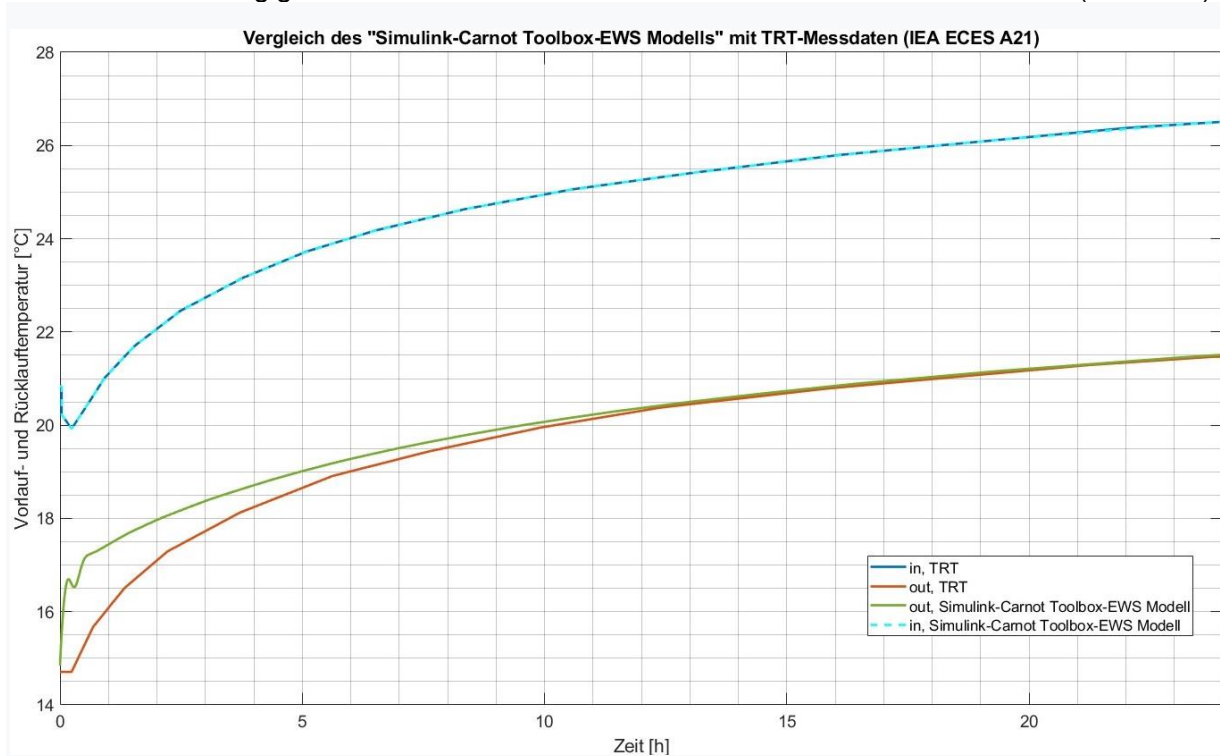


Bild 2-15: Vergleich der Rücklauf temperaturentwicklung des „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modells“ mit TRT-Messdaten (IEA ECES A21).

Fazit:

Während des Testlaufs 14 entstehen zu Beginn Temperaturabweichungen, da die Starttemperaturen des TRT nicht komplett erfassbar sind. Im weiteren Verlauf des TRT wird der Temperaturverlauf allerdings perfekt getroffen.

Testlauf 15: Ansys-FEM Simulation (Kurzzeitverhalten)

Zur Validierung dieses Testlaufs wurde das „Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell“ mit einem komplett diskretisierten EWS-Modell mit simulierten Daten (Ansys-FEM Simulation) verglichen.

Testlauf 15 wurde mit den Parametern, welche in den folgenden Tabellen (2-5; 2-6) angegeben sind, durchgeführt.

	Füllung	Boden
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	2,2	2,3
Dichte ρ [kg/m ³]	2600	1460
spez. Wärmekapazität c_p [J/(kg K)]	850	1500

Tabelle 2-5: Thermische Eigenschaften der Füllung und des Bodens

Typ	2-U
Höhe H [m]	100
Bohrlochdurchmesser D_b [m]	0,13
Sondendurchmesser D [mm]	32/3
Massenstrom \dot{m} [kg/s]	0,25 (Wasser)
Ungestörte Bodentemperatur [°C]	10

Tabelle 2-6: Bohrlocheigenschaften und -parameter

Testlauf 15a

In dem Testlauf 15a war die Eintrittstemperatur des Fluids der EWS konstant auf 80 °C eingestellt.

Während des Testlaufs wurde die Rücklaufftemperaturentwicklung des durchströmenden Mediums in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 24 Stunden berechnet (Bild 2-16).

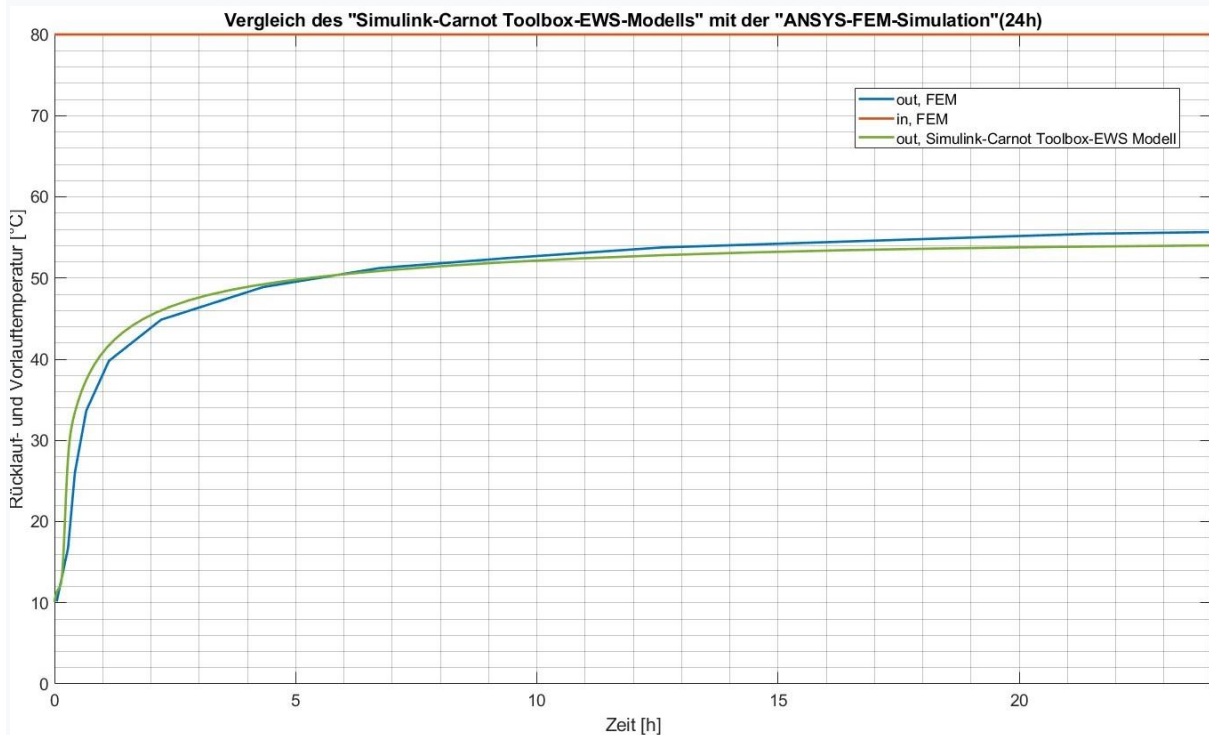


Bild 2-16: Vergleich der Rücklaufftemperaturentwicklung des „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modells“ mit der „ANSYS-FEM-Simulation“ (24h).

Testlauf 15b

Testlauf 15b entspricht dem Testlauf 15a, außer das während des Testlaufs die Rücklaufftemperaturentwicklung des durchströmenden Mediums in Abhängigkeit der Zeit über einen Zeitraum von 2000 Stunden berechnet wurde (Bild 2-17).

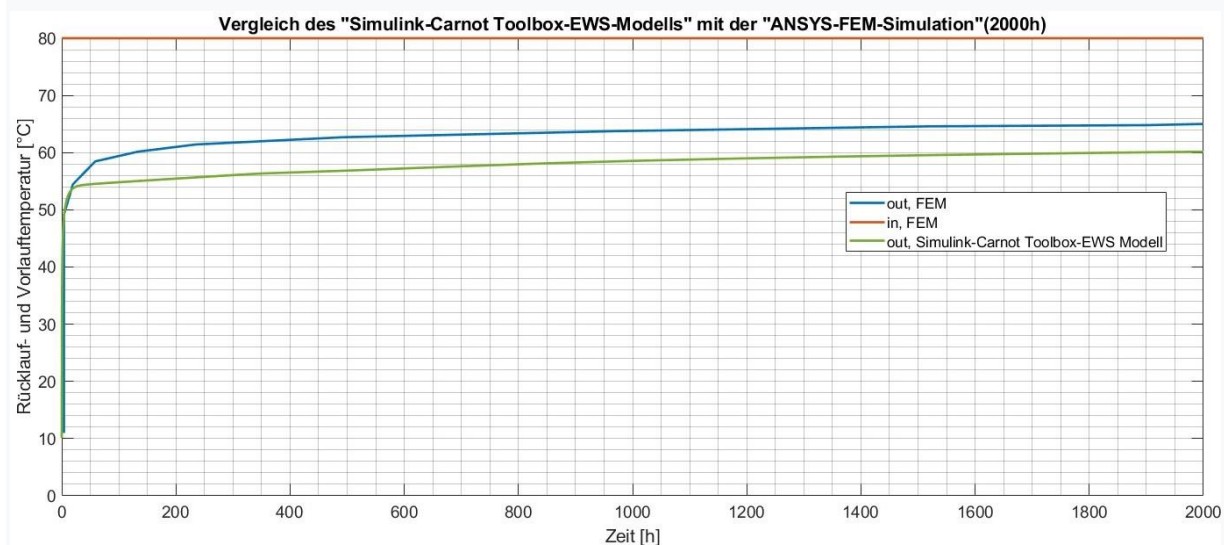


Bild 2-17: Vergleich der Rücklaufftemperaturentwicklung des „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modells“ mit der „ANSYS-FEM-Simulation“ (2000h).

Fazit:

Der Testlauf 15a mit Wärmezufuhr in eine Einzelsonde liegt mit einer Temperaturabweichung von ca. 2 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 24 K bei einer Abweichung von 9 %.

Der Testlauf 15b liegt mit einer Temperaturabweichung von ca. 5 K und bei einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 15 K bei einer Abweichung von 16 %.

Da die Stoffdaten des Wärmeträgerfluids temperaturabhängig sind, jedoch im Simulink-Carnot-Modell nur bei Starttemperatur bestimmt werden, werden bei den untypisch hohen Temperaturen des Testlaufs die Abweichungen im Wärmeübergang deutlich. Die Tendenz des Temperaturverlaufs wie auch der Startbereich wurden gut abgebildet.

Testlauf 16: Vergleich mit EED, PHews, „Simulink-Carnot EWS Modell“ (Langzeitverhalten)

In diesem Testlauf wird das Langzeitverhalten getestet und das „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell“ mit den Programmen EED, PHews und dem „Simulink-Carnot EWS Modell“ von Fabian Ochs verglichen.

Um das Langzeitverhalten zu validieren, wurden typische Lasten eines Einfamilien-Passivhauses angesetzt (Tabelle 2-7). In Profil 1 ist die Heizlast und in Profil 2 die Last für Heizung und Warmwasser angegeben.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Profil1: Q (H) [MWh]	0,43	0,21	0,09	0,03	0	0	0	0	0	0,03	0,22	0,43
Profil2: Q (H+DHW) [MWh]	1,24	0,65	0,36	0,25	0,26	0,25	0,21	0,21	0,25	0,26	0,5	1,19

Tabelle 2-7: Wärmeentzugslast [MWh]

Im Profil 1 ist die Wärmeentzugsleistung und -last $\dot{Q} = 933\text{W}$ und $Q = 1444\text{kWh}$.

Im Profil 2 ist die Wärmeentzugsleistung und -last $\dot{Q} = 1666\text{W}$ und $Q = 5623\text{kWh}$.

	Füllung	Boden
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	1	2
Dichte ρ [kg/m ³]	2000	2500
spez. Wärmekapazität c_p [J/(kg K)]	1000	800

Tabelle 2-8: Thermische Eigenschaften der Füllung und des Bodens

Typ	2-U
Höhe H [m]	50 70 100
Bohrloch- durchmesser D_b [m]	0,18
Sonden- durchmesser D [mm]	32/3
Wärmeleitfähigkeit Rohr λ_p [W/(mK)]	0,48
Entfernung Rohr B_u [m]	0,1293
Massenstrom \dot{m}_{dot} [kg/s]	0,25 (Wasser-Glycol 25%)
Ungestörte Bodentemperatur [°C]	10
Geothermischer Gradient T_{grad} [K/m]	0,025
Wärmestromdichte q [W/m ²]	0,05
Bohrlochwiderstand R_a [(Km)/W]	0,46134
Thermischer Bohrlochwiderstand R_b [(Km)/W]	0,11729

Tabelle 2-9: Bohrloch- und EWS-Parameter

Die Temperaturverteilung für eine konstante Wärmeentnahme wurde für eine Zeitdauer von 50 Jahren vorberechnet.

Testlauf 16a

In den folgenden drei Diagrammen wurde die resultierende Temperaturentwicklung für die reine Heizlast (Profil1) für drei verschiedene Bohrlochlängen mit den anderen Simulationen (PHews, EED, Carnot EWS (Ochs)) verglichen.

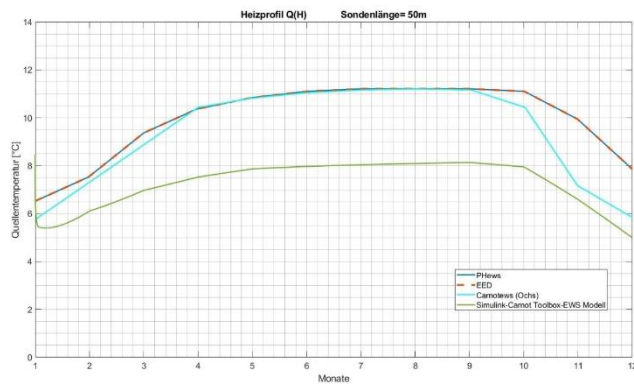


Bild 2-18: Profil 1 Q(H): Temperaturentwicklung für eine 50 m lange EWS

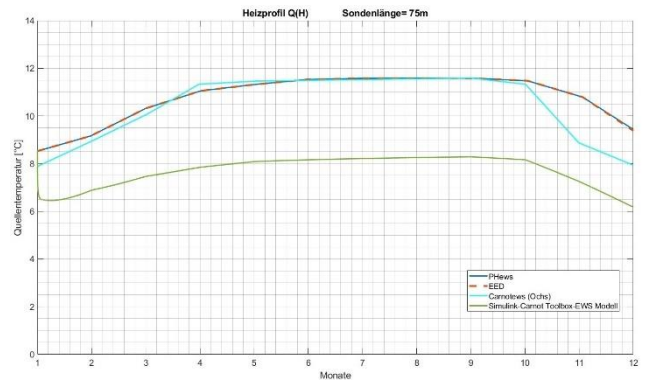


Bild 2-19: Profil 1 Q(H): Temperaturentwicklung für eine 75 m lange EWS

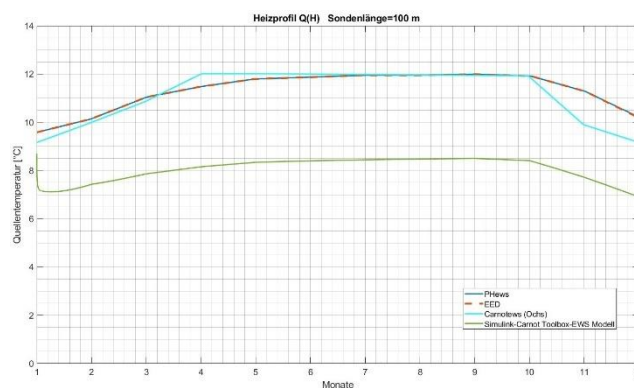


Bild 2-20: Profil 1 Q(H): Temperaturentwicklung für eine 100 m lange EWS

Testlauf 16b

In den folgenden drei Diagrammen wurde die resultierende Temperaturentwicklung für den Heizungs- und Warmwasserverbrauch (Profil2) für drei verschiedene Bohrlochlängen mit den anderen Simulationen (PHews, EED, Carnot EWS (Ochs)) verglichen.

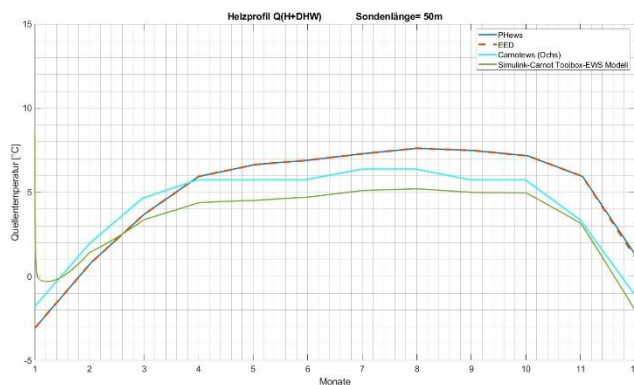


Bild 2-20: Profil 2 Q(H+DHW): Temperaturentwicklung für eine 50m lange EWS

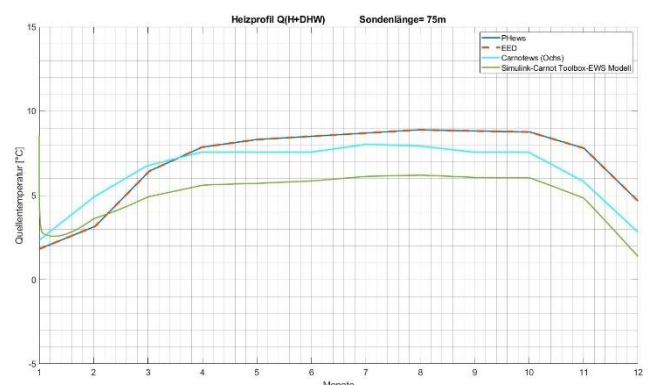


Bild 2-21: Profil 2 Q(H+DHW): Temperaturentwicklung für eine 75m lange EWS

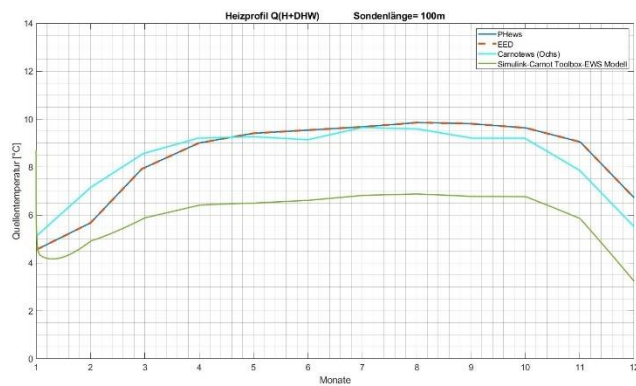


Bild 2-22: Profil 2 Q(H+DHW): Temperaturentwicklung für eine 100 m lange EWS

Testlauf 16c

In den folgenden drei Diagrammen wurde der Mittelwert für die resultierende Temperaturentwicklung für einen konstanten Wärmeleistungsentzug von 1667 W für 12 Stunden pro Tag für drei verschiedene Bohrlochlängen mit den anderen Simulationen (PHews, EED, Carnot EWS (Ochs)) verglichen.

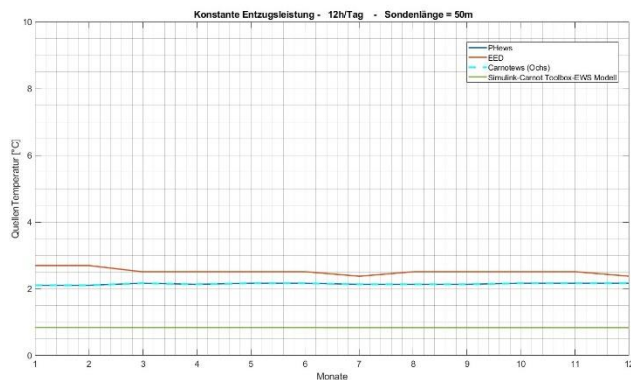


Bild 2-23: Konstanter Wärmeentzug von 1667 W für 12 h/Tag: Temperaturentwicklung für eine 50 m lange EWS.

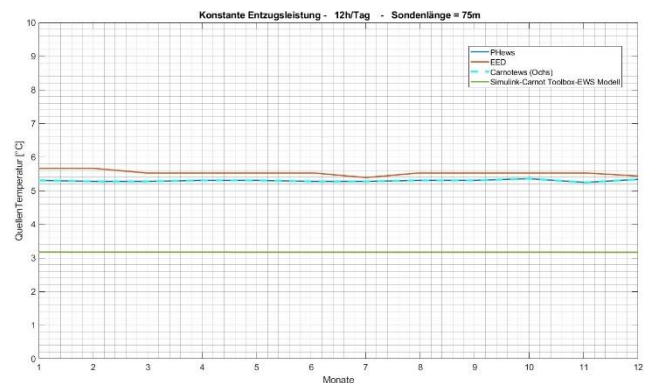


Bild 2-24: Konstanter Wärmeentzug von 1667 W für 12 h/Tag: Temperaturentwicklung für eine 75 m lange EWS.

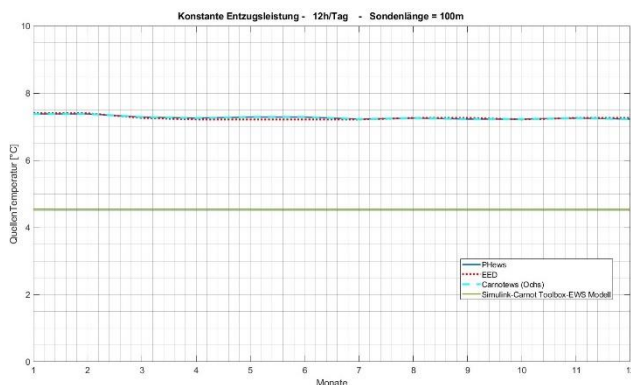


Bild 2-25: Konstanter Wärmeentzug von 1667 W für 12 h/Tag: Temperaturentwicklung für eine 100 m lange EWS.

Fazit:

In den Testläufen 16 a-c ist der Verlauf der Entwicklung der simulierten Temperatur des Simulink-Carnot-Modells vergleichbar mit den Berechnungsergebnissen. Allerdings liegen die simulierten monatlichen massenstromgewichteten Temperaturen bis zu 3,5 K niedriger.

TRT-Testlauf (Thermal Response Test)

Testlauf 17

Für diesen Testlauf wurden die aus einer TRT-Messung ermittelten Eintrittstemperaturen des Fluids der Erdwärmesonde (Thermal Response Test) implementiert und dessen Ausgangstemperaturen mit den simulierten Werten des „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modell“ verglichen.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Durchschnittliche jährliche Außentemp.	14,7 °C	Wärmeleitfähigkeit Rohr	0,48 W/(m K) (Wasser)
Temperaturgradient	0,015 K/m	Massenstrom	0,124625 kg/s
Wärmeleitfähigkeit Erde	2,3 W/(m K)	Sondenlänge	23 m
spez. Wärmekapazität Erde	1000 J/(kg K)	Außendurchmesser Rohr	0,03 m
Dichte Erde	2180 kg/m³	Bohrlochdurchmesser	0,127 m
Wärmeleitfähigkeit Füllung	2,1 W/(m K)	Schaftabstand	0,12 m
spez. Wärmekapazität Füllung	3040 J/(kg K)	Rohrwanddicke	0,0037 m
Dichte Füllung	2500 kg/m³	Sondenanzahl	1

Tabelle 2-10: Parameter der TRT-Messung

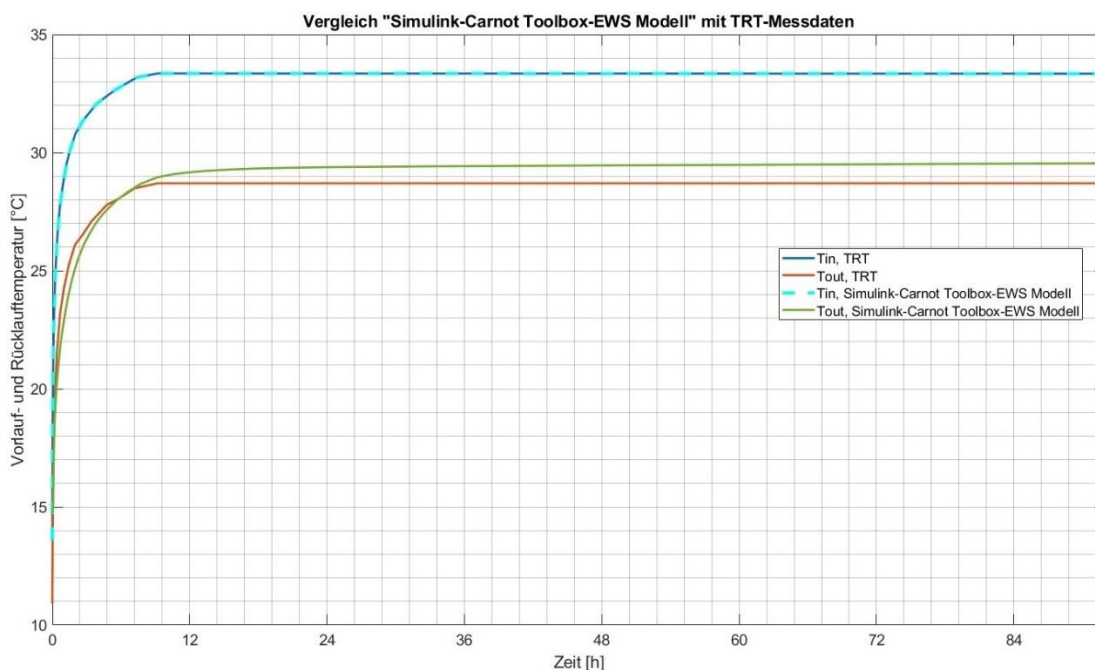


Bild 2-26: Vergleich der Rücklauftemperaturentwicklung des „Simulink-Carnot Toolbox-EWS Modells“ mit TRT-Messdaten

Fazit:

Der Testlauf 17, ein Vergleich mit einer TRT-Messung, zeigt eine Temperaturabweichung von ca. 0,9 K mit einer Leistungsabweichung von ca. 4,5 %.

Während der Durchführung der Testläufe 1-17 kam es zu Beginn zu großen Abweichungen der Temperaturentwicklungen zu den simulierten Daten der verglichenen Simulationsprogramme. Daraufhin wurden am EWS-Modell, der „Simulink-Carnot Toolbox“, die g-Funktionen für die EWS-Felder korrigiert, indem die Polynomstützstellen und Daten angepasst wurden. Außerdem war die Abhängigkeit zum Massenstrom im EWS-Modell fehlerhaft und wurde korrigiert.

Die jetzigen Temperaturabweichungen der Validierung sind für den Zweck der Regeneration von Erdwärmesonden als akzeptabel zu betrachten. Es zeigt sich ein symmetrischer Verlauf der simulierten Kurve der „Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell“ zu den simulierten Daten der verglichenen Simulationsprogramme und damit kann das EWS-Modell als ausreichend validiert angenommen werden.

Testlauf mit zyklischem Wechsel von Wärmeentzugsleistung und -bezugsleistung

Testlauf 18

In diesem Testlauf wurden die gleichen Parameter wie im Testlauf 10 a genutzt. Anders als im Testlauf 10 a, gibt es einen 6-monatigen zyklischen Wechsel von einer Wärmeentzugsleistung von 10 W/m auf eine Wärmebezugsleistung von 10 W/m.

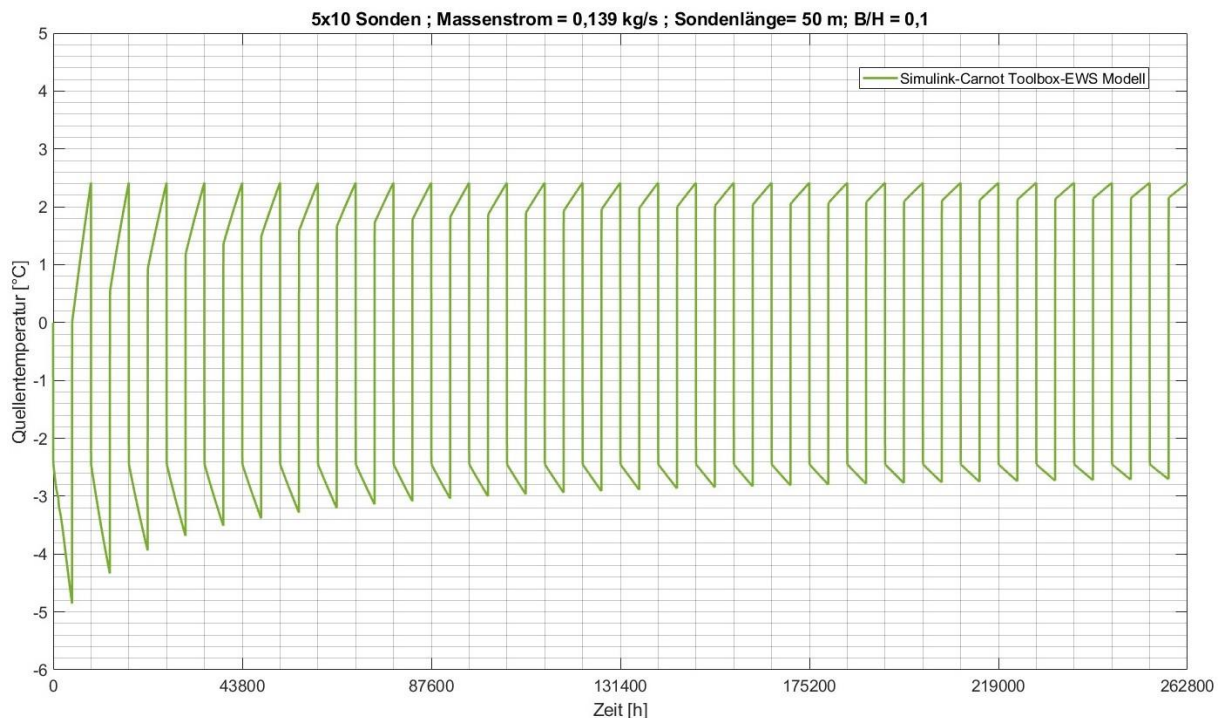


Bild 2-27: Dargestellt sind die durchschnittlichen Temperaturentwicklungen des Fluids der Erdwärmesonden (10x5 Sondenfeld, Abstand von 5 m und jeweils 50 m Länge) mit einem zyklischen Wechsel der Entzugsleistung von 10 W/m auf eine Bezugsleistung von 10 W/m, welche mit dem Simulink-Carnot Toolbox-EWS-Modell berechnet wurden.

Fazit:

Für den Testlauf lagen keine Vergleichswerte von anderen Simulationsprogrammen vor und es wurde rein auf die Sinnmäßigkeit der Verlaufskurve geachtet. Da ein Temperaturgradient von 0 K/m des Erdreichs eingestellt wurde, sollte sich die Kurve gleichmäßig auf eine gewisse Schwankungsbreite, wie in Bild 2-27 dargestellt, einstellen und im Langzeitverhalten keine Erwärmung oder Abkühlung des Sondenfeldes aufweisen. Auch dieser Test hat die Erwartungen an das Simulationstool erfüllt.

3. Zusammenfassung

Das EWS-Modell zeigt das erwartete Verhalten bei Wärmezufuhr und Wärmeentnahme von Erdwärmesondenfeldern.

Die Abweichungen der Energiebilanz beträgt bei konstanter Randbedingung bei Erdwärmesondenfeldern deutlich unter 5 %. Die Messdaten aus 2 unterschiedlichen TRT-Tests werden gut getroffen (Testlauf 17: 4,5 % Abweichung).

Insbesondere das für die nachfolgende Arbeit wichtige Verhalten bei zyklischer Entnahme und Regeneration wird gut abgebildet. Das Modell hält für Erdsondenfelder die Toleranzkriterien ein.

Quellen

- Huber, A.; Schuler, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. ENET-Nr. 9658807/1,1997
 - Huber, A.; Pahud, D. (Dezember 1999): Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder
 - Ochs, F. (2012): CARNOT EWS model - Model for vertical ground heat exchanger. Innsbruck 2012; zu finden im Carnot-Toolbox Verzeichnis: [Path_to_Carnot]\public\library_simulink\Source\Heat_Pump\Ground_Source_Heat_Exchanger\doc\pdf
- Persson T.; Stavset O.; Ramstad R.K.; Alonso M. J.; Lorenz K. (29.09.2016, Update 12.11.2021): Report-Software for modelling and simulation of ground source heating and cooling systems
- CARNOT Toolbox Ver. 6.3, 10/2018 for Matlab/Simulink R2016b, © Solar-Institut Juelich