

Bernd Glück

SIMULATIONSMODELL "ERDWÄRMESONDEN"

**zur wärmetechnischen Beurteilung von
Wärmequellen, Wärmesenken
und Wärme-/Kältespeichern**

2. ERGÄNZUNG: KORBSONDEN

**(Kapillarrohrmatten sind zu einem Zylindermantel
geformt und als Kurzsonde – Länge z. B. 2 m –
vertikal in einem Bohrloch eingegossen)**

2011

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung und Geometrie der Korbsonde	1
2	Wärmetechnische Modellierung der Korbsonde	3
2.1	Teilwärmedurchgangskoeffizient von der Bohrlochwand an das Fluid	3
2.2	Wärmetransport im Rohrsystem des Korbes	6
3	Komplexmodell zur Simulation von Korbsonden	9
	• Randbedingungen	9
	• Verknüpfung der Einzelalgorithmen	9
	• Programmablaufplan	9
	• Komplexprogramm zur Simulation der Korbwärmesonden	11
	• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs	12
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitstemperaturen	14
	• Eingabe zeitlich veränderlicher Sondenleistungen	15
	• Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses	16
	• Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)	17
4	Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen	18
	• Grundlagen für die Programmanwendung	18
	• Laden und Start des Rechenprogramms	18
	• Bearbeitung des Programmlistings	19
5	Beispiele	20
5.1	Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Korb_1)	20
5.2	Kombinierte Wärme-/Kältenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Korb_2)	31
	Literaturverzeichnis	36

Wichtige Hinweise:

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen und Einspeicherung sowie Verarbeitung in elektronischen Systemen, die über die Eigennutzung hinausgehen, sowie für Übersetzungen und Mikroverfilmungen.

Das vorgestellte Simulationsmodell ist als Testfassung zu verstehen. Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

1 Vorbemerkung und Geometrie der Korbsonde

Die Ergänzung basiert auf dem gleichnamigen Hauptbericht [1], der weiterhin in vollem Umfang gilt. In diesem sind die allgemeingültigen Zusammenhänge und das Simulationsmodell detailliert beschrieben, wobei die spezielle Geometrie und das wärmetechnische Modell von U-Rohrsonden die Grundlage bildete. Die Simulation erfolgte für das [Erdreich instationär](#) und für den [Bohrlochquerschnitt mit Verrohrung stationär](#). Als Besonderheit wurde der Bohrlochquerschnitt mit der neu entwickelten, erweiterten Formfaktorenmethode untersucht.

[Ziel der vorliegenden Ergänzung des Simulationsmodells ist es, die Sonde als Korbsonde – bestehend aus einer Kunststoff-Kapillarrohrmatte – auszubilden, stationär zu simulieren und an den bestehenden Algorithmus für die Erdreichsimulation anzupassen. Das Simulationsmodell wird wiederum als kostenlose Software bereitgestellt.](#)

Die geometrische und wärmetechnische Modellierung des Simulationsbereiches wird wie im Hauptbericht [1], Abschnitte 2 und 3 (S. 3 ff.) beibehalten. Die wärmetechnische Modellierung der Bohrung werde dagegen komplett ersetzt. Der Querschnitt durch die Korbsonde ist im Bild 1.1 und der Längsschnitt im Bild 1.2 dargestellt.

Es gelten:

- $2 r_{BL}$ Bohrl Lochdurchmesser
- d_{Korb} Korbdurchmesser (Mitte Kapillarrohrring)
- L_{Korb} Korblänge ($\equiv$ Korbhöhe)
- d_a Außendurchmesser Kapillarrohr
- d_i Innendurchmesser Kapillarrohr
- RA Rohrabstand zwischen zwei Kapillarrohren (Mitte bis Mitte).

Es wird bei dieser relativ kurzen Korbsonde von einem [einheitlichen Füllstoff](#), der flüssig eingebracht wird und anschließend aushärtet, ausgegangen. Er füllt das Bohrloch aus und umschließt lunkerfrei die Kapillarrohrmatte. Die wärmetechnische Verbindung zwischen Bohrlochwand und in der Kapillarrohrmatte strömenden Fluid wird durch κ_{Korb} , das im Abschnitt 2 näher beschrieben wird, quantifiziert.

Um eine annähernd gleiche Massestromaufteilung auf die Kapillarrohre zu erreichen wird eine TICHELMANNsche Rohrführung gewählt.

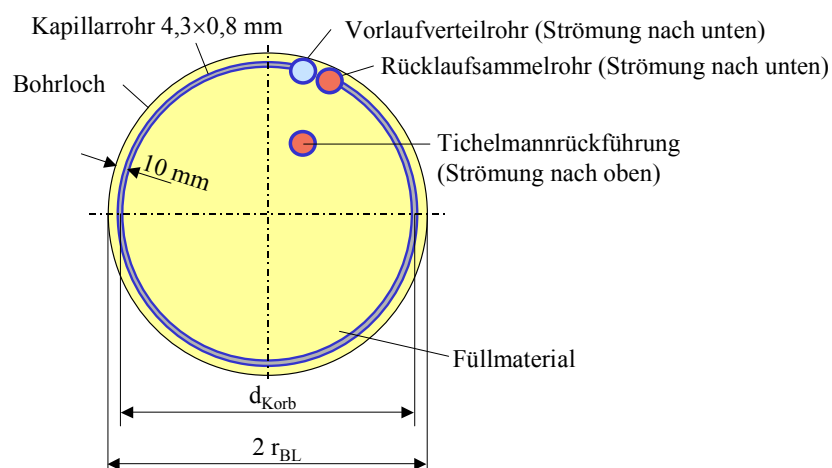


Bild 1.1 Querschnitt durch eine Korbsonde mit dem Bohrl Lochdurchmesser von $2 r_{BL}$

2 Wärmetechnische Modellierung der Korbsonde

2.1 Teilwärmedurchgangskoeffizient von der Bohrlochwand an das Fluid

Der **Wärmestrom** von der Bohrlochwand an das in den Kapillarrohren fließende Fluid stellt eigentlich ein dreidimensionales Wärmeleitproblem dar. Der radiale Wärme fluß in der Füllmasse innerhalb des Kapillarrohrrings wird aber vernachlässigt.

Begründung:

Würden beispielsweise pro 1 m Bohrlänge 50 W übertragen und der vertikale Abstand der Kapillarrohringe betrüge 20 mm, dann folgt pro Ring die Wärmeaufnahme von $\dot{Q} = 1 \text{ W}$. Bei einer Durchflußgeschwindigkeit von $w = 0,1 \text{ m/s}$ ergibt sich der Wärmekapazitätsstrom von

$$\dot{C} = \frac{\pi}{4} d_i^2 w \rho c = \frac{\pi}{4} 0,0027^2 \cdot 0,1 \cdot 1000 \cdot 4200 \frac{\text{W}}{\text{K}} = 2,4 \text{ W/K}.$$

Daraus folgte eine Temperaturerhöhung des Wassers zwischen Ein- und Austritt von

$$\Delta t = \frac{\dot{Q}}{\dot{C}} = \frac{1}{2,4} \text{ K} = 0,4 \text{ K}.$$

Die geringe, maximale Temperaturdifferenz entlang des Kapillarrohrringes rechtfertigt, dass näherungsweise der Wärmetransport von der Bohrlochwand an die Kapillarrohrmatte nur als zweidimensionale Wärmeleitung betrachtet wird, wobei das Temperaturfeld um und zwischen den Kapillarrohren als relevant anzusehen ist. Es gilt allgemein für den Korbabschnitt i

$$\dot{Q}_{\text{Korb},i} = \kappa_{\text{Korb}} (t_{\text{BL},i} - t_{\text{Fluid},i}) A_{\text{KM},i} \quad (2.1)$$

mit

κ_{Korb} Teilwärmedurchgangskoeffizient von Bohrlochwand bis Fluid im Kapillarrohr

$t_{\text{BL},i}$ Temperatur an der Bohrlochwand im Vertikalabschnitt i

$t_{\text{Fluid},i}$ Flüssigkeitstemperatur im Kapillarrohr im Vertikalabschnitt i

$A_{\text{KM},i}$ Korbfläche im Vertikalabschnitt i ($A_{\text{KM},i} \equiv A_{\text{KM}} = \pi d_{\text{Korb}} \Delta h$).

Der Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_{Korb} wird von zahlreichen Parametern beeinflusst. Einige seien nachfolgend genannt:

- **Dicke der Kapillarrohre**

Es wird von dem sogenannten dicken PP-Kapillar der Fa. Clina, Berlin ausgegangen. Die Abmessungen betragen $4,3 \times 0,8 \text{ mm}$ ($d_a = 4,3 \text{ mm}$, $d_i = 2,7 \text{ mm}$). Für die Wärmeleitfähigkeit gilt: $0,21 \text{ W/(m K)}$.

- **Abstand der Kapillarrohre**

Obwohl theoretisch jeder Abstand realisierbar ist, wird bei der weiteren Betrachtung $RA = 20 \text{ mm}$ oder $RA = 30 \text{ mm}$ zugrunde gelegt.

- **Abstand des Kapillarringes von der Bohrlochwand**

Es wird von 10 mm ausgegangen. Der Zuschnitt der Kapillarrohrmatte muss so erfolgen, dass für der Durchmesser des Ringes

$$d_{\text{Korb}} = 2 r_{\text{BL}} - 0,020 \text{ m}$$

beträgt. Wenn der Korb mit fixierten Vor- und Rücklaufleitungen in das Bohrloch eingebracht wird,

entsteht durch die Eigenspannung der Kapillarrohre die runde Form. Das Eingießen des flüssigen Füllmaterials führt nach dem Aushärten zur stabilen, zylindrischen Endform.

- **Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes**

Die Wärmeleitfähigkeit ist in starkem Maße materialabhängig. Im Weiteren wird $\lambda_{\text{Füllstoff}} = 1 \text{ W/(m K)}$ angenommen.

- **Fluid in den Rohren**

Von Einfluss ist das Durchflussmedium (es werden Wasser und Tyfocor L 40 % angenommen), die Durchflussgeschwindigkeit (es werden 0,1 und 0,2 m/s betrachtet) und die Fluidtemperatur (die Temperatur betrage 5 °C).

Schlussfolgerung

Um den Teilwärmedurchgangskoeffizienten näherungsweise bestimmen zu können, wird das bestehende Simulationsmodell für "Homogene Platten mit eingeformter Kunststoff-Kapillarrohrmatte" verwendet.

Es ist in LowEx-Bericht, S. 62ff. vorgestellt. Der Bericht ist kostenfrei downloadbar unter: <http://berndglueck.de/lowex.php>. Dazu kann ebenfalls kostenfrei das Programm "Homogen" mit einem Testbeispiel als zip-Datei geladen werden.

Dieses Programm ist zwar für eine planparallele Platte konzipiert, wird aber in diesem Fall auch näherungsweise verwendet.

Hauptprogramm
Thermisch aktives Bauteil
Homogene Platte mit stationärem Betrieb

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Gluck (Version 1 2007)

Berechnung ist beendet! F:\SD\FE_TGA\Erdwärmesonden\Beispiel01

Betriebsweise des Bauteils als:
☒ Fußbodenheizung im Raum a ☐ Deckenheizung im Raum i ☐ Wandheizung oder -kühlung im Raum i ☐ Umweltabsorber im "Raum a"
☐ Fußbodenkühlung im Raum a ☐ Deckenkühlung im Raum i ☐ Innenwand ☐ Außenwand

Die Richtigkeit und die Plausibilität der Eingaben obliegt der Verantwortung des Nutzers. Es wird durch eine programminterne Prüfung nur auf einige grobe Eingabefehler hingewiesen.

Raum a $\lambda_{a,5}$ 1000000 W/(m²K) t_a 15 °C
 $\lambda_{a,4}$ $\delta_{a,4}$
 $\lambda_{a,3}$ $\delta_{a,3}$
 $\lambda_{a,2}$ $\delta_{a,2}$
 $\lambda_{a,1}$ $\delta_{a,1}$
 Wärmeleitschicht L λ_L δ_L
 Rohrschicht λ Rohr t_F Δa Δi
 Wärmeleitschicht K λ_K δ_K
 $\lambda_{i,1}$ $\delta_{i,1}$
 $\lambda_{i,2}$ $\delta_{i,2}$
 $\lambda_{i,3}$ $\delta_{i,3}$
 $\lambda_{i,4}$ $\delta_{i,4}$
 $\lambda_{i,5}$ $\delta_{i,5}$

Raum i $\lambda_{i,5}$ 0,0001 W/(m²K) t_i 15 °C

Durchflussmedium
 Wasser ☒ Tyfocor L: 40 % 50 %
 Mittlere Fluidtemperatur: $(t_{\text{Vorlauf}} + t_{\text{Rücklauf}}) / 2$
 min. 5 °C max. 5 °C
 Durchflussgeschwindigkeit 0,1 m/s

Rohrdaten
 Außendurchmesser 4,3 mm
 Wanddicke 0,8 mm
 Wärmeleitfähigkeit 0,21 W/(m K)
 Dicke eines Luftspaltes 0 mm
 Rohrabstand 30 mm
 Registerlänge 1 m

Eingabebereich
 Eine detaillierte Beschreibung der Eingabewerte ist der Anwenderinformation zu entnehmen!
 Die gelb gekennzeichneten Eingabefelder sind unbedingt mit sinnvollen Daten zu füllen!
 Werden $\alpha_{a,i}$ und $\alpha_{i,i}$ vorgegeben (> 0), dann gelten diese verbindlich, ansonsten erfolgt eine interne Berechnung gemäß Basisdaten nach Abschnitt 2.1.4. Bei Betriebsweise "Umweltabsorber" ist $\alpha_{a,i}$ unbedingt - passend zu t_a - anzugeben!
 t_a und t_i sind Raumtemperaturen oder Außentemperaturen. Bei der Betriebsweise "Umweltabsorber" ist die Sonnenlufttemperatur nach Abschnitt 2.5.1 einzugeben.
 Ist die maximale Vorlauftemperatur "Blank" (auch kein Leerzeichen), so erfolgt nur die Berechnung für die minimale Fluidtemperatur. Ansonsten wird eine Tabelle erzeugt.
 Nicht vorhandene Deckschichten haben die Dicke = 0 und Lambda = 1.
 Nicht vorhandene Wärmeleitschichten haben die Dicke = 0 und Lambda = Lambda der Rohrschicht!
 Die Dicke des Luftspaltes sollte möglichst 0 sein.

Abläufe:
 1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
 2. Daten aus Datei laden oder Neugebilde vornehmen!
 3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
 4. DATENSPEICHERUNG drücken!
 5. BERECHNUNG, DRUCK oder DIAGRAMM drücken!
 6. Die Ergebnisse der letzten Berechnung (höchste Fluidtemperatur) sind nebenstehend eintragen.
 7. Die Leistungstabelle ist über DRUCK und die Kennlinie über DIAGRAMM erreichbar.

Ergebnisse: Temperaturen in °C
Oberfläche Raum a
 Mittelwert 15 Extremwerte 15 15
Oberfläche Raum i
 Mittelwert 11,7 Extremwerte 11,7 11,7
 Rohrregisterebene Fluidtemperatur 5
 Mittelwert 11,7 Rohrwandtemperatur 10,5

Ergebnisse: Leistungen in W/m²
Wärmestromdichten
 Raum a -328,5 Summe -328,5
 Raum i 0

Wärmeübergangskoeffizienten in W/(m²K)
 Alpha_a 1000000 Alpha_Rohr 577,7
 Alpha_i 0

STARTEN DATEI LADEN DATENSPEICHERUNG **BERECHNUNG** DRUCK DIAGRAMM BEENDEN

Bild 2.1 Eingabemaske für einen Berechnungsfall des Teilwärmedurchgangskoeffizienten

Die Erläuterungen zur Eingabe erfolgen anschließend im Rechnerausdruck:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\ERDWÄRMESONDEN\BEISPIELO\

Thermisch aktives Bauteil: Homogene Platte mit integriertem Rohrregister

Fußbodenheizung für den oberen Raum a mit Zusatzwärmeabgabe in den unteren Raum i

Eingabedaten für die Mehrschichtplatte und ihre wärmetechnische Umgebung:

Raumtemperatur: 15,0 °C

Fußboden-Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 1000000,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ist vorgegeben.

Raumtemperatur (unterer Raum): 15,0 °C

Wärmeübergangskoeffizient (Deckenunterseite) $\alpha_i = 0,0001 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ist vorgegeben.

Äußere (bzw. obere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
5	1,000	0,0
4	1,000	0,0
3	1,000	0,0
2	1,000	0,0
1	1,000	0,0

Anmerkung:

Raumtemperatur = 15 °C und Fluidtemperatur = 5 °C, d. h. das treibende Temperaturpotenzial beträgt 10 K. Somit erhält man den gesuchten Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_{Korb} zahlenmäßig aus der Wärmestromdichte $q_a/10$.

$\alpha_a = 1000000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bedeutet praktisch die direkte wärmetechnische Ankopplung der homogenen Platte an die Bohrlochwand.

$\alpha_i = 0,0001 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bedeutet keinen Wärmetransport der homogenen Platte nach unten, d. h. in das Innere des Kapillarrohr rings.

Rohrschicht RS (zweiteilig) und zusätzliche Wärmeleitschichten L und K mit zweidimensionaler Wärmeleitung:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
L	1,000	0,0
RS	1,000	10,0
RS	1,000	40,0
K	1,000	0,0

Anmerkung (siehe Grafik im Bild 2.1):

Δ_a Dicke der Rohrschicht nach außen gemäß Abschnitt 1: 10 mm

Δ_i Dicke der Rohrschicht nach innen: 40 mm

Diese Festlegungen erfolgen nach pragmatischen Gesichtspunkten.

Δ_a ist durch die notwendige Toleranz bei der Korb einbringung gegeben, Δ_i beeinflusst die Temperaturverteilung zwischen den Kapillarrohren.

Da die "ebene" Platte in diesem Fall in Wirklichkeit eine Zylinderschale darstellt, ist ohnehin nur eine näherungsweise Berechnung von κ_{Korb} möglich.

Deckschichten im Sinne der Grafik gemäß Bild 2.1 existieren nicht.

Innere (bzw. untere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
1	1,000	0,0
2	1,000	0,0
3	1,000	0,0
4	1,000	0,0
5	1,000	0,0

Durchflussmedium und Rohrdaten:

da	Dicke	di	lamR	Spalt	a	L	Medium	w	mittlere Medientemperatur	
mm	mm	mm	W/(m K)	mm	mm	m	-	m/s	min. in °C	max. in °C
4,3	0,80	2,7	0,210	0,0	30,0	1,0	TL-40%	0,10	5,0	5,0

Legende: da Rohraußendurchmesser
 di Rohrinne Durchmesser
 Dicke Rohrwanddicke
 lamR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
 Spalt Luftspaltdicke um das Rohr
 a Rohrabstand
 L Rohrregisterlänge
 w Durchflussgeschwindigkeit

Anmerkung:

a stellt den Abstand RA der Kapillarrohre dar. L verkörpert die Rohrlänge eines Ringes und ist nur zur Berechnung des fluidseitigen Wärmeübergangskoeffizienten α_{Rohr} von Interesse. Die Durchflussgeschwindigkeit w wird variantenabhängig angesetzt. Analoges gilt für das Durchflussmedium. Hier kommt zum Beispiel Tyfocor L (40 Vol.-%) zum Einsatz.

Berechnungsergebnisse:

Temperaturen °C							Alphawerte W/ (m²K)			Leistungen W/m²				
tF	tR	tRm	tma	Extrema	tmi	Extrema	außen	innen	Rohr	qa	qi	q		
5,0	10,5	11,7	15,0	15,0	15,0	11,7	11,7	11,7	10^6	0,0	578	-328,5	-0,0	-328,5

Legende: tF mittlere Medientemperatur (Fluidtemperatur)
 tR Rohraußentemperatur
 tRm mittlere Temperatur in der Registerebene
 tma mittlere Temperatur an der äußeren Oberfläche
 Extrema Extremtemperaturen (min. bzw. max.) an der äußeren Oberfläche
 tmi mittlere Temperatur an der inneren Oberfläche
 Extrema Extremtemperaturen (min. bzw. max.) an der inneren Oberfläche

Hinweis 1: Bei $q_a < 0$ und $q_i < 0$ geht der Wärmestrom zum Bauteil.

Hinweis 2: Entstehen aufgrund der Umgebungstemperaturen t_a und t_i sowie der Fluidtemperatur t_F Wärmeströme, die der gewählten Betriebsweise widersprechen, so wird dies programmiert durch entsprechende Wahl der Wärmeübergangskoeffizienten beachtet (z. B. wenn bei gewählter Betriebsweise 'Fußbodenheizung' diese bei bestimmten Temperaturen als Fußbodenkühlung arbeitet).

Anmerkung:

Die extrem unterschiedlichen α_a und α_i bewirken die äußere große Wärmestromdichte an die Kapillarrohre im Korb und eine Wärmestromdichte = 0 in das Ringinnere.

Damit beträgt der Teilwärmedurchgangskoeffizient $\kappa_{\text{Korb}} = 33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Analoge Simulationsvarianten liefern die Werte in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1 Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_{Korb}

		Wasser	Tyfocor L 40 %
RA = 30 mm	w = 0,2 m/s	36 W/(m²K)	34 W/(m²K)
	w = 0,1 m/s	35 W/(m²K)	33 W/(m²K)
RA = 20 mm	w = 0,2 m/s	48 W/(m²K)	46 W/(m²K)
	w = 0,1 m/s	48 W/(m²K)	45 W/(m²K)

Maßgebliche Unterschiede bezüglich des Teilwärmedurchgangskoeffizienten entstehen nur durch den Abstand RA der Kapillarrohre innerhalb des Korbes. Die Wärmeaufnahme durch die vertikalen Verteil- und Sammelrohre könnte am einfachsten durch einen Zuschlag von beispielsweise 10 % auf κ_{Korb} berücksichtigt werden. In Anbetracht der bestehenden Unwägbarkeiten wird aber empfohlen die Wärmeaufnahme der Vertikalrohre nicht zu betrachten und somit als zusätzliche "Reserve" zu belassen.

2.2 Wärmetransport im Rohrsystem des Korbes

Der Korb mit Verteil- und Sammelrohren ist vertikal in i-Richtung orientiert (siehe Bild 1.2). Die tiefste Stelle des Korbes liegt bei L_{Sonde} und seine Oberkante bei $L_{\text{Sonde}} - L_{\text{Korb}}$. Mit der Abschnittshöhe Δh , die aus den Eingaben L_{Sim} und i_{max} zu

$$\Delta h = L_{\text{Sim}} / i_{\text{max}}. \quad (2.2)$$

folgt, wird im Rechenprogramm i_{Sonde} ganzzahlig ermittelt

$$i_{\text{Sonde}} = \text{Int}(L_{\text{Sonde}} / \Delta h). \quad (2.3)$$

Analog erfolgt die Festlegung für die Korboberseite

$$i_{\text{Sondeanfang}} = \text{Int}((L_{\text{Sonde}} - L_{\text{Korb}}) / \Delta h + 1). \quad (2.4)$$

Selbstverständlich ist es vorteilhaft, wenn sich Δh so ergibt, dass sowohl die Tiefen der Erdschichten als auch die Korblänge möglichst real und ganzzahlig wiedergegeben werden.

Die **Lage der Korbabschnitte** i und die **Zuordnung der Temperaturen** folgen aus Bild 2.2 und der zugehörigen Bildunterschrift. Die abschnittswisen **Wärmeströme an die Korbabschnitte** sind grundsätzlich aus den Fluid- und Bohrlochwandtemperaturen unter Ansatz des Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_{Korb} nach Gl. (2.1) bestimmbar.

Hinweis:

Die im Bild 2.2 verwendete Eintrittstemperatur $t_{\text{ein_itera}}$ gilt für den betrachteten Zeitpunkt. Sie folgt direkt aus der **zeitabhängigen Eintrittstemperatur** $t_{\text{SIM}}(\text{BS})$ für die Betriebsstunde BS oder stellt eine iterativ zu bestimmende Temperatur dar, die den **zeitabhängig geforderten Wärmeentzug** $\dot{Q}_{\text{SIM}}(\text{BS})$ aus der Erdwärmesonde realisiert. Letzteres ist beispielsweise der Fall, wenn eine Wärmepumpe diesen benötigt. Welcher Fall relevant ist, wird durch die Eingabe gesteuert.

Stets vorgegeben ist der **Volumenstrom** $\dot{V}_{\text{SIM}}(\text{BS})$.

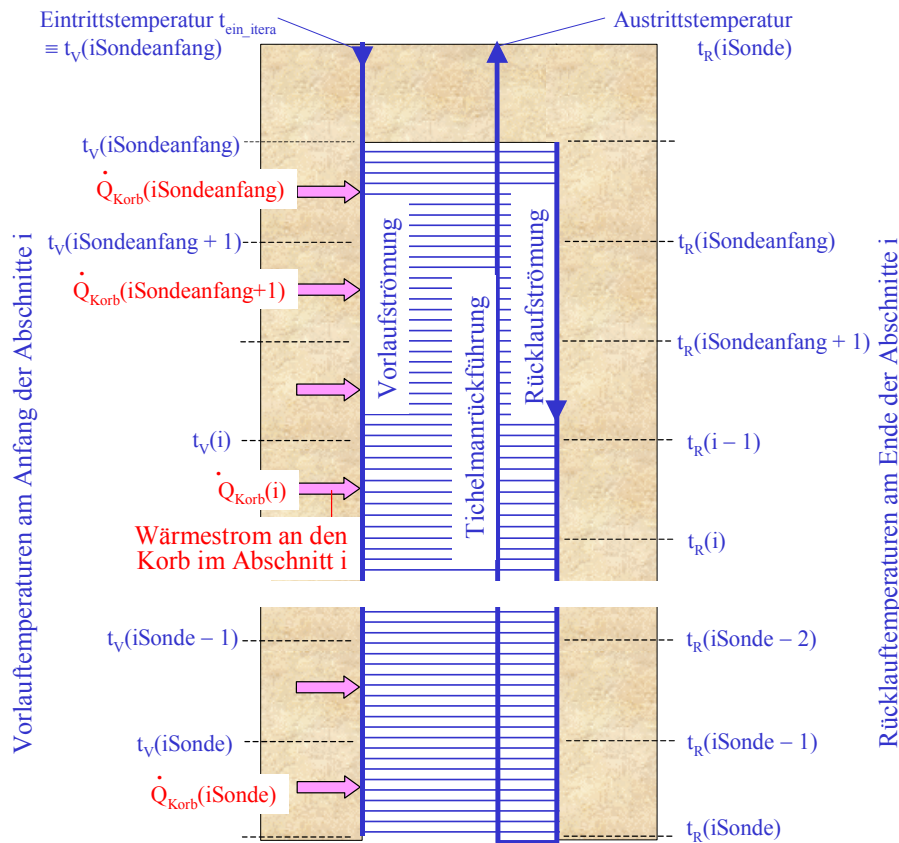


Bild 2.2 Vor- und Rücklaufbohrleitung mit Kennzeichnung der Abschnitte i und den zugehörigen Flüssigkeitstemperaturen sowie Wärmeströmen. Die Flüssigkeitstemperaturen werden im Vorlauf dem jeweiligen Abschnittsbeginn, die Rücklauftemperaturen jeweils dem Abschnittsende zugeordnet. Die Bohrlochtemperaturen gelten näherungsweise in der jeweiligen Abschnittsmitte.

Mit Kenntnis des Volumenstromes für die gesamte Korbsonde ergibt sich der Wärmekapazitätsstrom

$$\dot{C} = \dot{V} \rho c. \quad (2.5)$$

In jedem aktiven Abschnitt i beträgt der Teilstrom durch die Kapillarrohre des Abschnittes

$$\dot{C}_{\text{Abschnitt}} = \frac{\dot{C}}{i_{\text{Sonde}} - i_{\text{Sondeanfang}} + 1}. \quad (2.6)$$

Damit nimmt der Wärmekapazitätsstrom in der Vorlaufleitung von Abschnitt zu Abschnitt ab und in der Rücklaufleitung nimmt er – beginnend von null – entsprechend zu. So gilt am Ende eines Rücklaufabschnittes i :

$$\dot{C}_R(i) = \dot{C}_{\text{Abschnitt}} + \dot{C}_R(i-1). \quad (2.7)$$

Die schrittweise Abarbeitung erfolgt ausgehend von $i = i_{\text{Sondeanfang}}$:

- Vorlauftemperatur
Näherungsweise wird in der Vorlaufleitung keine Temperaturänderung angenommen, da die Wärmezufuhr an das Verteilrohr null sei.

$$t_V = t_{\text{ein_itera}} = \text{const} \quad (2.8)$$

- Berechnung des Wärmestroms $\dot{Q}_{\text{Korb}}(i)$ nach der Gl. (2.1), wobei die mittlere Fluidtemperatur im Kapillarrohr wegen der geringen Temperaturänderung beim Durchfluss vereinfachend durch die Vorlauftemperatur t_V ersetzt wird.

$$\dot{Q}_{\text{Korb}}(i) = \kappa_{\text{Korb}} (t_{\text{BL}}(i) - t_V) A_{\text{KM}} \quad (2.9)$$

- Berechnung der Rücklauftemperatur aus den Kapillarrohren des Abschnittes i

$$t_R^* = t_V + \frac{\dot{Q}_{\text{Korb}}(i)}{\dot{C}_{\text{Abschnitt}}} \quad (2.10)$$

- Berechnung der Rücklauftemperatur am Ende des Abschnittes i

$$t_R(i) = \frac{\dot{C}_R(i-1) t_R(i-1) + \dot{C}_{\text{Abschnitt}} t_R^*}{\dot{C}_R(i)} \quad (2.11)$$

Der vorgestellte Berechnungsgang wird solange wiederholt bis $i = i_{\text{Sonde}}$ erreicht ist. Die Wärmeströme werden aufaddiert.

Wenn statt der Flüssigkeitseintrittstemperatur $t_{\text{SIM}}(\text{BS})$ die Leistung der Erdwärmesonde $\dot{Q}_{\text{SIM}}(\text{BS})$ vorgegeben ist, muss – wie im Hinweis auf Seite 7 bereits angedeutet – eine Anpassung durch wiederholende Berechnungen des vorgestellten Ablaufs mit gezielt veränderter Eintrittstemperatur $t_{\text{ein_itera}}$ erfolgen. Die Strategie zur Anpassung sowie Details des Ablaufes sind dem Programmlisting zu entnehmen.

3 Komplexmodell zur Simulation von Korberdwärmesonden

Als visuelle Grundlage dient Bild 1.2. Die meisten Abschnitte und Aussagen können vom Hauptbericht [1] übernommen werden. Sie finden der Vollständigkeit Erwähnung, Ergänzungen werden komplett wiedergegeben.

- Die **Randbedingungen** sind im Hauptbericht [1], Abschnitt 6.1 (S. 38 ff.) fixiert und gelten weiterhin.
- Für die **Verknüpfung der Einzelalgorithmen** – instationäre Simulation des Erdreiches und stationäre Simulation im Bohrloch – zum Gesamtsimulationsmodell ist wiederum der Hauptbericht [1], Abschnitt 6.2 (S. 41 ff.) voll gültig. Dies betrifft grundsätzlich auch die Aussagen zur iterativen Einpassung der vorgegebenen Sondenleistung. Eine Vereinfachung ist bei der Variante – Vorgabe der Sondeneintrittstemperatur – aufgrund der speziellen Fluidtemperaturannahme im Korb gegeben. Die Auswahl wird durch die entsprechende Eingabe getroffen. Für den Zusammenhang zwischen Bohrlochwandtemperatur $t_{BL,i}$ und der Erdreichtemperatur in der Mitte des ersten Kreisrings $t_{i,k=1}$ ändert sich jedoch die wärmetechnische Beziehung (Hauptbericht [1]: Gl. (6.4)) entsprechend der jetzigen Geometrie zu:

$$t_{BL,i} = t_{i,k=1} - \frac{\ln \frac{r_{k=1}}{r_{BL}}}{2 \pi \lambda_{Feld_{i,k}} \Delta h} \dot{Q}_{Korb} (i) . \quad (3.1)$$

Diese Temperatur gilt dann für den folgenden Zeitschritt, sodass man mit der Anpassung grundsätzlich einen Zeitschritt nacheilt.

Um **numerische Schwingungen** zu vermeiden, wird zur **Dämpfung** nur die Hälfte der Änderung weitergegeben. Damit verzögert sich die genaue Anpassung der Bohrlochtemperatur um weitere Zeitschritte. Bei durchgehendem Sondenbetrieb ist diese Einschwingphase für den gesamten Simulationszeitraum bedeutungslos. Problematisch ist das Vorgehen aber bei **intermittierendem Sondenbetrieb**, da z. B. bei einer Zeitschrittweite von 10 Minuten und einem Sondenbetriebsrhythmus von einer Stunde nur sechs Anpassungen möglich sind. Entscheidend ist dabei stets die Wahl der Bohrlochwandtemperatur beim Sondenbetriebsstart. Die Auswertung zahlreicher Proberechnungen mit konstanter Sondenleistung während der Betriebsphasen – wie sie annähernd bei einer taktenden Wärmepumpe gefordert wird – ergab, dass es meistens vorteilhaft ist, wenn man die letzte verwendete Bohrlochtemperatur beim Start der neuen Betriebsphase unverändert wiederverwendet. Bei langen Betriebspausen – z. B. einer Sommerpause – können die nachfolgenden ersten Betriebsstunden jedoch zu einem fehlerbehafteten Temperaturfeld in Sondennähe führen. Generell bietet die Schnittstelle $t_{BL,i}$ noch Möglichkeiten für verbesserte Approximationen.

Die **Wärmebilanzen an den Rändern** des Simulationsgebietes und die **Speicherwärme** im Simulationsgebiet werden analog im Hauptbericht erfasst, wobei lediglich der Wärmestrom an der Bohrlochwand durch $\dot{Q}_{Korb} (i)$ definiert ist und ober- und unterhalb des Sondenkorbes die Bohrlochwand als adiabat angenommen wird.

- Der **Programmablaufplan** entspricht im Wesentlichen dem des Hauptberichtes [1]. Er wird im Folgenden komplett wiedergegeben.

Eingabe gemäß Maske: Hauptprogramm

- Geometrie der Erdwärmesonde und des Simulationsgebietes mit Diskretisierung
- Dicke und Stoffwerte der Erdschichten
- Rohr- und Flüssigkeitsdaten; Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_{Korb}
- Bedingungen des Sondenbetriebes (evtl. konstante Eintrittstemperatur oder konstante Wärmeleistung; evtl. konstanter Volumendurchfluss); unterbleiben die genannten Eingaben wird auf Zeitfunktionen für diese Eingabegrößen in gesonderten Eingabemasken zurückgegriffen
- Vorgabe für die Simulationsanpassung (Eintrittstemperatur oder Leistung)
- Anzahl der Simulationsstunden
- Randbedingung an der Erdoberfläche (Konstanttemperatur oder Sonnenlufttemperatur aus TRY)
- Konstante Sohlentemperatur in der Tiefe des Simulationsgebietes
- Eventuelle Eingabe der Erdreichtemperaturverteilung am Ende einer früheren Simulation

Eingabe gemäß Maske: Flüssigkeitseintrittstemperaturen

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für die vorhandene Flüssigkeitseintrittstemperatur (Vorlaufeintritt) benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist und die Anpassung der Flüssigkeitseintrittstemperatur erfüllt werden soll (Anpass = 1).

Eingabe gemäß Maske: Sondenleistung

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für die geforderte Wärmeleistung des Sondenkorbes benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist und die Anpassung an die geforderte Leistung erfüllt werden soll (Anpass = 2).

Eingabe gemäß Maske: Flüssigkeitsdurchfluss

- Für jeden Monat (Januar bis Dezember) wird ein repräsentativer Tag mit 24 Stundenwerten für den Flüssigkeitsdurchfluss des Sondenkorbes benannt
- Eingabe ist nur erforderlich, wenn der Konstantwert in der Hauptmaske nicht ausgefüllt ist.

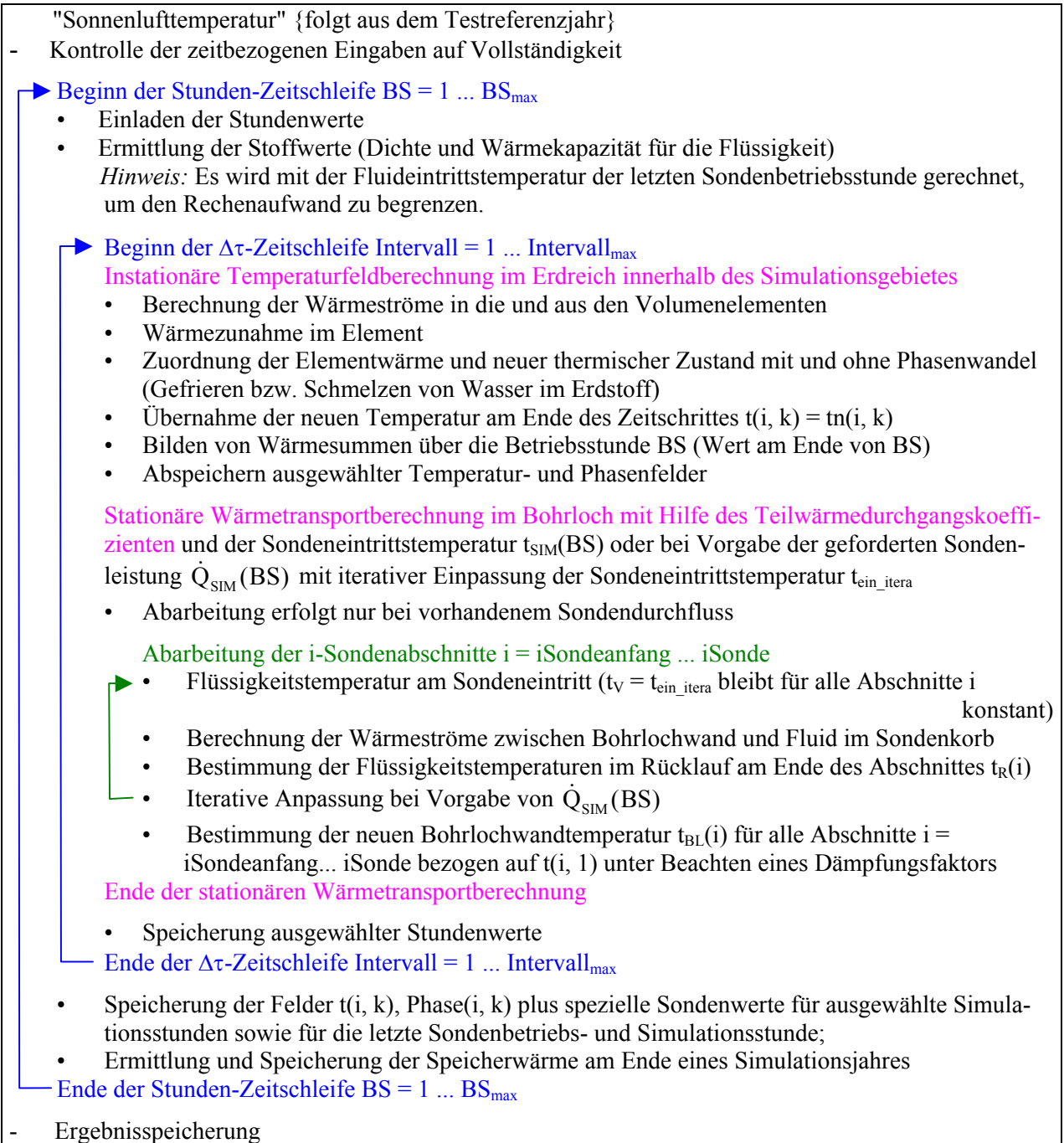
Basisberechnungen zur Simulationsvorbereitung

- Aufbau des Geometriegitters mit den Laufvariablen i und k sowie den Größen Δh , $r(1) \dots r(k_{\text{max}})$
- Berechnung der Elementvolumina (Hohlzylinderringe)
- Zuordnung der Sondenlänge, der Korbgröße sowie der Erdschichten $\text{Sch} = 1 \dots \text{Sch}_{\text{max}}$ zum Gitter
- Vorabberechnung konstanter Größen für die spätere elementweise Wärmestromermittlung
- Zuordnung der Schichtwerte an die Volumenelemente
- Ermittlung der zulässigen Zeitschrittweite $\Delta\tau$ unter Beachten des Stabilitätskriteriums und eines ganzzahligen Teilungsfaktors Intervallmax für 3600 s ($\text{Intervallmax} \times \Delta\tau = 3600$); als maximale Zeitschrittweite gilt $\Delta\tau = 600$ s
- Vorabberechnung von Größen zum Sondenkorb
- Füllung der Starttemperatur- und Phasenzustandsfelder (Gitterwerte) anhand eines Algorithmus ausgehend von der Sohlentemperatur oder aber mit einem bekannten Temperaturfeld einer früheren Simulation einschließlich der Vorgabe der Flüssigkeitseintrittstemperatur $t_{\text{ein_itera}}$
- Auswahl charakteristischer Gitterpunkte für die Ergebnisdarstellung

Simulation

- Aufbau von Zeitverläufen für alle Betriebsstunden $\text{BS} = 1 \dots \text{BS}_{\text{max}}$ aus der Eingabe von konstanten Werten oder monatlich geltenden Mustertagen, die die Betriebsbedingungen benennen:
 "Durchfluss" {Steuert gleichzeitig die Sondensimulation! (Durchfluss = 0, Bohrlochwand auch im Korbereich adiabatisch)}
 "Eintrittstemperatur" $\{t_{\text{SIM}}(\text{BS})\}$ oder "Sondenleistung" $\dot{Q}_{\text{SIM}}(\text{BS})$

Fortsetzung der Simulation siehe nächste Seite

**Ausgabedruck**

- alle Eingaben sowie Ergebnisse des letzten Sondenbetriebs und der Monats-/Jahressummen
- Temperaturen der Sondenabschnitte sowie Temperatur- und Phasenfelder der Volumenelemente zu ausgewählten Zeiten für maximal 10 Jahre

Ausgabegrafik

- Temperaturen und Leistungen längs der Sonde zu ausgewählten Zeiten für maximal 10 Jahre
- Temperatur- und Leistungsverläufe der Sonde sowie Temperaturverläufe im Sondenumfeld über die gesamte Simulationszeit

Die Zählweise der Betriebsstunden und der Intervalle ist aus dem Hauptbericht [1], Bild 6.3, Seite 45 ersichtlich. Daten am Ende einer Betriebsstunde entsprechen in Wirklichkeit denen dem Intervall_{max} zugeordneten Werten (z. B. Temperaturen, Leistungen usw.) bzw. den bis dahin innerhalb der Stunde gebildeten Summengrößen wie beispielsweise die Wärme an den Flüssigkeitsstrom).

- Auch für das **Komplexprogramm zur Simulation der Korbwärmesonden** bleibt grundsätzlich

Hauptbericht [1], Abschnitt 6.4 (S. 45 ff.) gültig. Änderungen treten lediglich in der Hauptoberfläche (Maske 1) auf, die durch die Geometrie der Korbsonde bewirkt werden (Bild 3.1).

Um langes Suchen zu vermeiden wird die Eingabe komplett beschrieben.

Korberdwärmesonde - Hauptprogramm

Sondensimulation für Korbsonden aus Kapillarrohren (Sondervariante)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V12011)

Geometriedaten: Bohrlochradius r_{BL} 0 m, Korblänge L_{Korb} 0 m, Länge L_{Sonde} 0 m, Länge L_{Sim} 0 m, i_{max} 0, Simulationsradius r_{EB} 0 m, k_{max} 0

Schichtdaten:

Schicht	Rho kg/m^3	Lambda $W/(m \cdot K)$		c $J/(kg \cdot K)$		rS kJ/kg	TSch m
		fest	flüssig	fest	flüssig		
Sch = 1	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 2	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 3	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 7	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 8	0	0	0	0	0	0	0

Korb- und Sondendaten: Korbdurchmesser d_{Korb} 0 mm, Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_{Korb} 0 $W/(m^2 \cdot K)$, Rohrinneindurchmesser d_i 0 mm, Kapillarrohrabstand RA 0 mm

Durchflussmedium: ☐ Tyfocor L 40 % ☐ Tyfocor L 25 % ☐ Wasser

Eintrittstemperatur °C oder Leistung W Volumenstrom l/h

Die Angaben gelten für die gesamte Simulationszeit. Sind diese Felder "blank", dann ist die Eingabe unter ZEITVERLAUF vorzunehmen. Die Leistung und der Volumenstrom beziehen sich auf die komplette Korbsonde.

Die Simulationsanpassung soll die gewünschte { ☐ Eintrittstemperatur oder ☐ Leistung } sicherstellen.

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus DATEI LADEN oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. EINGABESPEICHERUNG drücken! Es erfolgt eine Grobkontrolle.
5. Über ZEITVERLAUFE Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

Daten zum Simulationsablauf: Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde, Maximale Anzahl der Simulationsstunden 8760, Konstante Erdoberflächentemperatur °C, Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei): , Unbeeinflusste Sohlentemperatur -273 °C, Evtl. Eingabe der Erdoberflächentemperaturverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):

Bei Eingabe von "blank" wird die vertikale Temperaturverteilung für alle i ausgehend von der Sohlentemperatur bei i_{max} mit der Temperaturreduzierung von 0,03 K/m nach oben ermittelt. $t(i, k)$ gilt für alle Kreistränge k.

Buttons: STARTEN, DATEI LADEN, EINGABESPEICHERUNG, BERECHNUNG, DRUCK, DIAGRAMM-SONDE, T-/Phase-TABELLE, DIAGRAMM-UMFELD, BEENDEN

Zeitverläufe > DURCHFLUSS, EINTRITTS-TEMPERATUR, SONDENLEISTUNG

Bild 3.1 Hauptoberfläche (Maske 1) des Rechenprogramms "Korberdwärmesonde" mit der Startfüllung von Daten, die durch das Laden einer bereits gefüllten Datei oder durch Einzeleingaben bzw. Korrekturen überschreibbar ist

• Hauptprogrammeingabe und Steuerung des Programmablaufs (Bild 3.1)

Die nachfolgenden Bezeichnungen entsprechen den programminternen Namen. Sie dürften aber leicht mit den Maskenbezeichnungen erklärlich sein.

Hauptgeometriedaten (siehe Bilder 1.1 und 1.2 oder Bildschirmmaske 3.1):		
r_{BL}	m	Bohrlochradius
L_{Korb}	m	Korblänge (axiale Sondengröße)
L_{Sonde}	m	Sondenlänge (Tiefe bis zum Fußpunkt der Korbsonde)
L_{Sim}	m	Tiefe bis zur Sohle des Simulationsgebietes (simulierter Erdröhrzylinder)
r_{EB}	m	Simulationsradius (simulierter Erdröhrzylinder)
i_{max}	-	Anzahl der vertikalen Unterteilungen des Simulationsgebietes
k_{max}	-	Anzahl der horizontalen Unterteilungen des Simulationsgebietes (Anzahl der konzentrischen Kreistränge)

Schichtdaten (siehe Bild 1.2 oder Bildschirmmaske 3.1):		
Rho(Sch)	kg/m ³	Dichte des Erdstoffes in der Schicht Sch (Es wird kein Unterschied zwischen gefrorenem und ungefrorenem Boden getroffen.)
lam(Sch)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Bodens
lamfl(Sch)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Bodens (fl für flüssiges Wasser)
c(Sch)	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität des gefrorenen Bodens
cfl(Sch)	J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität des ungefrorenen Bodens (fl für flüssiges Wasser)
rS(Sch)	kJ/kg	Phasenwandelwärme des homogenen Erde-Wasser-Gemischs (Schmelzenthalpie des anteiligen Wassers wird vereinfacht auf die Gemischmasse bezogen)
TSch(Sch)	m	Tiefe der Schichtunterseite von der Erdoberfläche
Korb- und Sondendaten (siehe Bild 1.1)		
dKorb	mm	Durchmesser des Korbes in Mitte des Kapillarrohrtringes
kappaKorb	W/(m ² K)	Teilwärmedurchgangskoeffizient von der Bohrlochwand zum Fluid Ermittlung nach Abschnitt 2.1 mit dem Rechenprogramm für "Homogene Platten mit Rohrregister"
di	mm	Kapillarrohrinnendurchmesser (nur informativ, Berücksichtigung bei der Ermittlung von kappaKorb)
RA	mm	Abstand zwischen den Kapillarrohren (nur informativ, Berücksichtigung bei der Ermittlung von kappaKorb)
Fluessigkeit	-	Durchflussmedium in den Sondenrohren: - wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 4) - wässrige Lösung mit 25 % Tyfocor L (programmintern: Fluessigkeit = 5) - Wasser (programmintern: Fluessigkeit = 1)
Tfix	°C	Konstante Flüssigkeitseintrittstemperatur während der gesamten Simulationszeit Falls Qfix gilt oder die Eintrittstemperatur zeitabhängig ist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 2 verwenden!}
Qfix	W	Geforderte, konstante Sondenleistung während der gesamten Simulationszeit Falls Tfix gilt oder die Sondenleistung zeitabhängig ist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 3 verwenden!}
Vfix	l/h	Konstanter Durchfluss durch die Sonde während der gesamten Simulationszeit (Vfix ≥ 0); Vfix > 0 sollte der Geschwindigkeit in den Kapillarrohren entsprechen, die bei der Ermittlung von kappaKorb zugrunde gelegt wurde. Wenn Vfix > 0, muss auch Tfix oder Qfix einen sinnvollen Wert besitzen! Vfix = 0 dient zur Erdreichsimulation ohne Sondenbetrieb. Falls sich der Durchfluss in seiner Größe zeitlich ändert oder Unterbrechungen aufweist, "blank" eingeben (bitte kein Leerzeichen). {Für Zeitfolge Maske 4 verwenden!}
Anpass	-	Anpassung der Simulation soll gewährleisten: - Flüssigkeitseintrittstemperatur (programmintern: Anpass = 1) - Sondenleistung (programmintern: Anpass = 2)

Daten zum Simulationsablauf		
BSmax	h	Anzahl der gewünschten Simulationsstunden
tOF	°C	Konstante Erdoberflächentemperatur Bei einer Einhausung über dem Simulationsgebiet gilt die Raumtemperatur. Bei freier Fläche über dem Simulationsgebiet ist die zeitlich veränderliche Sonnenlufttemperatur maßgebend, die als Datei benannt werden muss. Für tOF ist "blank" einzugeben (bitte kein Leerzeichen).
Datei für Sonnenlufttemperatur	-	Wenn tOF = "blank", dann Pfad und Datei für Sonnenlufttemperatur benennen. Die Sonnenlufttemperatur $t_a(\tau)$ sollte nach [1], Gl. (6.1) gebildet werden, wobei der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ zu verwenden ist. Weiterhin wird der Absorptionskoeffizient $a = 0,3$ empfohlen. Die Lufttemperatur und die Globalstrahlung ist dem für den Standort gültigen Testreferenzjahr nach DIN 4710 zu entnehmen. Die Datei muss 8760 Stundenwerte für t_a vom 1. Januar bis 31. Dezember enthalten und von Visual Basic durch einen Input-Befehl lesbar sein.
tErdsohle	°C	Konstante Erdsohlentemperatur Die Temperatur muss mit der Tiefe der Sohle des Simulationsgebietes zusammenpassen. Es darf kein Oberflächeneinfluss mehr auftreten.
Erdreich-temperatur- und Phasenfeld $t(i, k)$ Phase(i, k)	-	Bei Beginn einer Simulation wird normalerweise ein Temperaturfeld $t(i, k)$ allein aus tErdsohle und einem Temperaturgradienten von $0,03 \text{ K/m}$ kreiert. Soll eine bereits erfolgte Simulation mit gleichen oder veränderten Randbedingungen fortgesetzt werden, dann kann das zuletzt ermittelte Temperaturfeld $t(i, k)$, das stets automatisch unter Speicherfeld.dat gespeichert wird, wiederum eingelesen werden und als Starttemperaturverteilung dienen. Der Pfad ist anzugeben und mit \ zu beenden. Da die Datei Speicherfeld.dat vorher vom Programm erzeugt wurde, ist sie auch komplikationslos einlesbar.

- Eingabe zeitlich veränderlicher Flüssigkeitseintrittstemperaturen (Bild 3.2)

Die Maske 2 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Flüssigkeitstemperatur berücksichtigt werden soll (T_{fix} in Maske 1 ist "blank") und außerdem die Anpassung der Simulation an die vorgegebene Eintrittstemperatur gebunden ist ($\text{Anpass} = 1$).

Flüssigkeitseintrittstemperatur		
FT(Monat, Tagesstunde)	°C	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Bild 3.2 Eingabeoberfläche für die Flüssigkeitseintrittstemperatur (Maske 2)

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des Beispiels können überschrieben werden. Für die Stunden, in denen der Sondendurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 1 auch die Flüssigkeitseintrittstemperatur bekannt sein. Stundeneingaben während des Sondenstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFT.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlicher Sondenleistungen (Bild 3.3)**

Die Maske 3 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf der Sondenleistung zu beachten ist (Qfix in Maske 1 ist "blank") und außerdem die Anpassung der Simulation an die vorgegebene Sondenleistung gebunden ist (Anpass = 2).

Sondenleistung		
FQ(Monat, Tagesstunde)	W	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Bild 3.3 Eingabeoberfläche für die geforderte Sondenleistung (Maske 3)

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des Beispiels können überschrieben werden. Für die Stunden, in denen der Sondendurchfluss erfolgt, muss bei Anpass = 2 die Sondenleistung bekannt sein. Stundeneingaben während des Sondenstillstandes werden ignoriert, der besseren Übersicht wegen, sollten die Felder "blank" sein. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFQ.dat**.

- **Eingabe zeitlich veränderlichen Durchflusses (Bild 3.4)**

Die Maske 4 ist nur auszufüllen, wenn ein zeitabhängiger Verlauf des Sondendurchflusses bzw. Stillstandszeiten auftreten (Vfix in Maske 1 ist "blank").

Sondendurchfluss		
FV(Monat, Tagesstunde)	l/h	Für jeden Monat wird ein repräsentativer Tag mit Stundenwerten gefüllt. Diese Werte gelten während der gesamten Stunde (Intervall = 1 bis Intervall _{max} nach [1], Bild 6.3; es erfolgt keine Interpolation). Weiterhin gilt der Mustertag für den gesamten Monat.

Das Ausfüllen der Oberfläche kann in eine leere Maske erfolgen, oder aber vorhandene Daten des Beispiels können überschrieben werden. Die mit einem Wert belegten Stunden kennzeichnen den Sondenbetrieb. Sind Felder "blank", so erfolgt kein SONDENDURCHFLOß. Die Simulation beschränkt sich dann nur auf den instationären Wärmetransport im Erdreich. Die Datenspeicherung erfolgt in der Datei **ZVERLAUFV.dat**.

Wäre $V_{fix} \neq 0$, so würde sich die Sonde im Dauerbetrieb befinden.

Eingabe: Durchfluss

Flüssigkeitsdurchfluss in l/h
(bezogen auf den gesamten Korb)

Tagesstunde

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:
F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\ZVERLAUFV.dat

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Januar																								
Februar																								
März																								
April																								
Mai																								
Juni																								
Juli																								
August																								
September																								
Oktober																								
November																								
Dezember																								

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!
DATENSPEICHERUNG drücken!
Evtl. KONTROLLDRUCK erzeugen!

MASKE LEEREN DATENANZEIGEN
DATENSPEICHERUNG KONTROLLDRUCK BEENDEN

Bild 3.4 Eingabeoberfläche für den SONDENDURCHFLOß (Maske 4)

Der SONDENDURCHFLOß sollte zur Geschwindigkeit in den Kapillarrohren passen, die bei der Ermittlung von κ_{Korb} zugrunde gelegt wurde.

- **Ausgaben (Druck- und Diagrammarten)**

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als MS WORD-Dateien angezeigt. Sie können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich. Angaben finden sich im Hauptbericht [1], Abschnitt 6.4 (S. 52 ff.)

4 Programminstallation und Hinweise zu Programmänderungen

Das Rechenprogramm "**KORBWÄRMESONDE**" steht mit einem Beispiel zum kostenlosen Download bereit. Aus dem Programmlisting sind alle Module – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich, sodass eine Einarbeitung rasch möglich ist. Die Programmierung erfolgte in sehr einfacher Form, Anregungen zu eigenen Verbesserungen sind vielfach offensichtlich.

- **Grundlagen für die Programmabarbeitung**

Erfolgt die Programmabarbeitung in der Programmierumgebung **MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD**, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar. Ersatzweise kann auch **Visual Basic 2010 Express** verwendet werden. Die bisherige Programmanwendung lief unter dem Betriebssystem Microsoft Windows XP mit Service Pack 1.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetabellen – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

- **Laden und Start des Rechenprogramms**

Die Datei steht in dem übergebenen Ordner "Korbsonde". Sie ist in ein eigenes Verzeichnis auf die Festplatte zu kopieren. Im genannten Ordner sind das Rechenprogramm und ein Simulationsbeispiel enthalten. Die entsprechenden Unterordner tragen die Namen:

- **Programm** (Simulationsmodell für Korberdwärmesonden)
- **Beispiel_Korb_1** (Simulationsbeispiel für eine Erdwärmesonde gemäß Seite 20 ff.) {Im Ordner "Beispiel_Korb_1" steht auch die Datei für die Sonnenlufttemperatur **tSL.dat**. Sie erscheint in der Hauptbedienoberfläche z. B. als

F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\tSL.dat.

Der blaue Teil des Pfades ist den realen Gegebenheiten des benutzten Computers anzupassen.}

Die Programmabarbeitung kann generell auf zweierlei Weise erfolgen.

I. Beispielhafte Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner "**Programm**" öffnen ⇒ Datei "bin" öffnen
⇒ "**Programm.exe**" Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

Visual Basic.NET starten ⇒ Menüleiste "**Datei**" ⇒ "**Öffnen**" ⇒ "**Projekt**" Einfachklick
⇒ Ordner "**Programm**" auswählen ⇒ "**Programm.sin**" Doppelklick
⇒ Menüleiste "**Debuggen**" Einfachklick ⇒ "**Starten**" Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster ([1], Bild 6.5) ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben!

- **Bearbeitung des Programmlistings**

Im Ordner "**Programm**" sind alle Dateien mit den Quellcodes (Formen) enthalten. Die Auswahl der Formen kann mit Hilfe des Projektmappen-Explorers vorgenommen werden.

- Gliederung des Rechenprogramms

Form1.vb	Hauptprogramm mit Haupteingabe, Ablaufsteuerung, Ergebnisdruck und Steuerung weiterer Druck- und Grafikausgaben
Form2.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Flüssigkeitseintrittstemperatur" mit Kontrolldruck
Form3.vb	Anzeige zum Simulationsstand in Stunden während der Berechnung
Form4.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Sondenleistung" mit Kontrolldruck
Form5.vb	Eingabe des Zeitverlaufes "Flüssigkeitsdurchfluss" mit Kontrolldruck
Form6.vb	Druck des Temperatur- und Phasenfeldes
Form7.vb	Grafik der Betriebsverläufe längs der Sonde
Form8.vb	Grafik der Betriebsverläufe der Sonde und des Sondenumfeldes über die Simulationszeit

5 Beispiel

Bezüglich der Erdreichmodellierung, der thermischen Randbedingungen und der wärmetechnischen Sondenbelastungen gelten die in [1], Abschnitt 8.1 (S. 59 ff.) getroffenen Festlegungen.

5.1 Alleinige Heizwärmenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Korb_1)

Das Beispiel wird anhand der folgenden Bilder, Bildunterschriften und Zwischentexten erläutert.

Korberdwärme-sonde - Hauptprogramm

Sondensimulation für Korbsonden aus Kapillarrohren (Sondervariante)

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2011)

Erdoberfläche Bohrloch mit Korb

Schicht Sch = 1 Verlegetiefe $i = 1$

Schicht Sch

Schicht Sch = Schmax

Sohle des Simulationsgebietes

Durchmesser des Simulationsgebietes $2 r_{EB}$

Länge des Simulationsgebietes L_{Sim}

$2 r_{BL}$

$i = imax$

Hauptgeometriedaten

Bohrlochradius r_{BL} 0,15 m

Korblänge L_{Korb} 2 m

Länge L_{Sonde} 3 m

Länge L_{Sim} 10 m

i_{max} 100

Simulationsradius r_{EB} 2 m

k_{max} 10

Schichtdaten

Schicht	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)		c J/(kg K)		rS kJ/kg	TSch m
		fest	flüssig	fest	flüssig		
Sch = 1	1630	1,66	1,5	917	1046	20,5	11
Sch = 2	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 3	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 4	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 5	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 6	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 7	0	0	0	0	0	0	0
Sch = 8	0	0	0	0	0	0	0

Korb- und Sonden-daten

Korbdurchmesser d_{Korb} 280 mm Teilwärmehdchgangskoeffizient κ_{Korb} 45 W/(m²K)

Rohrinnendurchmesser d_i 2,7 mm Kapillarrohrabstand RA 20 mm

Durchflussmedium: ☐ Tyfoor L 40 % ☒ Tyfoor L 25 % ☐ Wasser

Eintrittstemperatur °C oder Leistung W Volumenstrom l/h

Die Angaben gelten für die gesamte Simulationszeit. Sind diese Felder "blank", dann ist die Eingabe unter ZEITVERLAUF vorzunehmen. Die Leistung und der Volumenstrom beziehen sich auf die komplette Korbsonde.

Die Simulationsanpassung soll die gewünschte { ☐ Eintrittstemperatur oder ☒ Leistung } sicherstellen.

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus DATEI LADEN oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. EINGABESPEICHERUNG drücken! Es erfolgt eine Grobkontrolle.
5. Über ZEITVERLAUFE Eintrittstemperatur oder Leistungsanforderung und Durchfluss eingeben!
6. BERECHNUNG, DRUCK, TABELLE oder DIAGRAMM drücken!

Daten zum Simulationsablauf

Beginn der Simulation: 1. Januar, 1. Stunde

Maximale Anzahl der Simulationsstunden 43800

Konstante Erdoberflächentemperatur °C

Evtl. Laden der Sonnenlufttemperatur (Pfad + Datei): F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\SL.dat

Unbeeinflusste Sohlentemperatur 10 °C

Evtl. Eingabe der Erdoberflächentemperaturverteilung einer vorhandenen Simulation (Pfad mit \ beenden):

Bei Eingabe von "blank" wird die vertikale Temperaturverteilung für alle i ausgehend von der Sohlentemperatur bei imax mit der Temperaturreduzierung von 0,03 K/m nach oben ermittelt. t(i, k) gilt für alle Kreisringe k.

STARTEN **DATEI LADEN** **EINGABESPEICHERUNG** **BERECHNUNG** **DRUCK** **DIAGRAMM-SONDE**

Zeitverläufe > **DURCHFLOß** **EINTRITTSTEMPERATUR** **SONDENLEISTUNG** **T - / Phase-TABELLE** **DIAGRAMM-UMFELD** **BEENDEN**

Bild 5.1 Hauptoberfläche (Maske 1) mit den Eingabedaten für Beispiel_Korb_1

Die Eingabedaten sind im Abschnitt 3 erläutert, Aussagen zu speziellen hier angenommenen Werten finden sich in [1], Abschnitt 8.1 (S. 59 ff.) und für κ_{Korb} in diesem Bericht auf S. 6. Der Ordner "Beispiel_Korb_1" ist vor dem Programmstart anzulegen. In diesem Fall wurde die Datei mit den Daten der stündlichen Sonnenlufttemperatur "tSL.dat" in den Ordner "Beispiel_Korb_1" kopiert. Sie könnte aber auch an anderer Stelle stehen, wobei sie entsprechend zu benennen wäre.

- Die Sonnenlufttemperatur ist aus der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung für Kassel nach TRY 07 ermittelt. Die Grundwassertemperatur in 10 m Tiefe beträgt konstant 10 °C.
- Die Simulationszeit erstreckt sich über 5 Jahre.
- Die Betriebszeiten der Sonde entsprechen [1], Tabelle 8.2 (S. 61). Sie finden sich in den Masken der Bilder 5.2 und 5.3 wieder.
- Die Sonde ist Teil eines Sondenfeldes gemäß [1], Bild 2.8 (S. 8) mit dem Radius $r_{BE} = 2$ m.

- Als Wärmeträger wird eine wässrige 25 %-ige Tyfocorlösung verwendet. Wegen der kleinen Unterschiede zur 40 %-igen Tyfocorlösung gilt nach Tabelle 2.1 $\kappa_{\text{Korb}} = 45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.


Eingabe: Durchfluss





Flüssigkeitsdurchfluss in l/h

(bezogen auf den gesamten Korb)

Tagesstunde

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:

F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\ZVERLAUFV.dat

Januar

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

Februar

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

März

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

April

200

200

200

200

200

200

Mai

200

200

Juni

Juli

August

September

200

Oktober

200

200

200

200

200

November

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

Dezember

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

200

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!

DATENSPEICHERUNG drücken!

Evtl. KONTROLLDRUCK erzeugen!

MASKE LEEREN

DATENANZEIGEN

DATENSPEICHERUNG

KONTROLLDRUCK

BEENDEN

Bild 5.2 Eingabeoberfläche (Maske 4) mit den zeitabhängigen Sondendurchsätzen für Beispiel Korb 1

- Der nachfolgende Kontrollausdruck gibt das monatlich unterschiedliche Betriebsstundenschema von [1], Tabelle 8.2 (S. 61) richtig wieder.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL KORB 1\

Monatliche Verläufe des Flüssigkeitsdurchflusses (gesamter Korb) in l/h

[illegible]

Der Durchfluss entspricht einer Geschwindigkeit in den Kapillarrohren von:

$$w = \frac{4 \dot{V}}{\pi d^2 \text{Rohrzahl}} = \frac{4 \cdot 200}{3600000 \pi 0,0027^2 \cdot 100} \text{ m/s} = 0,1 \text{ m/s}.$$


Eingabe: Sondenleistung

Geforderte Sondenleistung in W
 (bezogen auf den gesamten Korb)

Tagesstunde

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:
 F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\ZVERLAUFQ.dat

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Januar																								
Februar																								
März																								
April																								
Mai																								
Juni																								
Juli																								
August																								
September																								
Oktober																								
November																								
Dezember																								

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!

DATENSPEICHERUNG drücken!

Evtl. KONTROLLDRUCK erzeugen!

MASKE LEEREN

DATENANZEIGEN

DATENSPEICHERUNG

KONTROLLDRUCK

BEENDEN

Bild 5.3 Eingabeoberfläche (Maske 3) mit den geforderten Stundenleistungen der Sonde für Beispiel Korb 1

- Der Kontrollausdruck entspricht wiederum dem monatlich unterschiedlichen Betriebsstundenschema nach [1], Tabelle 8.2 (S. 61).

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL KORB 1\

Monatliche Verläufe der geforderten Sondenleistung (gesamter Korb) in W

[illegible]

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL_KORB_1\

Simulationseingaben und -ergebnisse

Eingabewerte:

Korb- und Sondendaten:

dKorb	kappaKorb	di	RA	LKorb	LSonde	rBL	Flüssigkeit	Eintritts- temperatur °C	Sonden- leistung W	Durchfluss l/h
mm	W/(m²K)	mm	mm	m	m	m				
280	45	2,7	20,0	2,000	3,0	150	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit fest	Wärmeleitfähigkeit flüssig	Wärmekapazität fest	Wärmekapazität flüssig	Schmelz- wärme	Schicht- tiefe
	kg/m³	W/(mK)		J/(kgK)		kJ/(kg)	m
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	11,0
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Sondenleistung!

Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

Tiefe	Radius	imax	kmax	Oberflächentemperatur °C	Erdsohlentemperatur °C	Simulationszeit h
m	m					
10,0	2,0	100	10		10,0	43800

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\tSL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Ergebnisse:

Werte des letzten Simulationszyklus bei Sondendurchfluss im Korbbereich

Letztes Intervall der Simulationsstunde: 43799

i	tV(i) °C	tR(i) °C	tBL(i) °C	QKorb(i) W
11	-1,6	-1,2	-0,4	4,9
12	-1,6	-1,2	-0,5	4,5
13	-1,6	-1,2	-0,5	4,3
14	-1,6	-1,2	-0,6	4,2
15	-1,6	-1,2	-0,6	4,2
16	-1,6	-1,2	-0,6	4,2
17	-1,6	-1,2	-0,6	4,2
18	-1,6	-1,2	-0,5	4,3
19	-1,6	-1,2	-0,5	4,4
20	-1,6	-1,2	-0,5	4,5
21	-1,6	-1,2	-0,5	4,6
22	-1,6	-1,2	-0,4	4,7
23	-1,6	-1,2	-0,4	4,9
24	-1,6	-1,2	-0,3	5,1
25	-1,6	-1,2	-0,3	5,3
26	-1,6	-1,2	-0,2	5,5
27	-1,6	-1,2	-0,2	5,8
28	-1,6	-1,2	-0,1	6,2
29	-1,6	-1,2	0,1	6,7
30	-1,6	-1,1	0,3	7,5

Wärmeaufnahme Sonde gesamt W	Temperaturspitzung K
100	0,5

Monatswerte

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh		
1	1	-114	0	37		
1	2	25	1	31		
1	3	26	2	28		
1	4	54	4	18		
1	5	101	6	6		
1	6	72	7	0		
1	7	40	6	0		
1	8	39	4	0		
1	9	-31	1	3		
1	10	-26	-1	16		
1	11	-57	-3	27		
1	12	-36	-4	34		
	Jahressummen:	94	22	200	Bilanz:	-83 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					2175 kWh
2	1	-67	-3	37		
2	2	36	-0	31		
2	3	33	2	28		
2	4	58	5	18		
2	5	104	7	6		
2	6	73	8	0		
2	7	42	8	0		
2	8	40	5	0		
2	9	-30	2	3		
2	10	-26	-1	16		
2	11	-57	-3	27		
2	12	-35	-4	34		
	Jahressummen:	172	28	200	Bilanz:	-0 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					2172 kWh
3	1	-66	-2	37		
3	2	37	-0	31		
3	3	33	3	28		
3	4	58	5	18		
3	5	104	8	6		
3	6	73	8	0		
3	7	42	8	0		
3	8	40	5	0		
3	9	-30	2	3		
3	10	-26	-1	16		
3	11	-57	-3	27		
3	12	-35	-4	34		
	Jahressummen:	173	29	200	Bilanz:	3 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					2172 kWh
4	1	-66	-2	37		
4	2	37	-0	31		
4	3	33	3	28		
4	4	58	5	18		
4	5	104	8	6		
4	6	73	8	0		
4	7	42	8	0		
4	8	40	5	0		
4	9	-30	2	3		
4	10	-26	-1	16		
4	11	-57	-3	27		
4	12	-35	-4	34		
	Jahressummen:	173	29	200	Bilanz:	3 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					2172 kWh
5	1	-66	-2	37		
5	2	37	-0	31		
5	3	33	3	28		
5	4	58	5	18		
5	5	104	8	6		
5	6	73	8	0		
5	7	42	8	0		
5	8	40	5	0		
5	9	-30	2	3		
5	10	-26	-1	16		
5	11	-57	-3	27		
5	12	-35	-4	34		
	Jahressummen:	173	29	200	Bilanz:	3 kWh
	Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:					2172 kWh

- Der Bilanzwert (Wärmezufuhr von der Erdoberfläche und von der Sohle des Simulationsgebietes minus Sondenarbeit) ist ab dem zweiten Simulationsjahr bereits ausgeglichen. D. h., nach dem zweiten Jahr liegt bereits ein eingeschwungener Zustand vor, sodass die Simulationszeit zukünftig verkürzt werden kann.
- Die jährliche Sondenarbeit beträgt 200 kWh. Damit beträgt bei den betrachteten 1997 Jahresbetriebsstunden die mittlere Sondenleistung ca. 100 W. Die programminterne "Leistungsregelung" arbeitet somit ausgezeichnet.
- Die Anteile der Erdwärmesondenarbeit betragen in diesem Beispiel im eingeschwungenen Zustand etwa:
 - 0 % durch Erdreichabkühlung
 - 14 % durch Wärmezufluss vom Erdinneren
 - 86 % durch Wärmezufluss von der Erdoberfläche.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL KORB 1\FEB2.DAT

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL; Erdreich k = 1 ... 20 in °C zur Zeit 10175 Stunden

[illegible]

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL_KORB_1\FEB2.DAT

Temperaturen: Vorlauf tV, Rücklauf tR, Bohrlochwand tBL in °C; Phasenzustände des Erdreichs k = 1 ... 20 in Werten 0 ... 1 zur Zeit 10175 Stunden

Phase = 0 gefrorener Boden; Phase = 1 ungefrorener Boden; Phase = 0 ... 1 teilgefrorener Boden; Phase = x Boden ohne Feuchteanteil

i	tV	tR	tBL	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10
1	-	-	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
.													
10	-	-	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Anfang der Korbsonde													
11	-3,51	-3,07	-2,31	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
12	-3,51	-3,08	-2,35	0,989	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
13	-3,51	-3,09	-2,37	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
14	-3,51	-3,09	-2,39	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
15	-3,51	-3,09	-2,39	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
16	-3,51	-3,09	-2,37	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
17	-3,51	-3,09	-2,29	0,233	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
18	-3,51	-3,09	-2,31	0,469	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
19	-3,51	-3,09	-2,33	0,686	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
20	-3,51	-3,09	-2,35	0,958	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
21	-3,51	-3,09	-2,35	0,981	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
22	-3,51	-3,09	-2,35	0,995	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
23	-3,51	-3,09	-2,35	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
24	-3,51	-3,09	-2,34	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
25	-3,51	-3,09	-2,30	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
26	-3,51	-3,09	-2,25	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
27	-3,51	-3,08	-2,19	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
28	-3,51	-3,08	-2,10	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
29	-3,51	-3,07	-1,98	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30	-3,51	-3,06	-1,80	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Ende der Korbsonde													
31	-	-	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
.													
100	-	-	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

- Die Temperatur- und Phasenzustandsverteilung im Erdreich zeigt Ende Februar des zweiten Simulationsjahres nur einen geringen Bereich gefrorenen Bodens (gelb) in unmittelbarer Korbnähe.
- An der Sohle des Simulationsgebietes beträgt der Temperaturgradient 0,08 K/m. Obwohl dieser Gradient die Frage nach der Richtigkeit der Randbedingung einer konstanten Temperatur an der Sohle des Simulationsgebietes aufwirft, sei auf die Kleinheit des vertikalen Wärmestromes von 0,12 W/m² verwiesen.

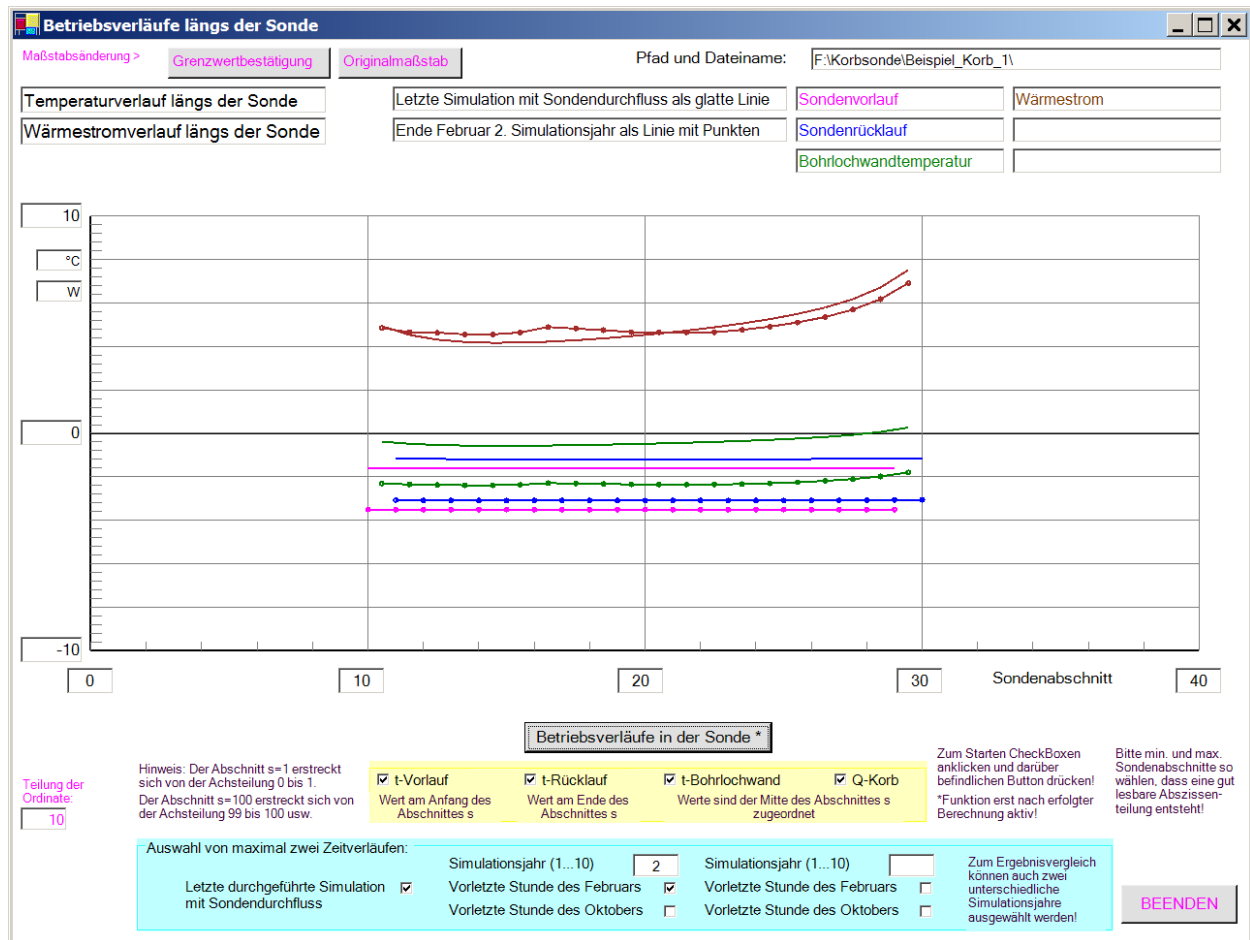


Bild 5.4 Ausgewählte Betriebsverläufe (Letzte Simulationsbetriebsstunde Ende Dezember des 5. Simulationsjahres und Ende Februar des 2. Simulationsjahres) über die Korbtiefe
Die Vorlauftemperatur ist dem Anfang des jeweiligen Sondenabschnittes, die Rücklauftemperatur dem Ende zugeordnet. Die Bohrlochwandtemperatur und der Wärmestrom ist jeweils in Abschnittsmitte dargestellt.

- Deutlich zeigen sich die höheren Sole- und Bohrlochwandtemperaturen Ende Dezember gegenüber Ende Februar, da in den zwei Wintermonaten eine merkliche Entspeicherung des Erdreiches erfolgt.
- Somit sinkt die mittlere Soletemperatur um etwa 2 K.
- Die vertikale Verteilung der Bohrlochwandtemperatur zeigt den Einfluss der Wärmeströme von oben und unten ins Simulationsgebiet.
- Dies spiegelt sich auch in den Verläufen der abschnittswisen Wärmestromaufnahme wider, wobei die Sondenleistung konstant bleibt.
- Die Vorlauftemperatur zu Beginn der Abschnitte bleibt gemäß Algorithmus konstant.
- Die Temperaturspreizung ist mit ca. 0,4 K sehr gering.

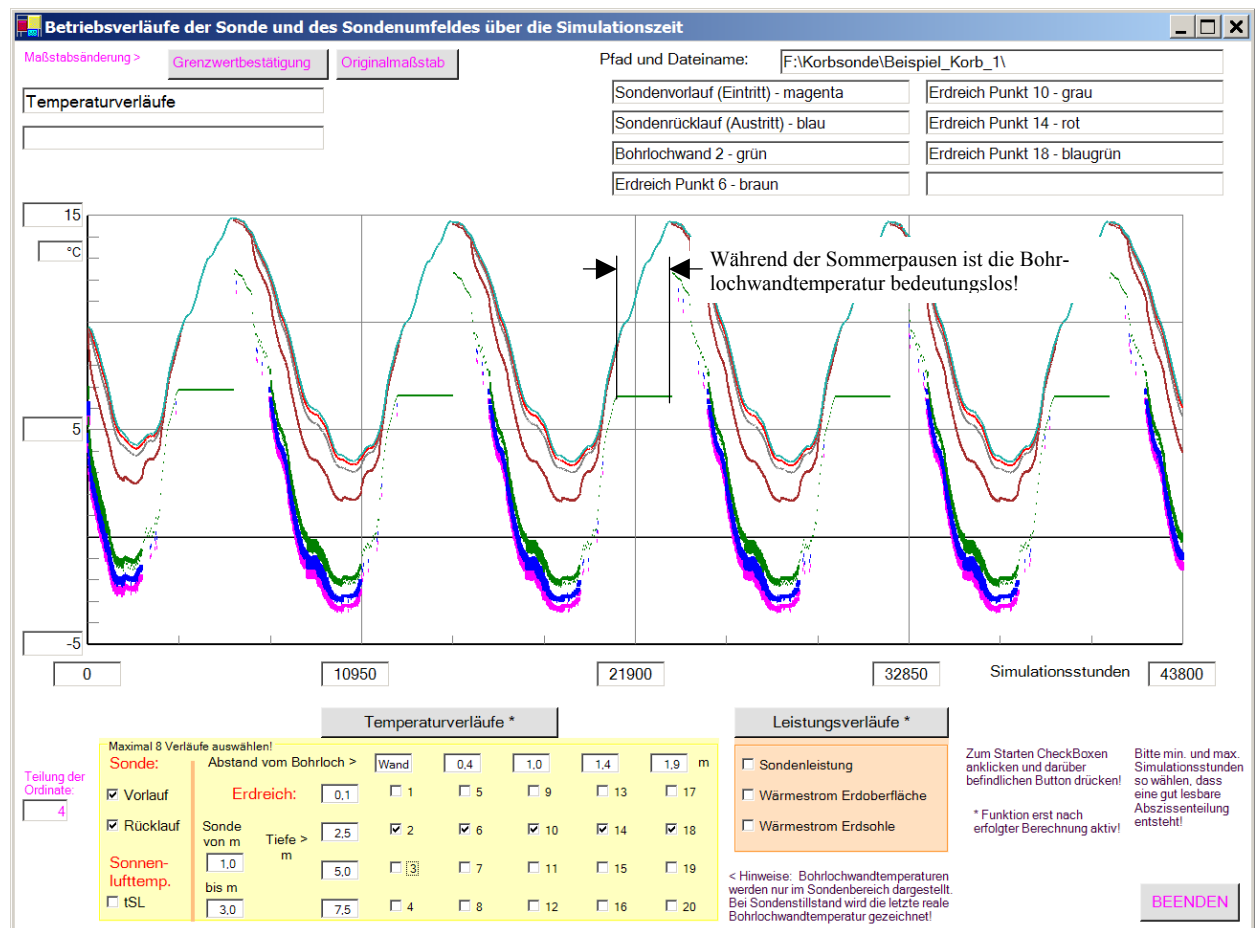


Bild 5.5 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen am Eintritt bzw. Austritt des Sondenkorbes sowie Bohrloch- und spezielle Erdreichtemperaturen in 2,5 m Tiefe im Verlaufe von 5 Simulationsjahren

- Die sommerlichen Betriebspausen sind deutlich zu erkennen. Mit Beginn der Heizperiode sinken die Sole- und Bohrlochwandtemperaturen stark sowie die Erdreichtemperaturen merkbar ab, im Frühjahr steigen sie aufgrund der verringerten Anforderung wieder etwas an. Eine offensichtliche Erholung tritt in der Sommerpause ein, da Wärme zur unmittelbaren Sondenumgebung fließt.
- Die dargestellten Bohrlochwandtemperaturen während der Betriebspausen sind unreal. Entsprechend Abschnitt 3 (S. 9, Markierung) bleiben sie bei intermittierendem Sondenbetrieb während der Pausen unverändert, um die "numerische Einschwingphase" zu verkürzen. Dies erwies sich auch als zweckdienlich. Nach der langen Sommerpause jeweils zu Beginn der Heizperiode ergibt sich jedoch eine erneute Einfahrkurve. Die Bohrlochwandtemperatur nimmt während der Sondenbetriebspausen keinen Einfluss auf die Erdreichtemperaturverteilung.
- Sehr gut zu erkennen ist die Wiederholung des Temperaturregimes nach dem 2. Simulationsjahr.

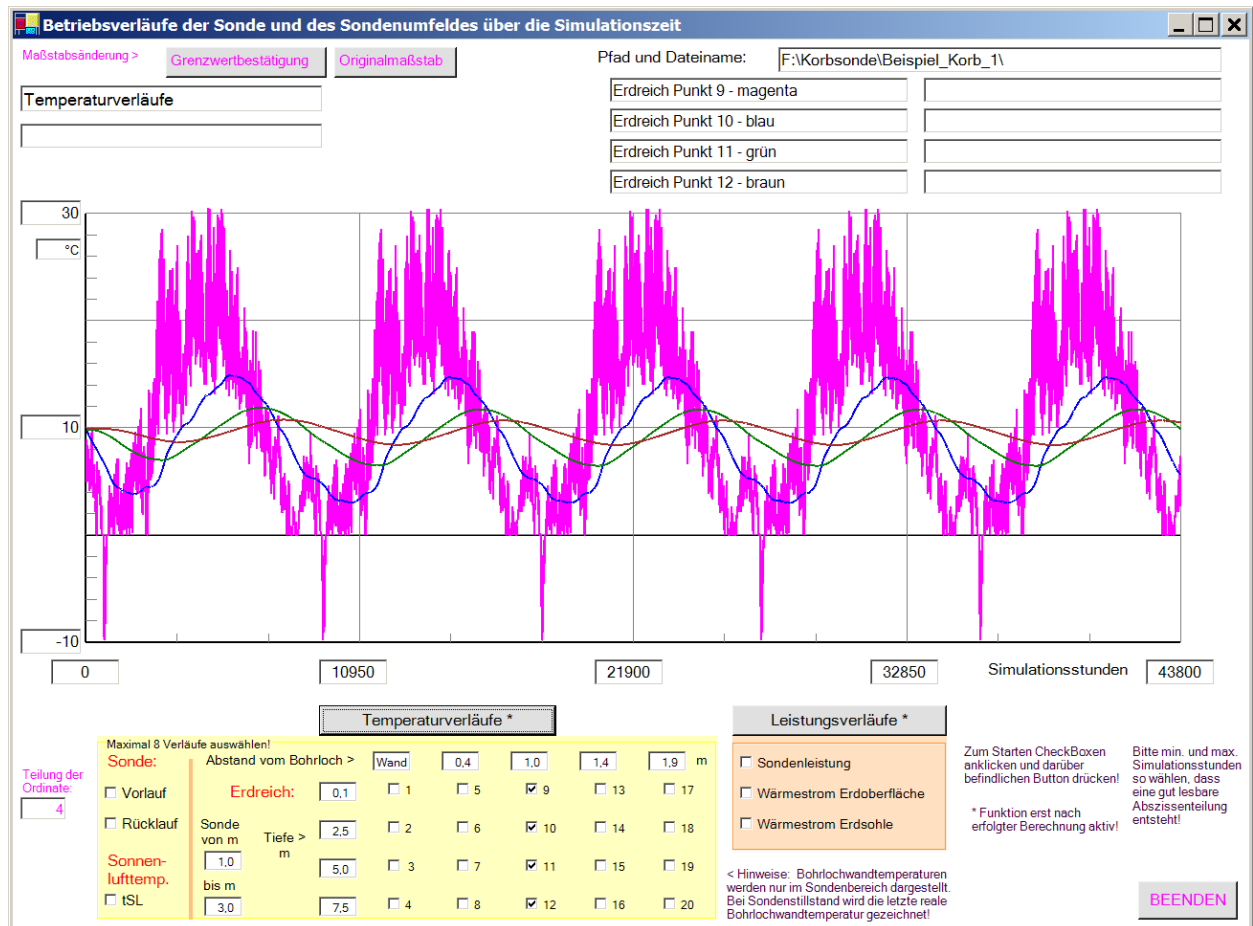
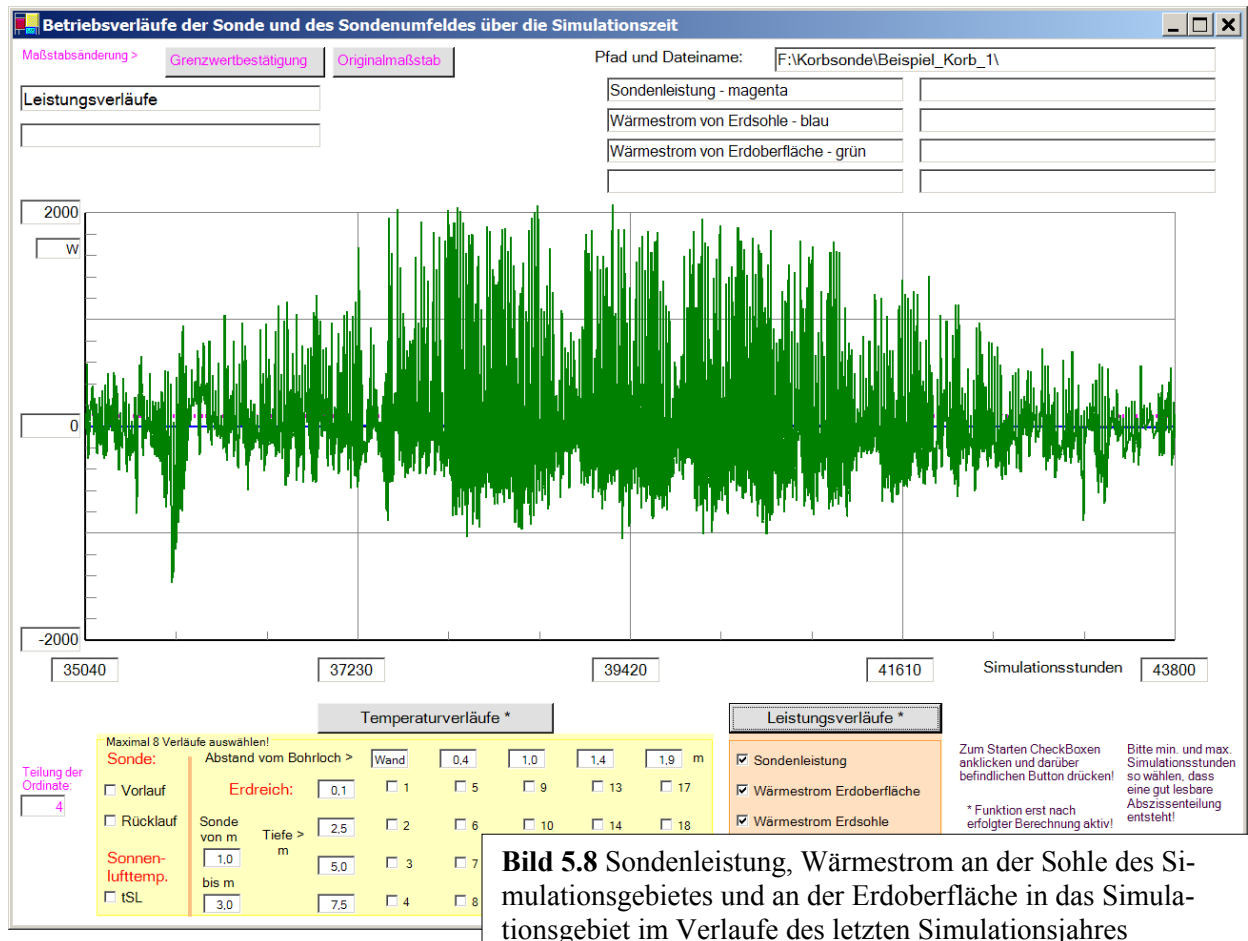
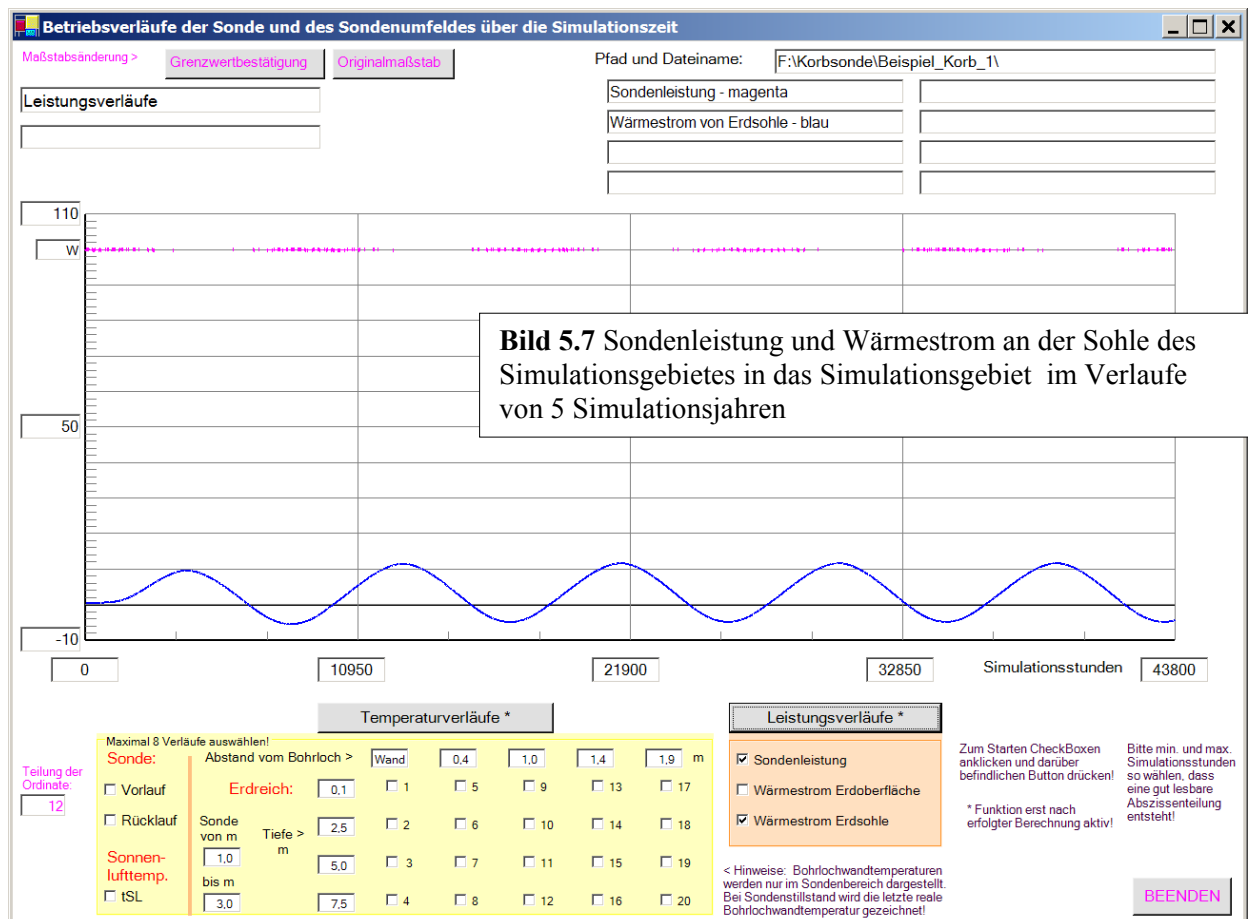


Bild 5.6 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe von 5 Simulationsjahren (Abstand 1,0 m, Tiefen variiert)

- Der Temperaturverlauf am Punkt 9 (0,1 m unter der Erdoberfläche) zeigt den deutlichen Einfluss der Sonnenlufttemperatur im Jahresgang.
- Die darunter liegenden Punkte 10, 11 und 12 in ca. 2,5 m, 5 m und 7,5 m Tiefe weisen auch eine Schwingung im Jahresgang auf. Sie ist maßgeblich durch die meteorologische Randbedingung an der Erdoberfläche verursacht und erfährt außerdem eine Beeinflussung durch den Jahresgang der abgeforderten Sondenleistung.



- Die Sondenleistung entspricht während der Betriebszeit der Anforderung von 100 W.
- Der Wärmestrom aus der Erdtiefe (konstante Grundwassertemperatur von 10 °C wurde in 10 m Tiefe angenommen) wechselt im Jahresgang. Eine eventuelle Änderung der Randbedingung an der Sohle des Simulationsgebietes bedarf einer erneuten Simulation. Der summative Wärmezustrom ins Simulationsgebiet ist relativ gering (im Jahresmittel 14 % der Sondenarbeit).
- Demgegenüber ist der Wärmestrom an der Erdoberfläche ins Simulationsgebiet beträchtlich. Somit muss die Randbedingung an der Erdoberfläche möglichst genau nachgebildet werden.

5.2 Kombinierte Wärme-/Kältenutzung beim Sondenbetrieb (Beispiel_Korb_2)

Im Weiteren wird aufbauend auf das Beispiel_Korb_1 eine veränderte Nutzung simuliert. Während die Wärmeentnahme im Heizfall gleich bleibt, wird im Sommer zusätzlich Wärme über die Sonde ins Erdreich gebracht. Sie kann beispielsweise aus der aktiven Bauteilkühlung oder aus Kälteprozessen stammen.

Die in diesem Beispiel angenommenen **zeitabhängigen Belastungen** sind den nachfolgenden Kontrollausdrücken zu entnehmen.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL KORB 2\

Monatliche Verläufe des Flüssigkeitsdurchflusses (gesamter Korb) in l/h

[illegible]

Monatliche Verläufe der geforderten Sondenleistung (gesamter Korb) in W

[illegible]

Ergebnisdrucke und Grafiken des Beispiels

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\KORBSONDE\BEISPIEL_KORB_2\

Simulationseingaben und -ergebnisse

Eingabewerte:

Korb- und Sondendaten:

dKorb	kappaKorb	di	RA	LKorb	LSonde	rBL	Flüssigkeit	Eintritts- temperatur °C	Sonden- leistung W	Durchfluss l/h
mm	W/(m²K)	mm	mm	m	m	m				
280	45	2,7	20,0	2,000	3,0	150	Tyfocor L25		Z-funk.	Z-funk.

Erdschichten:

Schicht	Dichte	Wärmeleitfähigkeit fest	Wärmeleitfähigkeit flüssig	Wärmekapazität fest	Wärmekapazität flüssig	Schmelz- wärme	Schicht- tiefe
	kg/m³	W/(mK)		J/(kgK)		kJ/(kg)	m
1	1630	1,66	1,50	917	1046	20,5	11,0
2	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
3	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
4	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
5	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
8	0	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0

Es erfolgt die Anpassung an die vorgegebene Sondenleistung!

Zeitschrittweite: 600 s

Daten zum Simulationsgebiet und zur Simulationszeit:

Tiefe	Radius	imax	kmax	Oberflächentemperatur	Erdsohlentemperatur	Simulationszeit
m	m			°C	°C	h
10,0	2,0	100	10		10,0	17520

Datei Sonnenlufttemperatur: F:\Korbsonde\Beispiel_Korb_1\tSL.dat

Datei Erdreichtemperaturverteilung früherer Simulation:

Ergebnisse:

Werte des letzten Simulationszyklus bei Sondendurchfluss im Korbbereich
 Letztes Intervall der Simulationsstunde: 17519

i	tV(i) °C	tR(i) °C	tBL(i) °C	QKorb(i) W
11	-1,1	-0,7	0,1	4,7
12	-1,1	-0,7	-0,0	4,4
13	-1,1	-0,7	-0,1	4,2
14	-1,1	-0,7	-0,1	4,1
15	-1,1	-0,7	-0,1	4,1
16	-1,1	-0,7	-0,1	4,1
17	-1,1	-0,7	-0,1	4,2
18	-1,1	-0,7	-0,0	4,3
19	-1,1	-0,7	-0,0	4,4
20	-1,1	-0,7	0,0	4,5
21	-1,1	-0,7	0,0	4,6
22	-1,1	-0,7	0,1	4,8
23	-1,1	-0,7	0,1	4,9
24	-1,1	-0,7	0,2	5,1
25	-1,1	-0,7	0,2	5,3
26	-1,1	-0,7	0,3	5,6
27	-1,1	-0,7	0,4	5,9
28	-1,1	-0,7	0,5	6,3
29	-1,1	-0,7	0,6	6,9
30	-1,1	-0,6	0,8	7,7

Wärmeaufnahme Sonde gesamt W	Temperaturspitzung K
100	0,5

Monatswerte

Simulations- jahr	Monat	Sonnenwärme kWh	Erdwärme kWh	Sondenarbeit kWh		
1	1	-114	0	37		
1	2	25	1	31		
1	3	26	2	28		
1	4	54	4	18		
1	5	101	6	6		
1	6	65	7	-39		
1	7	24	6	-40		
1	8	18	3	-40		
1	9	-48	-1	3		
1	10	-36	-4	16		
1	11	-63	-7	27		
1	12	-40	-7	34		
Jahressummen:		14	10	80	Bilanz:	-56 kWh
Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:						2204 kWh
2	1	-70	-6	37		
2	2	34	-2	31		
2	3	31	1	28		
2	4	56	4	18		
2	5	103	6	6		
2	6	66	7	-39		
2	7	25	7	-40		
2	8	19	4	-40		
2	9	-47	-0	3		
2	10	-35	-4	16		
2	11	-63	-6	27		
2	12	-40	-7	34		
Jahressummen:		78	2	80	Bilanz:	0 kWh
Speicherzustand am Ende des Jahres bezogen auf -10 °C:						2202 kWh

- Die **jährliche** Gesamtsondenarbeit liegt bei ca. 80 kWh. Gefordert ist eine Heizarbeit von $100 \text{ W} \times 1997 \text{ h} = 200 \text{ kWh}$ und eine Kühlarbeit von $-100 \text{ W} \times 1196 \text{ h} = -120 \text{ kWh}$. Damit verbleibt ein positiver Wärmeentzug von 80 kWh, der durch die programminterne "Leistungsregelung" in sehr guter Näherung realisiert wird.
- Die von oben und unten in das Simulationsgebiet strömende Wärme ist aufgrund der Leistungskompensation (Heizen und Kühlen) stark reduziert. Von oben fließen nur noch 45 % gegenüber Beispiel_Korb_1 ins Simulationsgebiet.

Aussagen zu den nachfolgenden Bildern 5.9 bis 5.12:

- Vergleicht man die bei der geforderten Sondenleistung von 100 W erforderlichen Soletemperaturen zur letzten Betriebsstunde des Jahres von Beispiel_Korb_1 mit Beispiel_Korb_2, so folgt aufgrund der sommerlichen Beladung nur eine Erhöhung um 0,4 K von -1,6 / -1,1 °C auf -1,2 / -0,6 °C. Damit macht sich der sommerliche Wärmeeintrag nur gering bemerkbar.
- Die sommerliche Wärmeeinleitung ins Erdreich reduziert die Wärmeaufnahme an solarer Energie, sie sinkt an der Simulationsoberfläche beispielsweise von 172 kWh auf 78 kWh (45 %).
- Eine bessere Lösung wäre eine teilweise Regeneration des Erdreiches während der Heizperiode. Analoge Vorteile sind beispielsweise erkennbar aus [2], Anhang Seite A14.
- Um die sommerliche Kälteleistung (-100 W) ins Erdreich zu verbringen, bedarf es relativ hoher Soletemperaturen (bis über 25 °C). Damit ist eine direkte Bauteilkühlung nicht möglich.
- Das Simulationsmodell regelt die Wärme- zu -abfuhr durch den Sondenkorb exakt, wie Bild 5.12 verdeutlicht.

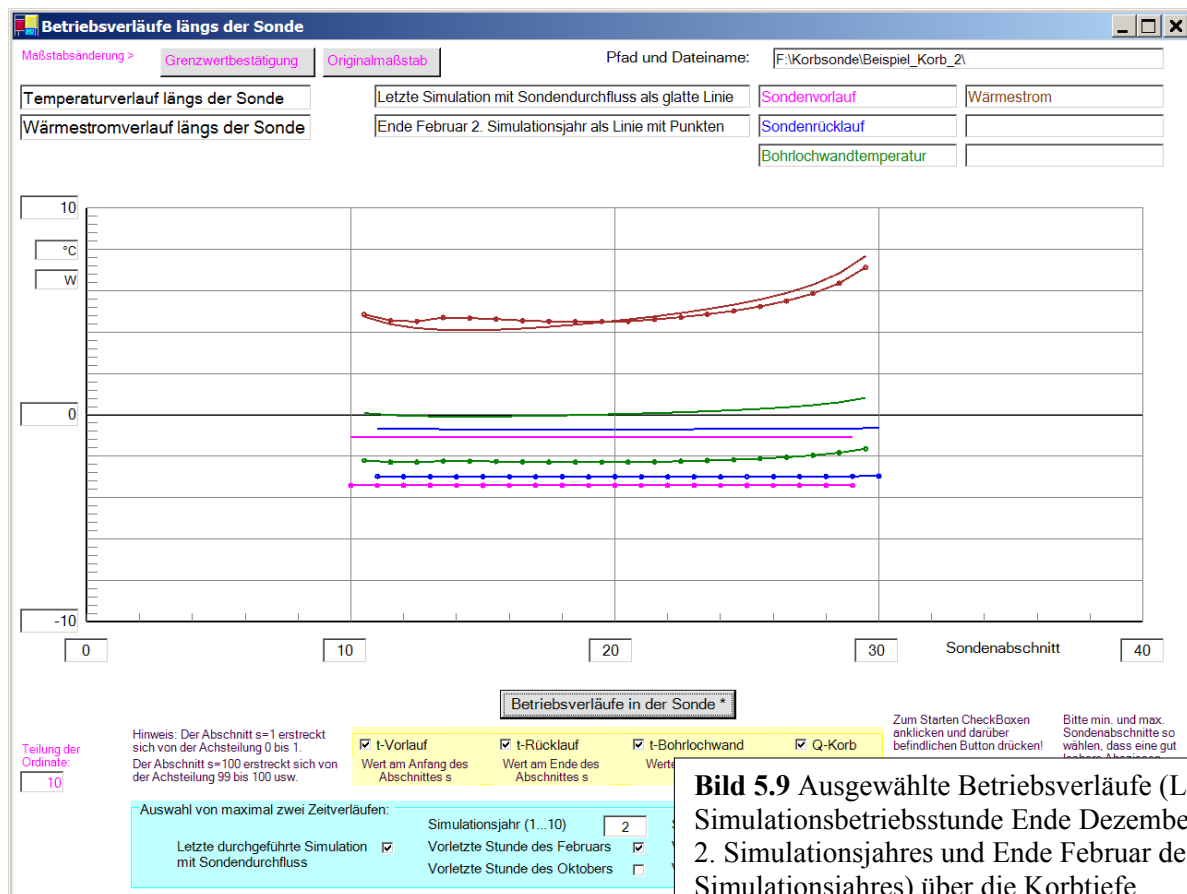


Bild 5.9 Ausgewählte Betriebsverläufe (Letzte Simulationsbetriebsstunde Ende Dezember des 2. Simulationsjahres und Ende Februar des 2. Simulationsjahres) über die Korbteufe

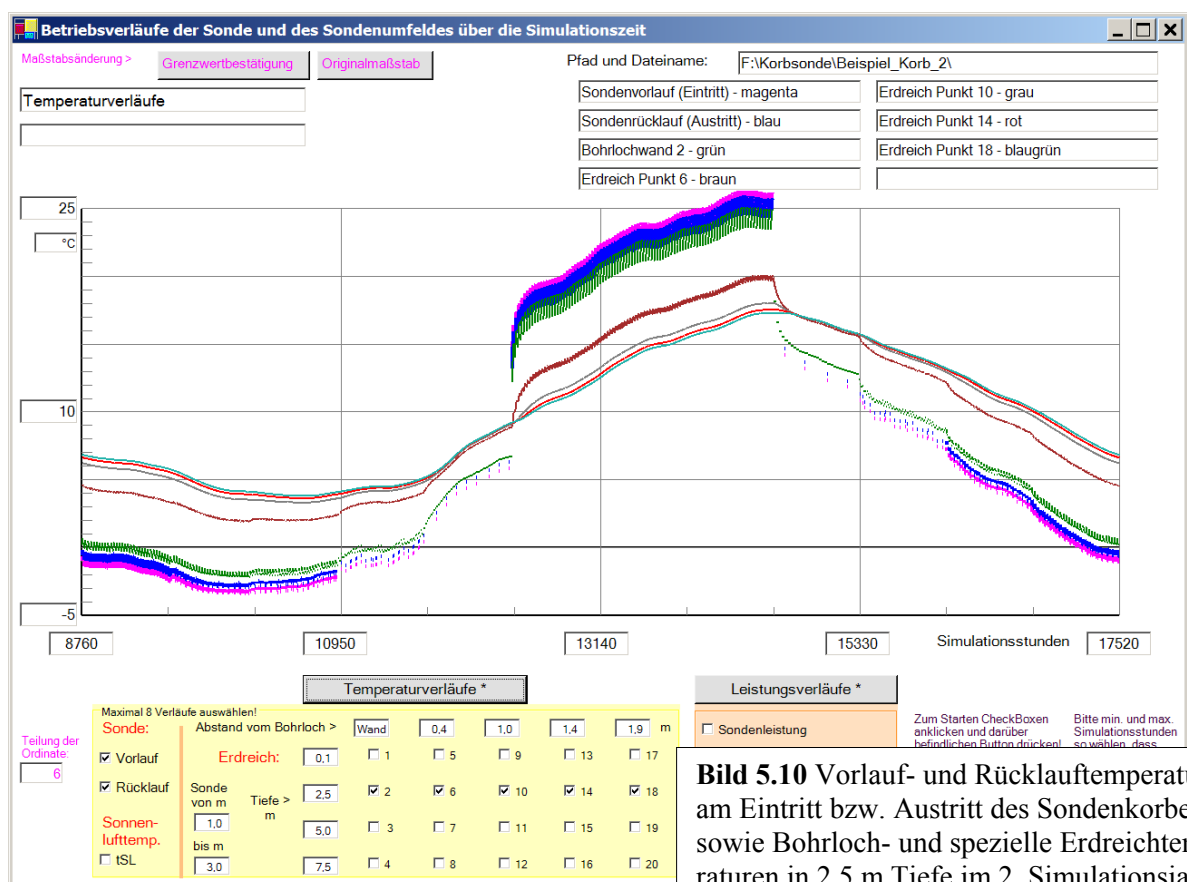


Bild 5.10 Vorlauf- und Rücklaufftemperaturen am Eintritt bzw. Austritt des Sondenkorbes sowie Bohrloch- und spezielle Erdreichtemperaturen in 2,5 m Tiefe im 2. Simulationsjahr

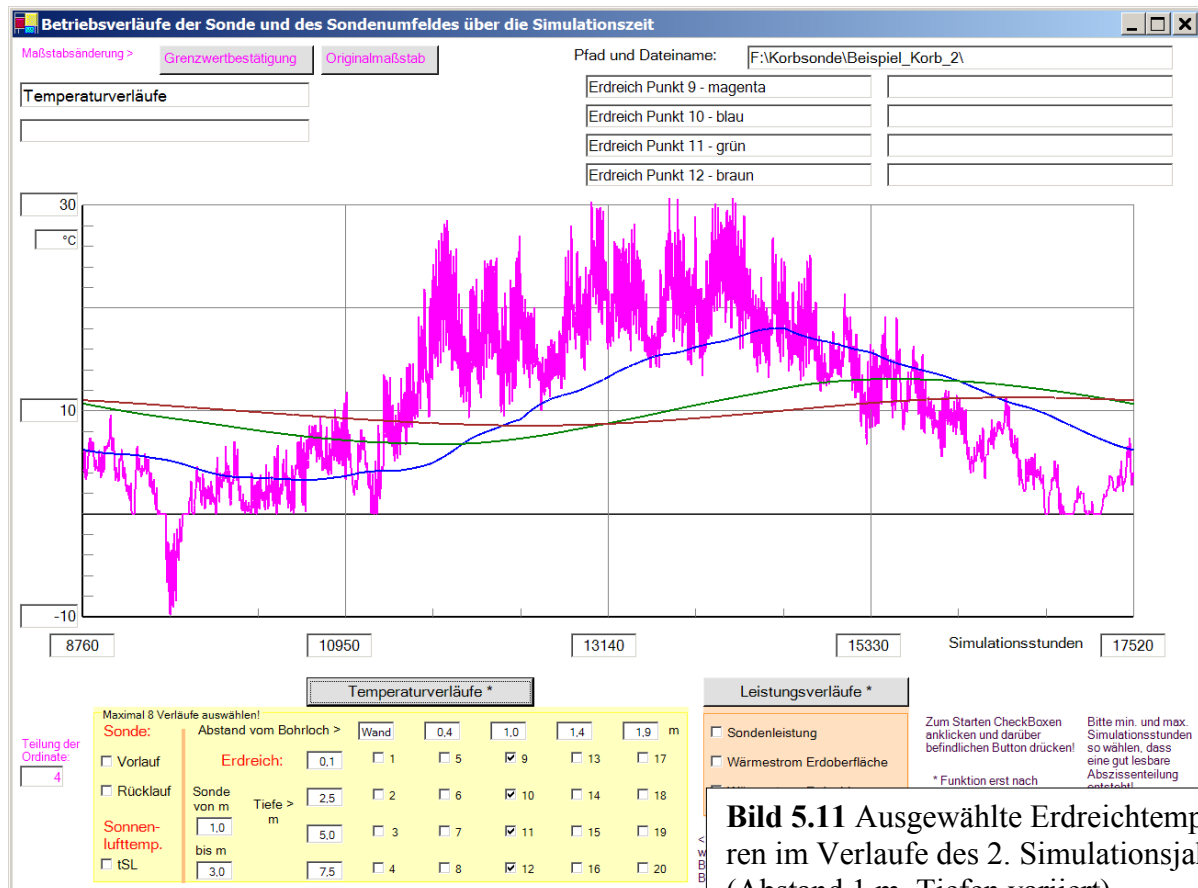


Bild 5.11 Ausgewählte Erdreichtemperaturen im Verlaufe des 2. Simulationsjahres (Abstand 1 m, Tiefen variiert)

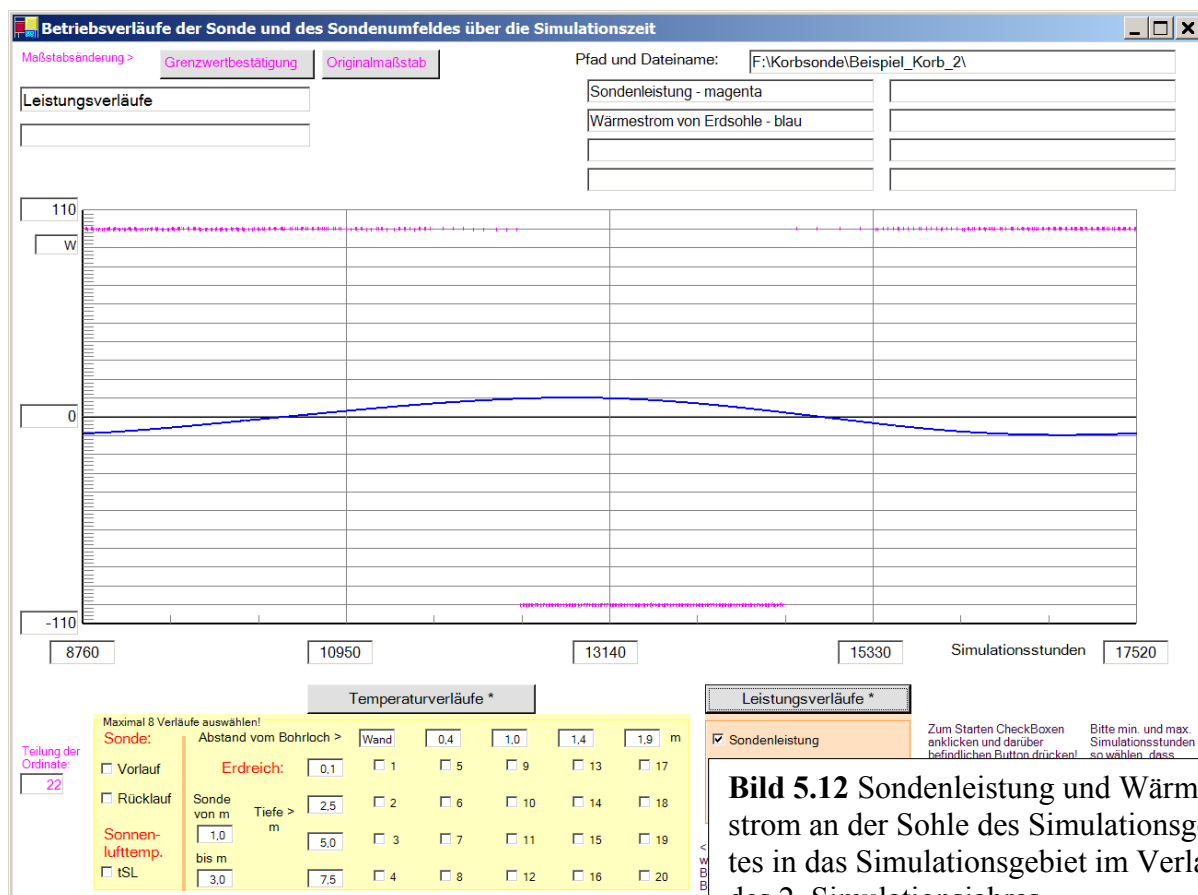


Bild 5.12 Sondenleistung und Wärmestrom an der Sohle des Simulationsgebietes in das Simulationsgebiet im Verlaufe des 2. Simulationsjahres

Literatur

[1] GLÜCK, B.: Simulationsmodell "Erdwärmesonden".

Kostenlos erhältlich unter:

<http://www.berndglueck.de/Erdwaermesonde>

(Siehe "Bericht_Erdwaermesonde" und Programme: "Form" und "Sonde")

[2] GLÜCK, B.: Simulationsmodell "Erdwärmekollektor".

Kostenlos erhältlich unter:

<http://www.berndglueck.de/Erdwaermekollektor>

(Siehe "Bericht_Erdwaermekollektor" und Programm "Kollektor")

Im Bericht ist der Anhang

"Wärmetechnischer Vergleich von Erdwärmekollektoren unterschiedlicher Bauart und
Vorschläge für einen kombinierten Betrieb mit Luft-Umweltenergieaufnehmern"
eingeschlossen.