

Beschreibung des instationären Wärmeentzugs aus dem Erdreich und der Regeneration des Erdreichs mittels eines eindimensionalen Erdreichkollektormodells

P. KLANATSKY, CH. HESCHL

Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: With the established energy labeling scheme and the Nearly Zero Energy Building Standard the integration of combined regenerative energy systems become more important for the power supply of buildings. In this context remarkable system configurations are hybrid PV collectors with ground coupled heat pumps. The PV hybrid collector, which is a combination of a thermal solar collector and a PV module, can be used to regenerate the near surface ground collector. The regeneration of the near surface ground collector will increase the temperatures of the heat source and at the same time the PV hybrid module will be cooled. A higher efficiency of the heat pump and electric energy production of the PV hybrid module should be the result of this system combination.

To have knowledge about the interactions of the systems PV hybrid module, near surface ground collector and heat pump a transient simulation tool is necessary. In this paper a transient one-dimensional simulation model to calculate the water and energy transport in subsurface soils will be described. The developed transient one-dimensional simulation model to calculate the water and energy transport in subsurface soils considers also a horizontal near surface ground collector model, which is based on the model of Koschenz und Dorer (1999) to calculate the interaction of an air system with concrete core conditioning. In combination with transient simulation models from literature for PV hybrid modules and heat pumps the influences of irradiation, air temperature, precipitation, soil characteristic, laying depth and spacing of the horizontal near surface ground collector, groundwater level on the brine outlet temperature can be shown.

The validation of the developed transient and one-dimensional simulation model with measurement data of an existing near surface ground collector and heat pump system shows that the differences of the calculated and measured brine temperature on the outlet of the ground collector are up to 3 K. A possible reason therefore is the missing consideration of the heat of fusion because of the used horizontal near surface ground collector model. Further reasons are multidimensional effects like the soil characteristic, laying depth of the ground collector, spacing between the pipes of the ground collector, soil structure, soil material and terrain profile. Further investigations (adaption of the used horizontal near surface ground collector model) are necessary to consider the heat of fusion and therefore to improve the accuracy of the simulation model.

1. EINLEITUNG

Die Rahmenbedingungen der Ökodesign-Richtlinie führten zwangsläufig zur Priorisierung der Systembetrachtung von energieverbrauchsrelevanten Produkten. Spätestens mit der Einführung des Systemlabels für Wärmepumpenanlagen ab 26.9.2015 sind die damit verbundenen Auswirkungen auch beim Endkunden erkennbar. Weitere Rahmenbedingungen wie die bevorstehende Etablierung des „Nearly Zero Energy Building Standards“ unterstreichen den Trend von der Einzelprodukt- zu einer Gesamtsystementwicklung. Vielversprechende Konzepte umfassen dabei Systemkombinationen bestehend aus einer Photovoltaikanlage, hybride Speichertechnologien und einer Wärmepumpenanlage. Als besonders Energieeffizient gelten dabei Kombinationen aus PV-, Solarthermie- und Wärmepumpenanlagen in Verbindung mit Erd-

wärmetauschersystemen zum thermischen Lastausgleich ähnlich eingebunden wie bei den Anergienetzen. Aufgrund der großen Anzahl an regelungstechnischen und hydraulischen Freiheitsgraden sowie der Komplexität der Subsysteme stellt die Optimierung des Gesamtsystems eine große Herausforderung dar. Dies wird zudem durch das Fehlen geeigneter Simulationsmodelle, zur genauen Beschreibung des instationären wärmetechnischen Verhaltens von oberflächennahen Erdwärmetauschersystemen, erschwert.

Innerhalb dieser Arbeit wird daher ein vereinfachtes, dynamisches 1D-Erdreichkollektormodell vorgestellt, welches das zeitliche Profil der Soletemperatur am Austritt des Erdreichflachkollektors in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften, der Klima- und Strahlungsdaten, des Grundwasserspiegels des stehenden Grundwassers, der Soletemperatur am Eintritt des Erdreichflachkollektors, des Solemassenstroms, der Zusammensetzung der Sole und der geometrischen Daten des Erdreichflachkollektors (Verlegetiefe, Verlegeabstand, Rohrdimension und -material) beinhaltet. Dabei beschreibt dieser Beitrag die gewählten Modellansätze und Vereinfachungen, die Schließungsproblematik und die wichtigsten Einflussgrößen (wie z.B. Erdreischeigenschaften) zur Lösung des eindimensionalen gekoppelten Wasser- und Wärmetransportes im Erdreich.

Die prinzipiellen Grundlagen zum Bodenaufbau, Wassertransport in der gesättigten und ungesättigten Zone sowie zum Verdunstungsprozess im oberen Bereich des Erdreichs sind in der Literatur oftmals angeführt und werden daher innerhalb dieses Beitrags nicht nochmals angeführt. An dieser Stelle wird daher auf Allen et al. (1998), Becker (2010), Blume et al. (2010), Bort (2002), Chung und Horton (1987), Drohmann (2009), Forkel (2004), Gaßmann (2005), Häckel (1999), Hartge (1978), Haude (1955), Lettner (2001), Märker (2008), Mohrlök (2009), Nofziger und Wu (2003), Ramming (2007), Schwedt (1996), Starke (2005) sowie Stöfen (2005) verwiesen.

2. MATHEMATISCHES MODELL (UNGESTÖRTES ERDREICH)

2.1 ERHALTUNGSGLEICHUNG ZUR BESCHREIBUNG DES WASSERTRANSPORTES IM UNGESÄTTIGTEN ERDREICH (RICHARDS-GLEICHUNG)

Als Grundlage für die Simulation des Wassertransportes in der ungesättigten Zone wird die Richards-Gleichung herangezogen (vgl. COMSOL 2008). Für die eindimensionale Betrachtung (in z-Richtung) vereinfacht sich die Richards-Gleichung zur Simulation des Wassertransportes in der ungesättigten Zone folgendermaßen (vgl. Ratz 2013 und Goldsteiner 2015):

$$\delta_{is} \left(\frac{C}{\rho_f g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\kappa_s}{\eta} k_r \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho_f g \right) \right] = Q_s \quad (1)$$

mit

δ_{is}	[-].....	Zeit-Skalierungskoeffizient
C	[1/m].....	spezifische Feuchtekazapazität des Bodens
ρ_f	[kg/m ³].....	Dichte des Wassers bzw. Fluids
g	[m/s ²].....	Erdbeschleunigung
S_e	[-].....	effektive Sättigung des Bodens
S	[1/Pa].....	Speicherkoefizient ($S = \chi_p \cdot (1 - \theta_s) + \chi_f \cdot \theta_s$)
p	[Pa].....	Druck im Erdreich
t	[s].....	Zeit

κ_s	[m ²]	Permeabilitätstensor ($\kappa_s = K_s \eta \cdot (\rho_f g)^{-1}$)
K_s	[m/s]	hydraulische Durchlässigkeit bei Sättigung
η	[kg/(m s)] ...	dynamische Viskosität (Wasser)
k_r	[-]	relative Permeabilität
D	[m]	geodätische Höhe
Q_s	[m ³ /s]	volumetrische Flussrate
χ_p	[1/Pa]	Kompressibilität des Korngerüsts
χ_f	[1/Pa]	Kompressibilität des Fluids
θ_s	[m ³ /m ³]	volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung

Zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts des Bodens θ , der effektiven Sättigung des Bodens S_o , der spezifischen Feuchtekapazität des Bodens C und der relativen Permeabilität des Bodens k_r , werden in der Literatur unterschiedliche Schließungsansätze angeführt (z.B. van Genuchten 1980, Brooks und Corey 1966). Der in dieser Arbeit verwendete Schließungsansatz nach van Genuchten (1980) beruht auf der Annahme, dass die Sättigung des Erdreichs vorliegt, wenn der Druck des Fluids (Wasser) dem Atmosphärendruck entspricht.

2.2 ERHALTUNGSGLEICHUNG ZUR BESCHREIBUNG DES WÄRMETRANSPORTS IM ERDREICH

Für den Wärmetransport im Erdreich (ohne Berücksichtigung des Wärmetransports durch Wasserdampfdiffusion sowie der Verdampfungsenthalpie und der Schmelzenthalpie) wird die Gleichung nach Nakhaei und Šimůnek (2014) herangezogen, wobei sich diese für die eindimensionale Betrachtung folgendermaßen vereinfacht:

$$C_t(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w q_w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

mit

C_t	[J/(m ³ K)] ...	volumetrische Gesamtwärmekapazität der Bodenbestandteile (inkl. Fluid)
θ	[m ³ /m ³]	volumetrischer Wassergehalt
T	[K]	Erdreichtemperatur
λ	[W/(m K)] ...	Gesamtwärmeleitfähigkeit der Bodenbestandteile
C_w	[J/(m ³ K)] ...	volumetrische Wärmekapazität des Wassers bzw. des Fluids
q_w	[m/s]	spezifische Durchflussrate (Darcy-Fluss) in z-Richtung

Zur Bestimmung der volumetrischen Gesamtwärmekapazität der Bodenbestandteile wird nach Nakhaei und Šimůnek (2014) die Gleichung (3) herangezogen.

$$C_t(\theta) = C_n \theta_n + C_o \theta_o + C_w \theta_w + C_g \theta_g \quad (3)$$

mit

C [J/(m³ K)] ...volumetrische Wärmekapazität der jeweiligen Fraktion (Index: n...feste Anteile; o...organische Substanzen; w... Wasser; g...Gas)
 θ [m³/m³].....Volumsanteil der jeweiligen Fraktion (Index: n...feste Anteile; o...organische Substanzen; w... Wasser; g...Gas)

Nach de Vries (1975) sind in Tabelle 1 die wichtigsten thermischen Eigenschaften unterschiedlicher Bodenbestandteile aufgelistet:

Tabelle 1: thermische Eigenschaften unterschiedlicher Bodenbestandteile (de Vries, 1975)

Bodenbestandteil	spez. Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität c_v [MJ/(m ³ K)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Quarz	2,66·10 ³	2,12	8,8
Tonminerale	2,65·10 ³	2,01	2,92
org. Substanz	1,30·10 ³	2,51	0,25
Wasser	1,00·10 ³	4,19	0,57
Eis	0,92·10 ³	1,88	2,18
Luft	1,25	0,00126	0,025
Torf			0,2 - 0,7

In dieser Arbeit wird daher für $C_n = 2,055$ MJ/(m³K), $C_o = 2,510$ MJ/(m³K), $C_w = 4,190$ MJ/(m³K) und für $C_g = 0,00126$ MJ/(m³K) berücksichtigt. Der Volumsanteil der festen Anteile sowie der organischen Substanzen und der Volumsanteil von Luft wird folgendermaßen berechnet:

$$\theta_n = \frac{1 - \theta_s}{2}; \quad \theta_o = \frac{1 - \theta_s}{2}; \quad \theta_g = 1 - \theta_n - \theta_o - \theta_w \quad \text{mit} \quad \theta_w = \theta \quad (4)$$

Die Gleichung nach Nakhaei und Šimůnek (2014) für die Berechnung der Gesamtwärmeleitfähigkeit der Bodenbestandteile vereinfacht sich für den eindimensionalen Fall folgendermaßen:

$$\lambda(\theta) = \lambda_{zz}(\theta) = \beta C_w |q| + \lambda_0(\theta) \quad (5)$$

mit

λ_{zz} [W/(m K)] ...Gesamtwärmeleitfähigkeit der Bodenbestandteile (inkl. Fluid)
 β [m]thermische Dispersivität (wird mit $\beta = 1$ angenommen)
 $|q|$ [m/s]Absolutbetrag der spezifischen Durchflussrate (Darcy-Fluss)
 $\lambda_0(\theta)$..[W/(m K)] ...Wärmeleitfähigkeit der Bodenbestandteile (inkl. Fluid, jedoch ohne Strömung)

Für $\lambda_0(\theta)$ kann die folgende Gleichung nach Chung und Horton (1987) verwendet werden:

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0,5} \quad (6)$$

mit

$$b_k \dots [\text{W}/(\text{m K})] \dots \text{empirischer Parameter } (k=1, 2, \text{ oder } 3) \text{ nach Chung und Horton (1987)}$$

Aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung des Bodens wird die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_0(\theta)$ volumsgemittelt:

$$\lambda_0(\theta) = (b_{1,sand} + b_{2,sand}\theta + b_{3,sand}\theta^{0,5}) \cdot \varepsilon_{sand} + (b_{1,clay} + b_{2,clay}\theta + b_{3,clay}\theta^{0,5}) \cdot \varepsilon_{clay} + (b_{1,silt} + b_{2,silt}\theta + b_{3,silt}\theta^{0,5}) \cdot \varepsilon_{silt} \quad (7)$$

mit

$$\varepsilon \dots [\text{m}^3/\text{m}^3] \dots \text{Volumsanteil der Festphase}$$

2.3 HYDRAULISCHE BODENPARAMETER

In der nachfolgenden Tabelle werden die hydraulischen Bodenparameter für zwölf unterschiedliche Böden angeführt. Dabei werden im Wesentlichen die Ergebnisse von Carsel und Parrish (1988) herangezogen:

Tabelle 3: hydraulische Bodenparameter und van Genuchten-Parameter (α , n) nach Carsel und Parrish (1988)

Material*	ε_{sand} [m ³ /m ³]	ε_{clay} [m ³ /m ³]	ε_{silt} [m ³ /m ³]	Θ_s [-]	Θ_r [-]	α [1/cm]	n [-]	K_s [cm/h]
clay	0,149	0,552	0,299	0,380	0,068	0,008	1,09	0,20
clay loam	0,298	0,326	0,376	0,410	0,095	0,019	1,31	0,26
loam	0,400	0,197	0,403	0,430	0,078	0,036	1,56	1,04
loamy sand	0,809	0,064	0,127	0,410	0,057	0,124	2,28	14,59
silt	0,058	0,095	0,847	0,460	0,034	0,016	1,37	0,25
silt loam	0,166	0,185	0,649	0,450	0,067	0,020	1,41	0,45
silty clay	0,061	0,463	0,476	0,360	0,070	0,005	1,09	0,02
silty clay loam	0,076	0,332	0,592	0,430	0,089	0,010	1,23	0,07
sand	0,927	0,029	0,044	0,430	0,045	0,145	2,68	29,70
sandy clay	0,475	0,410	0,115	0,380	0,100	0,027	1,23	0,12
sandy clay loam	0,543	0,274	0,183	0,390	0,100	0,059	1,48	1,31
sandy loam	0,634	0,111	0,255	0,410	0,065	0,075	1,89	4,42

* Die Bezeichnung bzw. Klassifizierung der unterschiedlichen Böden basieren auf die jeweiligen Anteile von „sand“ (Sand), „clay“ (Lehm) und „silt“ (Schlick).

3. BEHANDLUNG DES FLACHKOLLEKTORS IM ERDREICH

Da die in Kapitel 2 angeführten, eindimensionalen Erhaltungsgleichungen mittels der Finiten Volumen Methode diskretisiert wurden, erfolgte - in Anlehnung an die thermische Modellierung von Rohrsystemen im Bauteilkern nach Koschenz und Dorer (1999) - die implizite Implementierung des „Thermo Active Layer“-Modells für einen horizontalen Erdreichkollektor in Form eines „Quellterms“ (Source Term). Die Grundlage für dieses Modell bildete ein thermisches Widerstandsmodell, welches den thermischen Widerstand zwischen dem strömenden Fluid, Rohrrinnenwand, Rohraußenwand und einer fiktiven Kerntemperatur berücksichtigt. Zudem werden die verminderten Wärmeströme durch die Änderung der Fluidtemperatur entlang der Rohrströmung berücksichtigt. Durch das Widerstands- bzw. Kontenmodell erfolgt die Berechnung des effektiven Wärmestroms zwischen dem Fluid im Eintritt des Erdwärmetauschers und der fiktiven Kerntemperatur (core temperature) der thermisch aktiven Berechnungszone (Thermo Active Layer). Wobei die Kerntemperatur mit der Zelltemperatur der thermisch aktiven Berechnungszone übereinstimmt. Über die Höhe der thermisch aktiven Schicht lässt sich dann der äquivalente Quellterm für die Energiegleichung in Abhängigkeit der Zelltemperatur bestimmen.

Zur Validierung des „Source Term“-Modells wurde eine instationäre dreidimensionale CFD-Simulation durchgeführt (FLUENT 3D) und mit den Ergebnissen des vereinfachten Ansatzes (SOURCE TERM MODEL) verglichen. In Abb. 1 ist die dreidimensionale Temperaturverteilung einer soliden Schicht dargestellt. Die Temperaturverteilung ergibt sich aus den Wärmeleitungstransportvorgängen die durch die mäanderförmige Verlegung der Heizungsrohrleitung hervorgerufen wird (Fußbodenheizung).

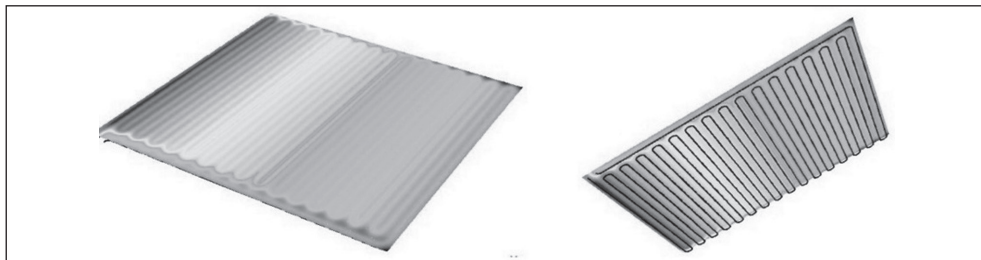


Abb. 1: betrachtetes „thermoaktives Bauteil“ zur Validierung des „Source Term“-Modellansatzes

Zur Verdeutlichung der Funktionalität des „Source Term“-Ansatzes ist in Abb. 2 beispielhaft die gute Übereinstimmung der mittleren Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Berechnungsmodelle (FLUENT 3D vs. SOURCE TERM MODEL) dargestellt.

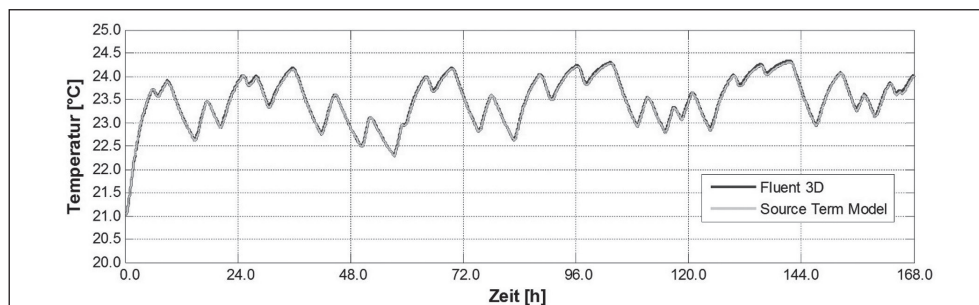


Abb. 2: Vergleich der mittleren Oberflächentemperatur der unterschiedlichen Berechnungsmodelle in Abhängigkeit des Schaltprofils der Pumpe (Ein-/Ausschaltzyklen)

4. VALIDIERUNG OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DER EISBILDUNG IM ERDREICH

Zur Validierung des gewählten, vereinfachten Ansatzes (z.B. Erstarrungs- und Schmelzenthalpien wurden nicht berücksichtigt) wurden die Monitoringdaten einer bestehenden Erdreich-Wärmepumpenanlage (Draxler, 2015) ausgewertet und zusammengefasst sowie die Wetterdaten der ZAMG für die Berechnungen des Standortes Pinkafeld herangezogen. Dabei ist zu bemerken, dass der hierfür gewählte Modellansatz den Feuchtetransport aufgrund des Grundwasserspiegels und der Regenwasserversickerung und den Wärmetransport aufgrund der wetterbedingten Einflussgrößen (solare Einstrahlung, konvektiver Wärmetransport usw.) sowie des Wärmeentzugs und der Wärmezufuhr durch die Wärmepumpenanlage berücksichtigt.

In Abb. 3 ist das Validierungsergebnis in Form einer Gegenüberstellung der Mess- und Simulationsergebnisse für den Validierungsfall dargestellt. Im Wärmepumpenbetrieb kommt es zu maximalen Abweichungen von bis zu ca. 3 K zwischen der berechneten und gemessenen Soleaustrittstemperatur. Da im Experiment die Sensoren zur Erfassung der Soletemperaturen im Heizraum angebracht sind, erwärmt die höhere Heizraumtemperatur nach dem Abschalten der Solepumpe die Rohrleitungen und somit die Temperatursensoren. Dieser Umstand ist durch die deutlich höheren gemessenen Soleaustrittstemperaturen in Abb. 3 erkennbar. Im Falle der Regeneration des Erdreiches (Kühlbetrieb durch die Wärmepumpenanlage, z.B. im Zeitraum zw. 20. und 31. Juli 2006) betragen die Abweichungen des vereinfachten 1D-Modellansatzes max. 0,5 K.

Mögliche Gründe für die Abweichung der Simulationsergebnisse sind z.B. die fehlende Berücksichtigung der Erstarrungs- und Schmelzenthalpie sowie mehrdimensionale Effekte im Experiment (Verlegung des Erdreichflachkollektors, Bodenaufbau, Bodenmaterial, Geländeverlauf, ...). Weiters wurde die Simulation mit 01.01.2005 gestartet (ab diesem Tag lagen die Messergebnisse vor). Aufgrund fehlender Informationen bezüglich der Temperaturen und des Wassergehalts im Erdreich zu diesem Zeitpunkt mussten für die Simulation entsprechende Startwerte angenommen werden. Da mit fortschreitender Simulationsdauer die Abweichung der berechneten Soletemperatur am Kollektorausritt in den Wintermonaten geringer wird, könnten auch die gewählten Startwerte Ursache für die Abweichung sein.

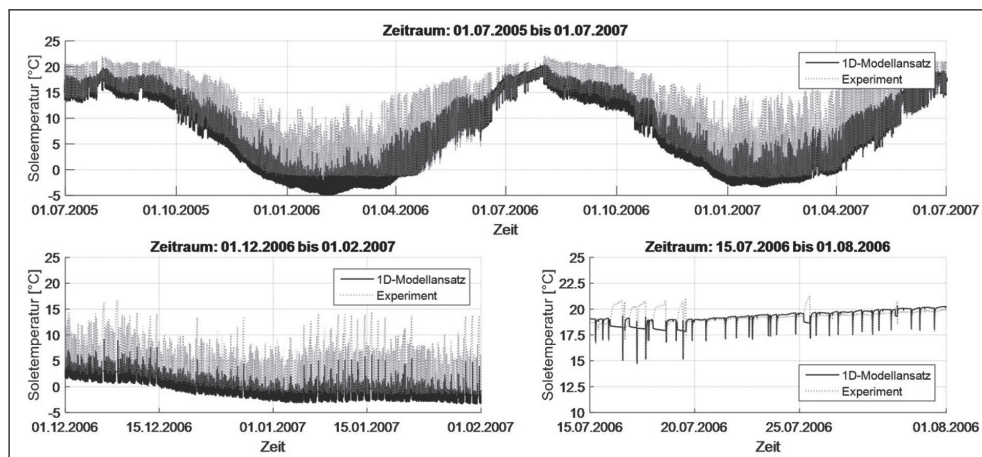


Abb. 3: Vergleich der gemessenen und berechneten Soletemperatur am Kollektorausritt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein vereinfachtes, eindimensionales Erdreichkollektormodell vorgestellt, welches die Beschreibung des Wärmeentzugs aus und der Wärmezufuhr ins Erdreich mittels Erdreichflachkollektoren ermöglicht. Um die erforderlichen Zeitskalen (Ein- und Ausschalzyklen des Erdwärmetauschersystems sind z.T. kleiner als 5 Minuten; die Regeneration des Erdreichs ist erst nach einigen Jahren „eingeschwungen“) in einer vertretbaren Rechenzeit abbilden zu können mussten entsprechende Vereinfachungen getroffen werden. Neben der gewählten eindimensionalen Betrachtung wurde unter anderem aufgrund der Verwendung des „Thermo Active Layer“-Modellansatzes die Erstarrungs- und Schmelzenthalpie in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Der für einen Validierungsfall (reale Wärmepumpenanlage mit Erdreichflachkollektor) durchgeführte Vergleich der experimentellen Daten und der Simulationsergebnisse des angeführten vereinfachten 1D-Modellansatzes zeigt Abweichungen der Soletemperatur am Kollektorausstritt von bis zu ca. 3 K. Diese Abweichungen sollen durch eine zukünftige Weiterentwicklung des „Thermo Active Layer“-Modellansatzes zur Berücksichtigung der Erstarrungs- und Schmelzenthalpie verringert werden und somit die Genauigkeit des entwickelten Simulationsmodells erhöhen.

6. DANKSAGUNG



Das vereinfachte eindimensionale Erdreichkollektormodell wurde im Zuge des Projekts „CoolPV“ (FFG Projekt Nr. 843809) entwickelt. Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „ENERGY MISSION AUSTRIA“ durchgeführt.

LITERATUR

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Rom, http://www.engr.scu.edu/~emaurel/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf, 30.05.2014 15:30 Uhr
- Becker B. P. J. (2010): Zur gekoppelten numerischen Modellierung von unterirdischem Hochwasser, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland
- Blume H.-P., Brümmer G.W., Horn R., Kandler E., Kögel-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 16. Auflage, ISBN: 978-3-8274-1444-1
- Bott W. (2002): Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten, Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
- Brooks R. H., Corey A. T. (1966): Properties of porous media affecting fluid flow, Journal of the irrigation and drainage division, proceedings of the American society of civil engineers, vol. 72 (IR2), pages 61-88
- Carsel R. F., Parrish R. S. (1988): Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics, Water Resources Research, vol. 24, issue 5, pages 755-769
- Chung S. O., Horton R. (1987): Soil heat and water flow with a partial surface mulch, Water Resources Research, vol. 23, issue 12, pages 2175-2186, zitiert in Kodesova et al. (2013)
- COMSOL (2008): Earth Science Module – User's Guide, Version 3.5a, Part number: CM020701, COMSOL Multiphysics, pages 116 - 126
- de Vries D. A. (1975): Heat Transfer in Soils, In: de Vries D. A. & Afgan N. H. (ed.): Heat and Mass Transfer in the Biosphere, pages 5-28; Washington, DC (Scripta Book Co.)

- Draxler E. (2015): persönliche Mitteilung der Erdreichkollektordaten; E-Mail vom 05. Mai 2015, Pinkafeld
- Drohmann M. (2009): Reduzierte-Basis Methoden für ungesättigte Grundwasserströmungen, Diplomarbeit, Institut für Numerische und Angewandte Mathematik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Forkel Ch. (2004): Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis, Grundlagen und Anwendungen, Qualitätsaspekte Shaker, RWTH Aachen, 1. Auflage, November 2004, ISBN:978-3-8322-3082-1
- Gaßmann M. (2005): Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit: Mualem - Van Genuchten – Modell, Proseminar Hydrologie, Albert - Ludwigs - Universität Freiburg, 08.12.2005
- Goldsteiner M. F. (2015): Vergleich numerisch ermittelter und gemessener Temperaturverläufe im Erdreich, Masterarbeit, Masterstudiengang Gebäudetechnik und Gebäudemanagement, Fachhochschule Burgenland GmbH, Studienzentrum Pinkafeld
- Häckel H. (1999): Meteorologie, 4. Auflage, Verlag ULB Lehrbuch, Stuttgart, ISBN: 3-8252-1338-2
- Hartge K. H. (1978): Einführung in die Bodenphysik, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, ISBN: 978-3-4328-9683-0
- Haude W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise, Mittel Deutscher Wetterdienst, Nr. 11, Deutschland, ASIN: B0000BJ4T1
- Koschenz M., Dorer V. (1999) Interaction of an air system with concrete core conditioning, Energy and Buildings, 30, pp. 139-145
- Lettner H. (2001): Bodenphysik, Universität Salzburg (Biophysik), siehe <http://biophysics.sbg.ac.at/>, 30.05.2014 14:40
- Märker M. (2008): Vorlesungsfolien zur Bodenhydrologie / Bodenphysik, Universität Potsdam, Deutschland
- Mohrlok U. (2009): Bilanzmodelle in der Grundwasserhydraulik, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, ISBN: 978-3-8664-4397-6
- Nakhaei M., Šimůnek J. (2014): Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code, Journal of Hydrology and Hydromechanics, vol. 62, issue 1, pages 7-15, http://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/Nakhaei_and_Simunek_JHH_2014.pdf, 30.05.2014 16:30 Uhr
- Nofziger D. L., Wu J. (2003): CHEMFLO - 2000: Interactive Software for Simulating Water and Chemical Movement in Unsaturated Soils, Software Manual, Oklahoma State University, Oklahoma Agricultural Experiment Station, <http://soilphysics.okstate.edu/software/chemflo/chemflo2000/ChemfloManual.pdf>, 30.05.2014 15:20 Uhr
- Ramming K. (2007): Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, TU Dresden
- Ratz K. (2013): Modellierung des Stoff- und Wärmetransports in gesättigten und ungesättigten Zonen, Masterarbeit, Masterstudiengang Gebäudetechnik und Gebäudemanagement, Fachhochschule Burgenland GmbH, Studienzentrum Pinkafeld
- Schwedt G. (1996): Taschenatlas der Umweltchemie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, ISBN: 3-527-30872-5
- Starke B. (2005): Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Dispersion von Dichteströmungen in einem stochastischen Modellaquifer, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Kassel
- Stöfen H. (2005): Entwicklung eines Verfahrens für Sickerwasserprognosen im Sinne der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Dissertation, TU Hamburg-Harburg, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8322-3744-5
- van Genuchten M. Th. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, vol. 44, no. 5, pages 891-898