

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAHE

Fakulta stavebná

Katedra hydrauliky a hydrológie



Teplotný režim horskej pôdy na povodí Uhlířská v Jizerských horách

Temperature regime of montane soil in the Uhlířská catchment in the Jizera Mountains

Bakalárska práca

Študijný program: Stavebné inžinierstvo
Študijný odbor: Inžinierstvo životného prostredia
Autor práce: Peter Blunár
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

Praha 2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Blunár	Jméno: Peter	Osobní číslo: 493640
Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: Inženýrství životního prostředí		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Teplotní režim horské půdy na povodí Uhlířská v Jizerských horách	
Název bakalářské práce anglicky: Temperature regime of montane soil in the Uhlířská catchment in the Jizera Mts	
Pokyny pro vypracování: Zpracování surových dat, vytvoření kontinuální datové řady měřených teplot, základní statistická charakterizace datové řady. Práce se zahraniční literaturou s cílem vytvoření zárodku literární rešerše zadané problematiky. Teplotní profily horské půdy na zkoumané lokalitě. Posouzení relevance měření teploty půdy pomocí teplotních čidel v tenzometrech. Seznámení s modelem S1D, pilotní simulace proudění vody a tepla vybrané vegetační sezóny.	
Seznam doporučené literatury: D. Hillel, Introduction to soil physics, Academic Press; 1st edition, 1982. vědecké články z databází Scopus a Web of Science na základě vlastní rešerše	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Michal Dohnal, PhD.	
Datum zadání bakalářské práce: 20. 2. 2023	Termín odevzdání BP v IS KOS: 22. 5. 2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Pod'akovanie

Chcel by som poďakovať doc. Ing. Michalovi Dohnalovi, Ph.D. za odborné vedenie tejto práce, za množstvo cenných rád a za čas strávený pri konzultáciách. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Veronike Skalovej Ph.D. za poskytnutie dát potrebných pre simulácie modelom S1D. V neposlednom rade by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu počas celého môjho doterajšieho štúdia.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu „Teplotný režim horskej pôdy na povodí Uhlířská v Jizerských horách“ vypracoval samostatne s pomocou vedúceho práce a uviedol som všetky použité zdroje informácií.

V Prahe dňa 22.5.2023

.....

Peter Blunár

Abstrakt

Práca sa zaoberá analýzou meraných pôdných teplôt pomocou teplotných sond a tenzometrov v povodí Uhlířská v Jizerských horách. Riešený je teplotný režim pôdy v oblasti, smer prúdenia tepla v zime a v lete. Je zistené, že počas zimy v pôdnom profile nemrzne, a to pre snehovú pokrývku na povrchu. Ďalej je posúdená kvalita meraní teplôt tenzometrami, ktorá sa preukázala byť veľmi vysoká. Použitý je aj model sínusovej funkcie, ktorý je vhodný na prvotnú aproximáciu teplotného režimu v pôdnom profile. Súčasťou práce je aj simulovanie transportu tepla a pohybu vody v pôdnom profile počas vegetačného obdobia v roku 2018 numerickým modelom S1D. Simulácie uvažujú prúdenie preferenčnými cestami a predpoklad nulového gradientu teploty na spodnom okraji domény. Prezentovaný je simulačný variant A do hĺbky 45 cm pod povrchom a variant B do hĺbky 300 cm, pre ktorý sú formulované tri rôzne scenáre. Výsledky simulácií sú vyhodnotené porovnaním zhody s meranými dátami. V prípade variantu A vyšla zhoda s meraniami veľmi vysoká počas celej vegetačnej sezóny. Pre scenáre variantu B sú zhody nižšie, avšak stále veľmi dobré.

Klíčové slová

teplotný režim pôdy, teplota pôdy, modelovanie teploty, pôdne tenzometre, mrznutie pôdy, fyzikálne modelovanie, model sínusovej funkcie, tlmiaca hĺbka

Abstract

The thesis deals with the analysis of measured soil temperatures by temperature probes and soil water tensiometers in the Uhlířská catchment in the Jizera Mountains. The soil temperature regime at the experimental area, the direction of heat flow in winter and summer season are addressed. It is found that the soil profile does not freeze during winter because of the snow cover on the surface. Additionally, the quality of the temperature measurements by tensiometers is assessed and proven to be very high. A sinusoidal function model is also used and found suitable for an initial approximation of the temperature regime in the soil profile. The study also includes the simulation of heat transport and water flow in the soil profile during the 2018 vegetation season with the S1D numerical model. The simulations consider preferential flow and employ the assumption of a zero-temperature gradient as the bottom boundary condition. Two simulation variants are presented. Variant A to a depth of 45 cm below the surface and variant B to a depth of 300 cm, for which three different scenarios are formulated. The simulation results are compared to the measured data. For variant A, the agreement between simulated and measured temperatures is very high throughout the vegetation season. For the scenarios of variant B the agreement is lower, but still very good.

Key words

soil temperature regime, soil temperature, temperature modelling, soil tensiometers, soil freezing, physical modelling, sinusoidal function model, damping depth

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Materiál a metódy.....	14
2.1	Lokalita.....	14
2.1.1	Jizerské hory.....	14
2.1.2	Povodie Uhlířská	14
2.2	Vybavenie lokality.....	16
2.2.1	Senzor vlhkosti vzduchu CS215.....	16
2.2.2	Teplotná sonda 107.....	16
2.2.3	Tenzometre tlaku pôdnej vody T8.....	17
2.2.4	Riadiaca jednotka a dátový záznamník CR1000.....	18
2.2.5	Ďalšie merania.....	18
2.3	Použité dáta	18
2.4	Teplota pôdy.....	19
2.4.1	Konvekcia.....	19
2.4.2	Kondukcia.....	19
2.4.3	Radiácia.....	19
2.5	Model sínusovej funkcie.....	19
2.6	Model S1D	21
2.6.1	Riadiaca rovnica.....	21
2.6.2	Preferenčné prúdenie.....	23
2.6.3	Intenzita extrakcie.....	23
2.6.4	Prenos tepla.....	23
2.6.5	Počiatočné a okrajové podmienky	24
2.6.6	Časová a priestorová diskretizácia	25
2.6.7	Charakteristika prostredia.....	26
3	Výsledky.....	28

3.1	Základná štatistická analýza.....	28
3.2	Teploty tenzometrov	32
3.3	Výsledky modelu sínusovej funkcie	34
3.4	Výsledky modelu S1D.....	38
3.4.1	Variant A.....	38
3.4.2	Variant B.....	40
4	Záver	46
5	Bibliografia	48
6	Zoznam obrázkov	50
7	Zoznam tabuliek.....	52
8	Zoznam rovníc.....	52
9	Prílohy.....	53

1 Úvod

Teplota pôdy je významným faktorom, ktorý ovplyvňuje biologické, chemické aj fyzikálne procesy v pôde (Onwuka, 2016). Na teplote pôdy môže závisieť napríklad príjem živín rastlín (Pregitzer & King, 2005) alebo produkcia emisií CO₂ pôdou (Li et al., 2013). Zároveň sú pôdna teplota a jej meniace sa trendy v čase dôležitými ukazovateľmi klimatických zmien (Qian et al., 2011). V minulosti nebola teplota pôdy skúmaná do takej miery, ako napríklad jej vlhkosť. To bolo predovšetkým z dôvodu, že vlhkosť je hlavnou charakteristickou pôdy, ktorá sa dá ovplyvniť (napr. zavlažovaním), na rozdiel od teploty. V nedávnej minulosti sa záujem o merania a modelovania teplôt a tepelných tokov v pôde zvýšil. Jedným z dôvodov bola potreba zlepšenia výsledkov modelov klímy, evapotranspirácie či rastu rastlín, ktoré vyžadujú zlepšené meranie alebo modelovanie teplotného režimu pôdy (Buchan, 2001).

Väčšina numerických modelov, ktoré simulujú teplotu pôdy, je založená na teórii pohybu vlhkosti v pórovitom prostredí (Philip & de Vries, 1957). V takom prípade je tepelná vodivosť pôdy závislá na vlhkosti pôdy, ktorá môže byť definovaná ako jednoduchšia lineárna funkcia alebo ako komplexnejšia nelineárna závislosť.

Vlhkosť pôdy ovplyvňujú dva hlavné faktory. Evapotranspirácia, ktorá pôsobí na povrchu a vo vrchných vrstvách pôdy, kde sú zakorenené rastliny. Významnou súčasťou uvažovania evapotranspirácie je koreňová extrakcia s kompenzačným mechanizmom, ktorý umožňuje koreňom kompenzovať malý príjem vody v suchých vrstvách zvýšením príjmu z vlhkých vrstiev (Hasegawa et al., 1982). Druhým faktorom je uvažovanie preferenčného prúdenia v pôdnom profile. To spôsobuje významne rýchlejšie vsakovanie vody a jej odtok cez pôdny profil (Kung et al., 2000).

Cieľom tejto práce je na základe dát meraných teplotnými sondami 107 vyhodnotiť teplotný režim lokálneho pôdneho profilu. Sondy nainštalované v blízkosti meteostanice Uhlířská v roku 2017 merajú teploty pôdy na povrchu a v hĺbkach 15, 30 a 45 cm. Následne sú tieto dáta využité na overenie spoľahlivosti meraní teplôt pôdy pomocou tenzometrov T8, ktoré merajú primárne tlak pôdnej vody. Ďalej je analyzovaný model sínusovej funkcie na aproximáciu priebehu teploty v pôdnom profile a na jeho povrchu.

Nakoniec, sú v tejto práci simulované priebehy teploty v riešenom pôdnom profile počas vegetačnej sezóny v roku 2018 v Jizerských horách. Simulácie sú vypočítané pomocou numerického modelu S1D, ktorý uvažuje s duálnym prostredím tvoreným pôdnou maticou a preferenčnými cestami. Zároveň model umožňuje výpar z pôdy a odber vody koreňmi rastlín. Výsledky simulácie sú následne porovnané s meranými dátami.

2 Materiál a metódy

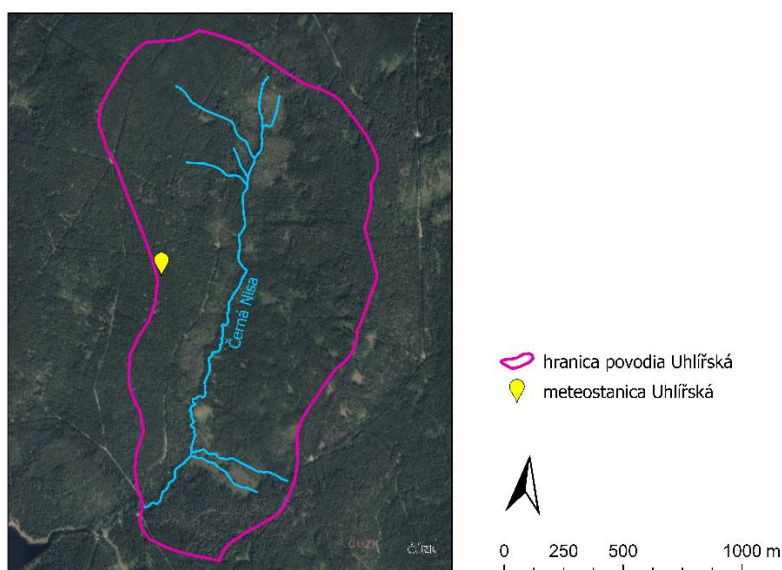
2.1 Lokalita

2.1.1 Jizerské hory

Jizerské hory sú najsevernejším českým pohorím, ktorého východná časť zasahuje do Poľska. Z východnej strany pohoria ležia Krkonoše a zo západu susedia s Lužickými horami. Najvyšším vrchom je Wysoka kopa, ktorý sa nachádza v poľskej časti hôr a má výšku 1126 m n. m. Pre českú časť územia je najvyšším vrcholom Smrk, ktorý má 1124 m n. m. V roku 1968 bola väčšina územia (368 km² zo 417 km²) vyhlásená za chránenú krajinnú oblasť (Jizerky, 2023).

2.1.2 Povodie Uhlířská

Experimentálne povodie Uhlířská sa nachádza v západnej časti Jizerských hôr. S rozlohou 1,8 km² je najmenším zo siedmich experimentálnych povodií v Jizerských horách, ktoré boli založené v 80-tych rokoch minulého storočia z iniciatívy Ministerstva lesného a vodného hospodárstva ČSR. Pôvodným účelom bolo štúdium vplyvu odlesnenia na hydrologickú bilanciu v lesných povodiach. Odlesnenie v oblasti bolo spôsobené hlavne vysokým obsahom emisií oxidu siričitého z tepelných elektrární v Nemecku a Poľsku (Slodičák M. et al., 2005). Následne v 90-tych rokoch v oblasti prebehlo opätovné zalesnenie.



Obrázok 1 Povodie Uhlířská (Podklady: ČÚZK, 2023; VÚV TGM, 2023)

Postupom času sa účel rozšíril aj na zdroj pre jedinečné školiace a výskumné dáta. Ďalší výskum sa stále zaoberal odlesnením, ale aj napríklad vplyvom klimatických zmien na hydrologickú bilanciu, dopadom kyslých dažďov, pohybom vody v pôde a vplyvom vlastností pôdy na tok vody. V povodí sa nachádza niekoľko staníc pre rôzne merania. V tejto práci boli použité dáta z meteostanice na rozvodnici, ktorej poloha je zobrazená na obrázku 1.

Povodie leží na rieke Černá Nisa, kde je dĺžka toku spolu so všetkými jeho prítokmi 4 248 m. Uzáver povodia je umiestnený približne 300 m nad vtokom do vodnej nádrže Bedřichov, ktorá sa nachádza 7 km severovýchodne od mesta Liberec. Priemerná nadmorská výška povodia je 818 m n. m. a s priemerným sklonom 8,35 % sa jedná o najmiernejšie zo siedmich povodí Jizerských hôr. Ročná priemerná teplota je 6,4 °C a celková ročná zrážková hodnota je 1140 mm (pre časovú periódu 2016 – 2021). V spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavom tu vedie výskum České vysoké učení technické, Česká geologická služba (ČGS) a Akadémia vied Českej republiky (Ducháček, 2015).



Obrázok 2 Meteostanica Uhlířská (Fotografia: Jana Votrubová, 2023)

Horninové podložie lokality je zo stredne zrnitého, výrazne porfyrického, biotitického granitu, ktorý je súčasťou Českého masívu (ČGS, 2023). V povodí sa nachádzajú dva rôzne pôdne profily, z ktorých jeden je na dne údolia a druhý na svahoch.

Vo svahoch sa nachádza profil hnedých, kyslých pôd, ktorých textúra je hlinito-piesková až pieskovo-hlinitá. Celková mocnosť pôdneho profilu je v rozmedzí 60-90 cm. Skladá sa z 5 cm vrstvy humusu, 20-25 cm čiernohnedého Ah horizontu, 20-25 cm hnedého Bv horizontu a 20-50 cm svetlo hnedého C horizontu. V niektorých miestach sa môže nachádzať medzi horizontami Ah a Bv prechodná vrstva oglejeného materiálu hrubá 5-10 cm. Mocnosť pôdneho profilu sa mení od rozvodnice po päť svahu takmer lineárne, kedy narastá hrúbka horizontu Bv, zatiaľ čo ostatné sa nemenia.

Na dne údolia sa nachádza profil tvorený prevažne 10-15 cm rašelinným humusom, pod ktorým sa nachádza rašelina s mocnosťou 10-350 cm (Tachecí, 2002).

2.2 Vybavenie lokality

2.2.1 Senzor vlhkosti vzduchu CS215

Pre meranie teplôt vo vzduchu vo výškach 200 cm a 5 cm nad povrchom je v meteorologickej lokalite používaný senzor na meranie teploty a vlhkosti vzduchu CS215 od spoločnosti Campbell Scientific. Senzor používa snímací element Sensirion SHT75, ktorý zaisťuje meracie rozpätie od -40 do +70 °C. Meranie teploty je zaznamenávané na dve desatinné miesta s presnosťou 0,3 ° pri 25 °C a 0,9 °C v celkovom rozsahu. CS215 meria aj relatívnu vlhkosť v rozmedzí 0 – 100 % pri teplotách -20 až +60 °C (Campbell Scientific, 2023a).

2.2.2 Teplotná sonda 107

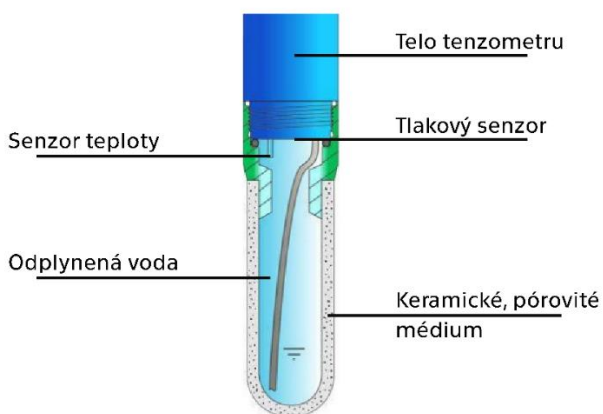
Na povrchu pôdy a v hĺbkach 15, 30 a 45 cm sú na meranie teplôt využívané teplotné sondy 107 od Campbell Scientific. Sondy využívajú senzor BetaTherm 100K6A11A termistor, ktorý je v hliníkovom puzdre vyplnenom epoxidom. Celkové rozpätie merateľnej teploty je od -35 do +50 °C s presnosťou 0,2 °C (Campbell Scientific, 2023b). Všetky sondy boli nainštalované 19.06.2017, z toho tie v hĺbkach 0, 15 a 30 cm do neporušenej pôdy a sonda v 45 cm pod povrchom do porušenej.



Obrázok 3 Inštalácia teplotných sond 107 (Fotografia: Michal Dohnal, 2017)

2.2.3 Tenzometre tlaku pôdnej vody T8

Teploty v experimentálnom povodí sú merané aj tenzometrami od spoločnosti UMS (v súčasnosti METER Group Inc.), ktoré sú inštalované v troch rôznych hĺbkach: 21, 34, 51 cm. Primárnou funkciou tenzometrov je meranie vodného tlaku v pôde. Rozpätie merania je od -85 kPa do 100 kPa s presnosťou 0,5 kPa. Kontakt medzi vodou v pôde a v tenzometre je zabezpečený pórovitým a priepustným keramickým médiom. Tenzometer meria teplotu pôdy s presnosťou 0,2 °C v rozmedzí -10 až 10 °C a s presnosťou 0,5 °C od -30 do 70 °C (MeterGroup, 2023).



Obrázok 4 Schéma hlavice tenzometru T8 (MeterGroup, 2023)

2.2.4 Riadiaca jednotka a dátový záznamník CR1000

Pre zápis dát je v lokalite použitý dátový záznamník CR1000 od spoločnosti Campbell Scientific. Ten je určený do nekondenzujúceho prostredia, kde sa teplota pohybuje v rozmedzí -25 až +50 °C. Zariadenie vyžaduje napájanie 9,6–16 Vdc a je preň odporúčaná kalibrácia každé tri roky. Do záznamníku sú napojené všetky meracie zariadenia a ich dáta sú zaznamenávané každých 10 minút (Campbell Scientific, 2023c).

2.2.5 Ďalšie merania

V meteorologickej lokalite sú okrem zmienených veličín merané aj zložky radiačnej bilancie. Na to je nainštalovaný pyranometer CMP3 od Kipp & Zonen pre krátkovlnné žiarenie a pyrgeometer CGR3 od Kipp & Zonen pre dlhovlnné žiarenie. Meria sa aj rýchlosť vetru anemometrom A100LK od Vector Instruments a kvapalnú zrážku zrážkomerom MR3 od MeteoServis.

2.3 Použité dáta

Celkový časový rad dát použitých pre analýzu bol od 19.06.2017 (kedy boli teplotné sondy nainštalované) do 05.10.2022. Dostupné dáta sú v meteostanici zapisované každých 10 minút. V práci boli použité dáta teplôt pôdy z tenzometrov a z teplotných sond a teplôt vzduchu v 200 cm a v 5 cm nad povrchom.

Počas celého analyzovaného obdobia boli teplotné sondy v pôde aj tenzometre T8 funkčné a nemali žiadne výpadky.

Digitálny senzor CS215 v 200 cm nad povrchom mal počas analyzovaného obdobia 5 výpadkov merania. Prvý bol 06.05.2019, kedy chýbajú dva záznamy teploty. Ďalšie 2 chýbajúce hodnoty sú z 27.01.2020, a to v časoch 17:40 a 18:40. Výrazne dlhší výpadok bol od 28.01.2020 do 09.06.2020. Predposledným chýbajúcim časovým úsekom je trojmesačné obdobie od 05.02.2021 do 04.05.2021. Posledný výpadok senzoru bol 14.06.2021, kedy neboli zaznamenávané teploty od 9:30 do 13:10.

Záznamník mal celkovo dva výpadky. Prvý v lete 09.06.2020, kedy bola vykonávaná údržba meteostanice a chýbajú 4 záznamy od 9:10 do 9:40. Druhý výpadok nastal na prelome apríla a mája 2021, kedy záznamník nezapisoval dáta 5 dní, a to od 23:10 30.04. do 8:40 04.05.

V prípade vstupov do modelu S1D boli použité dáta, ktoré boli spracované Ing. Veronikou Skalovou v rámci jej dizertačnej práce na ČVUT. Hodinové zrážkové dáta boli upravené podľa modifikovaného Liu intercepčného modelu. Pre hodnoty výparu cez korene boli použité intenzity aktuálnej evapotranspirácie, ktoré boli získané z potencionálnej evapotranspirácie vypočítanej pomocou Penmanovej-Monteithovej rovnice a z predpokladu izohydrického správania vegetácie (Skalová et al., 2022).

2.4 Teplota pôdy

K procesu výmeny tepla dochádza medzi objektami s rôznymi teplotami. V tomto prípade sa snažia objekty dostať do rovnováhy, a to prenosom teploty od objektov s vyššou teplotou k objektom s nižšou teplotou. Z hľadiska hlavného princípu sa prúdenie energie delí do troch hlavných skupín (Hillel, 2004).

2.4.1 Konvekcia

Prvý princíp, konvekcia, využíva pre prenos tepla tekuté médium, ktoré obteká objekty. V prípade teplotného režimu v pôde môže byť týmto médium napríklad voda, ktorá natečie do pôdneho profilu.

2.4.2 Kondukcia

Druhým princípom je prenos energie vo vnútri objektu na mikroskopickej úrovni, kde dochádza k zrážkam rýchlo sa pohybujúcich molekúl, ktoré si predávajú energiu. V pôde je to hlavný spôsob, ako sa teplo prenáša medzi povrchom a hlbšími vrstvami.

2.4.3 Radiácia

Princíp radiácie je založený na vyžarovaní a pohybe elektromagnetických vln. Teda oproti prvým dvom spôsobom nepotrebuje prenosné médium. Môže to byť napríklad ohrievanie povrchu pôdy slnečným žiarením.

2.5 Model sínusovej funkcie

Prenos teploty v pôde počas dňa je možné opísať sínusovou funkciou, ktorá celý priebeh teploty v pôdnom profile výrazne zjednodušuje a môže poslúžiť ako prvotná aproximácia teplotného režimu v pôde. Táto funkcia sa dá zapísať pre teplotu na povrchu pôdy nasledovne:

$$T(0, t) = T_{ave} + A_0 \sin \omega t \quad (1)$$

kde:

T_{ave} – priemerná teplota na povrchu [°C]

A_0 – amplitúda teploty na povrchu [°C]

ω – radiálna frekvencia – 2π /skutočná frekvencia [s^{-1}]

t – čas [s]

Amplitúda vyjadruje rozdiel medzi maximálnou, resp. minimálnou teplotou a priemernou teplotou. Priemerná teplota je základná hodnota, na ktorej sínus začína a končí v časovom úseku 24 hodín.

Za predpokladu, že vo všetkých hĺbkach je rovnaká priemerná teplota T_{ave} , sa dá vypočítať sínusová funkcia pre akúkoľvek zvolenú hĺbku z [cm], a to pomocou rovnice:

$$T(z, t) = T_{ave} + A_0 [\sin(\omega t - z/d)] / e^{-z/d} \quad (2)$$

kde:

d – tlmiaca hĺbka [cm]

Hodnota d je hĺbka v profile, kde sa sínusová amplitúda rovná 0,37 násobku amplitúde na povrchu ($1/e \cdot A_0$). Tlmiaca hĺbka sa dá určiť z tepelných vlastností pôdy a frekvencie kolísania teploty:

$$d = (2\kappa/C\omega)^{1/2} \quad (3)$$

kde:

κ – tepelná vodivosť pôdy [cal/(s cm °C)]

C – tepelná kapacita [cal/(cm³ °C)]

Pre každú hĺbku v profile platí, že jej amplitúda je menšia než A_0 , čo v rovnici vyjadruje vzťah $e^{-z/d}$ a zároveň na tlmiacej hĺbke závisí aj časový posun maxima sínusu, ktorý je zapísaný ako $-z/d$ (Hillel, 2004).

2.6 Model S1D

Numerický model S1D slúži na výpočet toku vody, pohybu kontaminantu a priebeh teploty v heterogénnom pórovitom prostredí. Pre vypracovanie tejto kapitoly bol využitý manuál modelu S1D (Vogel et al., 2004).

2.6.1 Riadiaca rovnica

Hlavnou funkciou modelu S1D je simulovanie toku vody v pôde. Ten je možné počítať pokiaľ sú splnené nasledovné predpoklady:

1. Platí Darcyho zákon
2. Priebeh je v 1-dimenzionálnom, rôzne nasýtenom, pevnom, pórovitom prostredí
3. Pôdny vzduch nemá vplyv na tok vody

V tom prípade je možné opísať prúdenie vody v pôde Richardsovou rovnicou:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right) - S \quad (4)$$

kde:

- θ – objemová vlhkosť [-]
- t – čas [d]
- z – hĺbka pod povrchom [cm]
- K – hydraulická vodivosť pôdy [cm/d]
- $\cos \alpha$ – kosínus uhlu medzi smerom prúdenia a vertikálnou osou [-]
- h – tlaková výška [cm]
- S – intenzita koreňovej extrakcie [d⁻¹]

Pre riešenie Richardsovej rovnice je nutné poznať okrajové podmienky a jednu z dvoch neznámych – objemovú vlhkosť θ alebo tlakovú výšku h . V prípade neznámej tlakovej výšky je to kapacitný tvar Richardsovej rovnice:

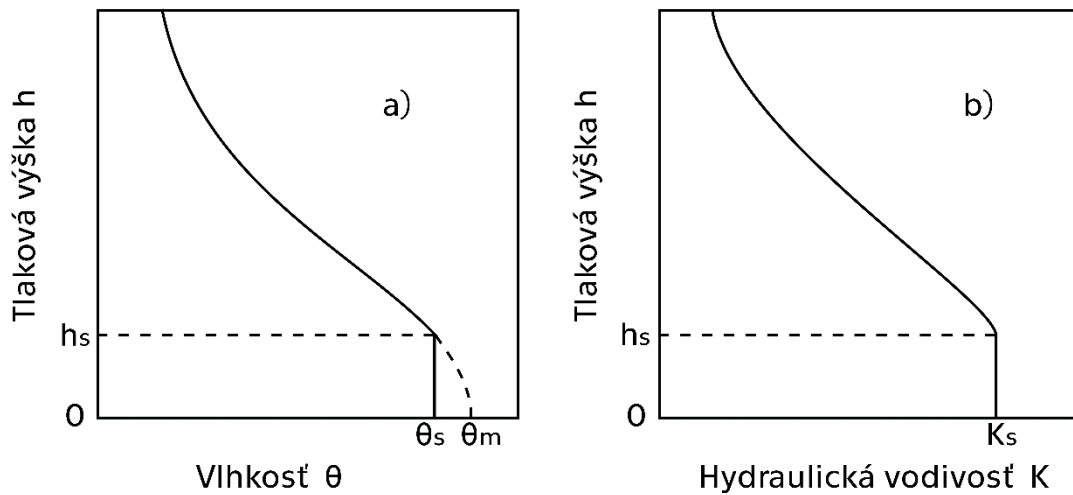
$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right), \quad -\infty < h < \infty \quad (5)$$

kde:

- C – špecifická hydraulická kapacita [cm⁻¹]

Hodnoty tlakovej výšky a pôdnej vlhkosti sú na sebe závislé a túto závislosť popisuje retenčná krivka. Obecne platí, že so stúpajúcou tlakovou výškou vlhkosť klesá. V

oblasti tlakovej výšky $h = 0$ až h_s (vstupná hodnota vzduchu) je pôda plne nasýtená θ_s , teda platí $\theta = \theta_s$. Obdobne platí aj závislosť tlakovej výšky a hydraulickej vodivosti, kedy pre $h = 0$ až h_s platí, že hydraulická vodivosť je nasýtená $K = K_s$ (obrázok 5).



Obrázok 5 Schematické zobrazenie a) retenčnej krivky a b) funkcie hydraulickej vodivosti s vyznačenou vstupnou hodnotou vzduchu h_s a teoretickou maximálnou vlhkosťou θ_m (upravené podľa Vogela et al. (2004))

V prípade modelu S1D sú pre výpočet tlakovej výšky zadané funkcie hydraulickej vodivosti $K(h)$ a vlhkosti pôdy $\theta(h)$. Tieto funkcie sú parametrizované podľa rovníc van Genuchtena (1980), ale sú upravené Vogelom et al. (2001) tak, aby pridali flexibilitu výpočtom v blízkosti nasýteného stavu.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_m - \theta_r)(1 + (-\alpha h)^n)^{-m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (6)$$

a

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r (S_e(h)) & h < h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (7)$$

kde:

S_e – efektívna vlhkosť [s^{-1}]

θ_r – zvyšková vlhkosť [-]

θ_m – fiktívna maximálna vlhkosť ($\theta_m \geq \theta_s$) [-]

K_r – relatívna nenasýtená hydraulická vodivosť [cm/s]

V týchto rovniciach vystupujú aj empirické parametre α [1/cm], n [-] a m [-] ($m = 1 - 1/n$). Ide o parametre definujúce tvar retenčnej krivky, ktorá je v tomto prípade

hladká derivovateľná funkcia. Je to jedna z veľkých výhod, vďaka ktorým je van Genuchtenov vzťah vhodný pre matematické modelovanie.

2.6.2 Preferenčné prúdenie

S1D je proti predchádzajúcim verziám modelu schopný počítať aj s preferenčnými cestami prúdenia vody v pôde, a tým vytvára omnoho realistickejší simulovaný priebeh pohybu vody a teploty v pôde. Výpočet funguje na základe dvoch Richardsových rovníc, z ktorých jedna je pre prúdenie v doméne pôdnej matrice a druhá je pre doménu preferenčného prúdenia.

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right) - S_m + \frac{\Gamma_w}{w_m} \quad (8)$$

a

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right) - \frac{\Gamma_w}{w_f} \quad (9)$$

kde:

m – index domény pôdnej matrice

f – index domény preferenčného prúdenia

Γ_w – prúdenie vody medzi doménami m a f [1/d]

w_i – zlomkové hodnoty vyjadrujúce podiel jednotlivých domén. Platí $w_m + w_f = 1$

Dôležité je poznamenať, že funkcia retenčnej krivky $\theta(h)$ a hydraulickej vodivosti $K(h)$ sú rôzne pre jednotlivé domény.

2.6.3 Intenzita extrakcie

V Richardsovej rovnici sa vyskytuje aj veličina intenzity extrakcie označovaná S (z anglického sink term). Táto intenzita predstavuje objem vody, ktorý je z pôdy odobraný koreňovou sústavou rastlín. V oblasti koreňovej zóny to môže byť kladná hodnota a mimo nej je spravidla nulová. Vo výpočtoch S predstavuje vektor priestorových súradníc a vystupuje v Richardsových rovniciach s jednotkou T^{-1} (Císlarová & Vogel, 1998).

2.6.4 Prenos tepla

Pri modelovaní prenosu tepla v duálnom pôdnom prostredí s pôdnou maticou a preferenčným prúdením je tento prenos vyjadrený dvomi rovnicami (Vogel et al., 2011):

$$\frac{\partial w_m C_m T_m}{\partial t} + \frac{\partial w_m q_m C_w T_m}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(w_m \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) = -w_m S_m C_w T_m + \Gamma_H \quad (10)$$

a

$$\frac{\partial w_f C_f T_f}{\partial t} + \frac{\partial w_f q_f C_w T_f}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(w_f \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = -w_f S_f C_w T_f - \Gamma_H \quad (11)$$

kde:

T_i – teplota domény [K]

C_i – objemová teplotná kapacita pôdy [J/m³/K]

C_w – objemová teplotná kapacita vody [J/m³/K]

q_i – tok vody v pôde [m/s]

λ_i – tepelná vodivosť [W/m/K]

Γ_H – prestup tepla medzi doménami [W/m³]

Prestup tepla medzi doménami je následne vyhodnotený pomocou jednoduchej rovnice, ktorá počíta s konduktivitou aj advekciou (Votrubová et al., 2012).

2.6.5 Počiatkové a okrajové podmienky

Aby bola Richardsova rovnica numericky riešiteľná je nutné poznať a zadať počiatkové a okrajové podmienky.

Počiatková podmienka udáva rozdelenie tlakovej výšky na počiatku časového úseku.

$$h(z, 0) = h_0(z) \quad (12)$$

kde:

$h_0(z)$ – predpísaná funkcia tlakových výšok v čase $t = 0$

Okrajové podmienky riešia hranice počítanej oblasti a jej interakciu s okolím. Model S1D delí podmienky na závislé na systéme, ktoré nemôžu byť definované predom a nezávislé (tlaková a toková).

V prípade výpočtov bola použitá podmienka závislá na systéme uvažujúca vplyv atmosférických podmienok na pôdny povrch. Potenciálny tok vody je pri nej ovplyvnený len vonkajšími podmienkami, zatiaľ čo skutočný tok závisí aj na vlhkosti pôdy. Táto horná okrajová podmienka sa dá ešte rozdeliť podľa predpokladu, či je možné, aby sa na povrchu tvorila vrstva vody alebo nie. Pre simulácie sa s tvorbou vrstvy vody neuvažovalo.

Spodná podmienka bola pre výpočty uvažovaná ako nulový gradient v prípade, keď voda voľne odteká z riešenej oblasti:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad \text{pre } z = a \quad (13)$$

kde:

a – spodná hrana oblasti

Inými možnosťami by bolo uvažovať spodnú hranicu ako priesakovú plochu alebo ako odtokovú funkciu.

V prípade simulácie prenosu tepla boli pre hornú okrajovú podmienku zadané hodnoty teploty, ktoré boli namerané na povrchu pôdneho profilu. Ako spodná okrajová podmienka pre variant A boli zadané merané hodnoty v hĺbke 45 cm. Pre variant B bola zadaná okrajová podmienka nulového gradientu.

Počiatkové podmienky prúdenia tepla boli zadané ako namerané teploty v čase začiatku simulácie na povrchu a v jednotlivých hĺbkach (15, 30, 45 cm) a v prípade variantu B bola zadaná extrapolovaná teplota na okraji riešeného priestoru v hĺbke 300 cm.

2.6.6 Časová a priestorová diskretizácia

Pre správne riešenie Richardsovej rovnice je dôležité vhodné rozdelenie priestoru a času. V prípade modelu S1D sú pre riešenie využívané 3 typy časovej diskretizácie (ČD):

1. ČD súvisiaca s numerickým riešením
2. ČD súvisiaca s okrajovými podmienkami
3. ČD poskytujúca špecifické výstup riešenia simulácie

Pri výpočte začne diskretizácia s počiatkovým, predpísaným časovým krokom, ktorý bol v prípade riešených simulácií uvažovaný ako 1 stotina dňa (14,4 min). Diskretizácia sa počas výpočtov mení na základe podmienok troch typov ČD, pričom sa pohybuje v rozmedzí minimálneho časového kroku, ktorý bol zadaný ako 1 stotisícina dňa (1,44 s) a maximálneho časového kroku 1 deň.

Priestorová diskretizácia určuje s akou presnosťou simulácia počíta riešenú 1-dimenzionálnu oblasť. Riešený pôdny profil hlboký 300 cm bol rozdelený celkovo na 308 uzlov, pričom väčšina mala veľkosť 1 cm. Hustota bodov bola zvýšená na

hraniciach oblasti a v hĺbke 75 cm, kde sa predpokladá výrazná zmena vlastností pôdných vrstiev. Pomocou toho je dosiahnutá vysoká presnosť modelu v kritickej časti profilu.

2.6.7 Charakteristika prostredia

Ako bolo spomenuté pri opise Richardsovej rovnice, pre riešenie je nutná definícia retenčnej krivky. V prípade riešeného prostredia je profil do hĺbky 300 cm zložený z piatich vrstiev, kde každá má svoju vlastnú charakterizáciu retenčnej krivky, hydraulickú vodivosť a prenosu tepla. V tabuľke 1 sú hydraulické charakteristiky riešeného pôdneho profilu zadané objemovou vlhkosťou, empirickými parametrami α a n a hydraulickou vodivosťou (Vogel et al., 2011).

Tabuľka 1 Hydraulické vlastnosti pôdy

Doména	Vrstva	Hĺbka [cm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [cm ⁻¹]	n [-]	K_s [cm/d]	θ_m [-]
<i>m</i>	1	0 - 8	0,20	0,55	0,05	2,00	567,0	0,550
	2	8 - 20	0,20	0,54	0,05	1,50	67,0	0,541
	3	20 - 70	0,20	0,49	0,02	1,20	17,0	0,491
	4	70 - 75	0,20	0,41	0,02	1,20	1,3	0,411
	5	75 - 300	0,00	0,21	0,02	1,20	1,3	0,211
<i>f</i>		0 - 300	0,01	0,50	0,05	3,0	10000	0,50

Pre simuláciu transportu tepla v prostredí sú vrstvy charakterizované v tabuľke 2, a to podielom pevnej a organickej fázy v pôde, tepelnou disperzivitou, tepelnou vodivosťou nasýtenej a suchej pôdy a tepelnou kapacitou pevnej a organickej zložky.

Tabuľka 2 Tepelné vlastnosti pôdy

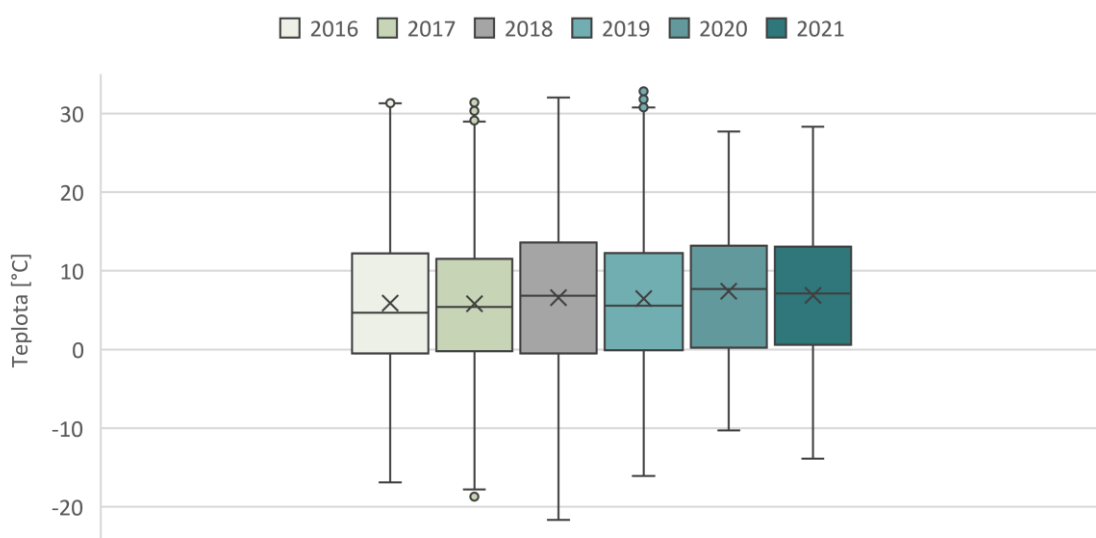
Doména	Vrstva	Hĺbka [cm]	ϵ_{Solid} [-]	ϵ_{Org} [-]	Disp. [cm]	$b1/C_w$ [cm ² /d]	$b2/C_w$ [cm ² /d]	C_s/C_w [-]	C_o/C_w [-]
<i>m</i>	1	0 - 8	0,09	0,36	5	18,1	152,7	0,476	0,6
	2	8 - 20	0,39	0,07	5	41,5	343,2	0,476	0,6
	3	20 - 70	0,47	0,04	5	57,8	433,7	0,476	0,6
	4	70 - 75	0,58	0,01	5	89,8	577	0,476	0,6
	5	75 - 300	0,77	0,01	5	238,5	1063,4	0,476	0,6
<i>f</i>		0 - 300	0,5	0	5	91,1	696,4	0,19	0,6

Vlastnosti domény preferenčného prúdenia sú definované obdobne ako vrstvy pôdnej matrice, ale v celom profile sa nemenia ani pre hydraulické, ani pre tepelné vlastnosti pôdy.

3 Výsledky

3.1 Základná štatistická analýza

Pre časový rad rokov 2016 až 2021 bola nameraná maximálna teplota vzduchu v 2 metroch nad zemou dňa 26.06.2019, ktorá bola 33,31 °C. Najnižšia teplota počas analyzovaných rokov -21,64 °C bola zaznamenaná 27.02.2018. Priemerná teplota za 6 rokov bola 6,4 °C. Na obrázku 6 sú viditeľné štatistické údaje pre všetky roky. Významnú odchýlku od celkového priemeru má rok 2020, ktorý má priemer teplejší o celý 1 °C. To je pravdepodobne spôsobené veľkým výpadkom senzoru opísaným v kapitole 2.3. Obdobne môžu byť ovplyvnené aj dáta v roku 2021, kedy bol tiež významný výpadok a ročný priemer bol 6,9 °C.



Obrázok 6 Zobrazenie meraných teplôt vzduchu v 200 cm nad povrchom v rokoch 2016 - 2021

Z tabuľky 3 je vidieť, že minimá v jednotlivých rokoch sa pohybujú vo veľmi malom rozmedzí. Naopak maximálne teploty majú omnoho väčšiu variáciu. Počas zimného obdobia, kedy je na povrchu snehová pokrývka je teplota ustálená a denný režim priebehu teploty je utlmený. Z dôvodu snehu na povrchu, v pôdnom profile počas najchladnejšieho obdobia v roku nemrzne, pričom teplota veľmi pomaly klesá počas celej zimy a k najnižším hodnotám teploty dochádza, keď sa sneh topí na začiatku jari.

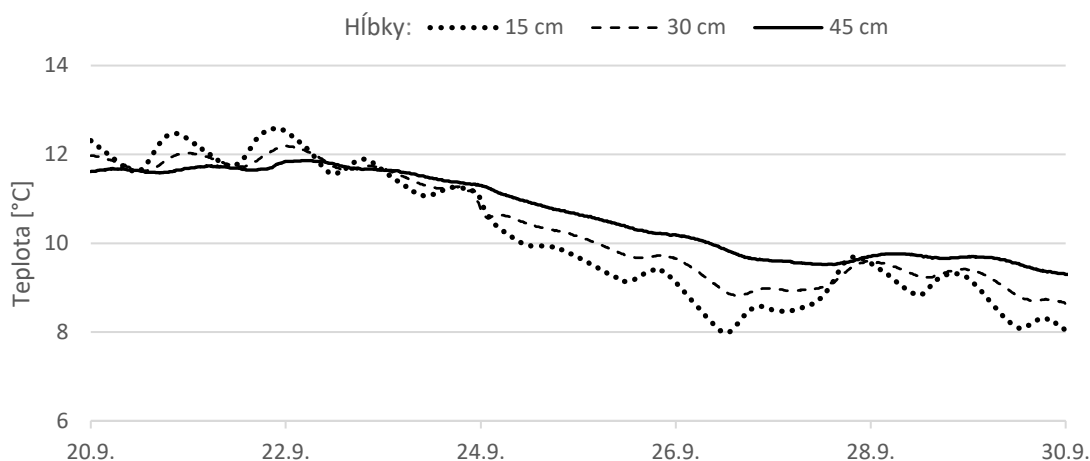
Tabuľka 3 Základné štatistické parametre teplôt pôdy v meraných hĺbkach v rokoch 2018 - 2021

Rok	Hĺbka [cm]	Minimum T [°C]	Priemer T [°C]	Maximum T [°C]	σ [°C]
2018	0	-2,78	7,68	32,73	7,65
	15	0,29	7,44	17,79	5,58
	30	0,43	7,33	16,48	5,20
	45	1,08	7,28	15,20	4,71
2019	0	-0,61	7,65	39,14	8,15
	15	0,29	7,29	18,75	5,71
	30	0,45	7,17	16,83	5,32
	45	1,17	7,13	15,07	4,82
2020	0	-0,10	7,49	26,11	6,62
	15	0,58	7,28	16,46	5,14
	30	0,85	7,18	15,48	4,83
	45	1,50	7,15	14,46	4,41
2021	0	-0,26	6,74	35,67	7,37
	15	0,34	6,61	18,14	5,66
	30	0,59	6,56	16,58	5,29
	45	1,08	6,59	15,15	4,81

Pre dôkladnejšiu analýzu dát bol vybraný rok 2018. V tomto roku sa teplota v 200 cm nad povrchom pohybovala od -21,6 °C do 32,01 °C s priemernou teplotou 6,57 °C. Teplota vo výške 5 cm nad povrchom pôdy bola vyššia a jej priemer bol 7,34 °C s minimom -9,68 °C a maximom až 36,4 °C. Ročný priemer v profile sa s klesajúcou hĺbkou znižuje len mierne. Naopak, variácia teploty sa s klesajúcou hĺbkou výrazne znižuje. Smerodajná odchýlka sa v 45 cm pod povrchom znížila o takmer 3 °C oproti teplote na povrchu.

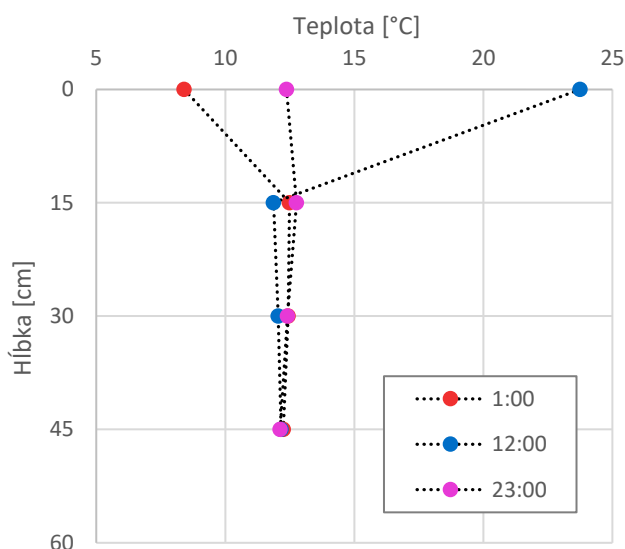
V období vegetačnej sezóny platí, že teplota od povrchu smerom do hĺbky klesá. V zime je ale priebeh obrátený a teplota s narastajúcou hĺbkou stúpa. Tieto dva popísané režimy sa musia každý rok na jar a na jeseň vymeniť. V roku 2018 došlo k zmene smeru toku teploty po zime počas jedného dňa, keď sa roztopil posledný sneh na povrchu pôdneho profilu.

Obrátená zmena režimu po lete nastala v septembri, kedy sa počas jedného týždňa pôda výrazne ochladila a vo vrstvách pri povrchu začala byť teplota nižšia, než vo väčších hĺbkach. Ako je vidieť na obrázku 7, teplota v hĺbke 45 cm pod povrchom klesla o 2 °C a priemerná denná teplota v hĺbke 15 cm sa znížila o približne 3 °C.



Obrázok 7 Zobrazenie zmeny smeru prúdenia toku tepla v pôdnom profile v septembri 2018 v hĺbkach s meraniami teplotných sond

Ešte predtým, na začiatku septembra dochádzalo k pomalej zmene teplotného režimu počas niektorých dní, z ktorých jeden vybraný je zobrazený na obrázku 8. Počas týchto dní bola teplota v noci v hĺbke 45 cm nižšia, než teplota v hĺbke 15 cm pod povrchom, ale počas dňa to bolo naopak.

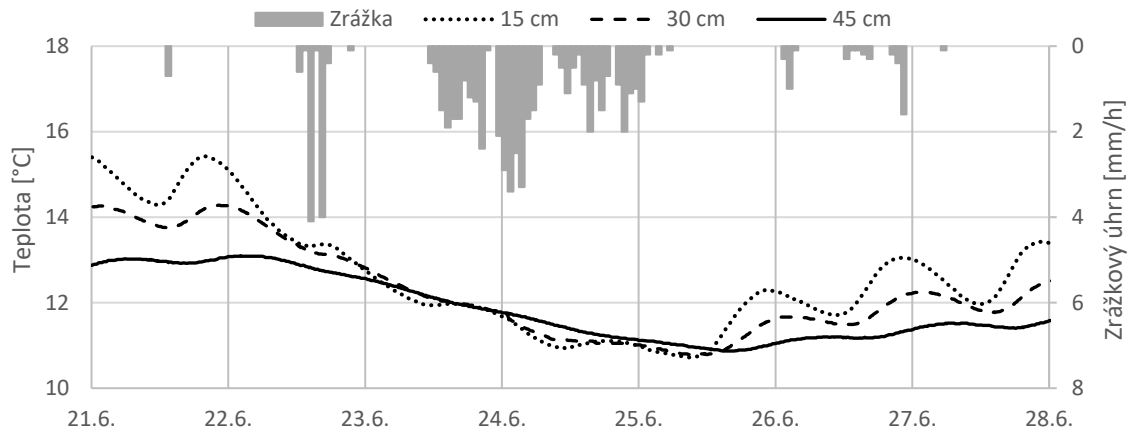


Obrázok 8 Zobrazenie priebehu teploty v pôdnom profile na základe meraní teplotných sond na povrchu a v hĺbkach 15, 30 a 45 cm pod povrchom vo vybraných časoch počas dňa 10.09.2018

V roku 2018 došlo k významnej zrážkovej epizóde, ktorá trvala tri dni. Celkovo pri nej napadlo 56,5 mm. Dňa 22.6. bola nameraná zrážková výška 9,4 mm. Následne po 17 hodinách začal takmer nepretržite pršať na 35 hodín, kedy napadlo 47,1 mm.

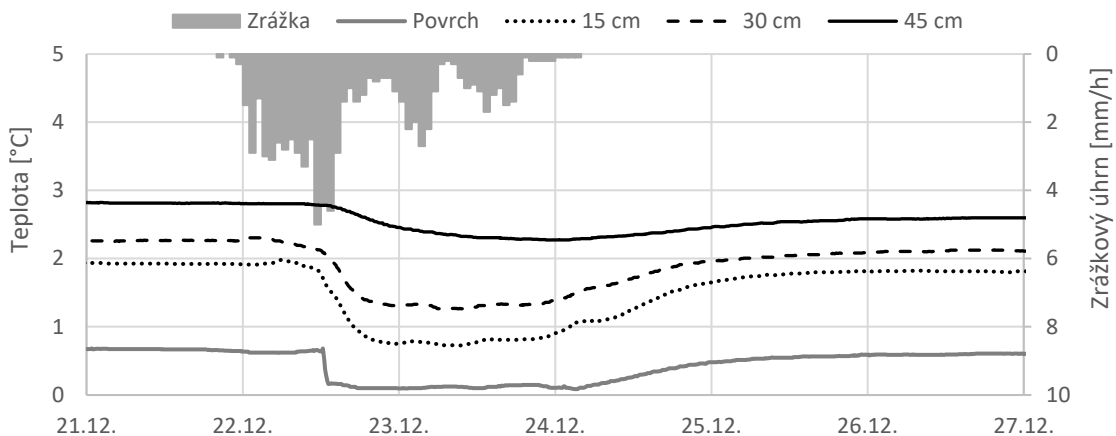
Došlo k výraznému poklesu teplôt v profile a zároveň aj k útlmu dennej variability teploty pôdy. Profil sa počas druhého dňa plne nasýtil a účinkom konvekcie tepla

infiltrovanej zrážkovej vody do pôdy sa teplota vo všetkých 3 meraných hĺbkach na niekoľko hodín ustálila na 12 °C. Následne teploty ešte postupne klesli na 11 °C. Počas nasledujúcich dní zostal profil do veľkej miery nasýtený, ale denná teplotná variácia sa začala opäť zväčšovať a teploty znovu stúpať. To by mohlo naznačovať, že dažďová voda sa v profile postupne ohriala na teplotu pôdy.



Obrázok 9 Pribeh zrážkovej epizódy a teploty v pôdnom profile v hĺbkach s meraniami teplotných sond v júni 2018

Od začiatku decembra 2018 sa na povrchu nachádzala snehová pokrývka. Dňa 22.12. došlo k zrážke s výškou 90,5 mm, kedy teplota vzduchu vystúpila nad 0 °C. Po približne 13 hodinách od začiatku zrážky sa sneh začal pod vplyvom dažďovej vody topiť. Na obrázku 10 je pozorovateľný pokles teploty v celom profile, kedy došlo k infiltrácii roztopeného snehu so zrážkovou vodou do profilu. Na povrchu došlo k ochladeniu o 0,5 °C v priebehu 1 hodiny. Tam bola zmena teploty najrapídnejšia. V hĺbke 15 cm bol nameraný najväčší pokles teploty, a to 1,2 °C. Na obrázku je viditeľný postupný útlm účinku konvekcie vody s narastajúcou hĺbkou. 45 cm pod povrchom reakcia na dážď už nebola taká výrazná a zároveň mala aj pomalší priebeh oproti hĺbkam pri povrchu.



Obrázok 10 Priebeh zrážkovej epizódy v decembri 2018 a zobrazenie priebehu teplôt na povrchu a v hĺbkach s meraniami teplotnými sondami

3.2 Teploty tenzometrov

Súčasťou analýzy dát bolo aj overenie hypotézy, či sú teploty merané tenzometrami dostatočne reprezentatívne pre teploty pôdy. Tú merajú ako druhotnú veličinu v hĺbkach, v ktorých sú umiestnené. To je v 21, 34 a 51 cm pod povrchom. Pre tieto hodnoty však nie je istota, že sú správne, preto ich bolo pred použitím nutné overiť.

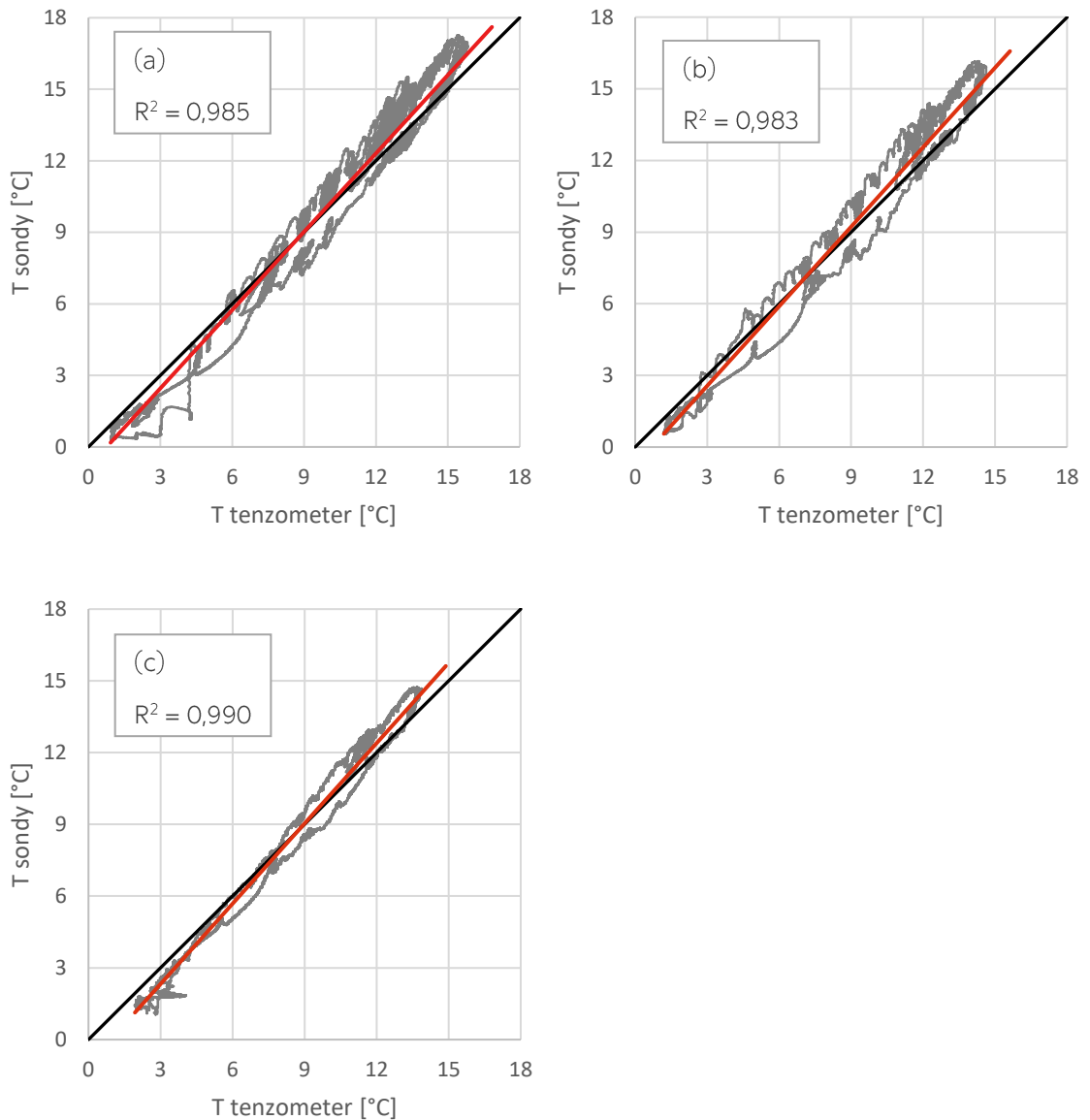
Tenzometre nemerajú priamo teplotu pôdy, ale teplotu odplynenej vody v ich vnútri, ktorá je v rovnováhe s okolitým prostredím cez pórovitú keramickú čapičku, a tým meria tlakovú výšku vody v pôde.

Pre overenie správnosti meraní boli dáta tenzometrov porovnané s hodnotami teplotných sond v lokalite. Nakoľko sú ale sondy a tenzometre nainštalované v iných hĺbkach, nebolo možné porovnať priamo merané hodnoty. Pre porovnanie bola použitá interpolácia a extrapolácia dát teplotných sond, aby boli získané hodnoty v hĺbkach tenzometrov. Hodnoty boli porovnané v roku 2018.

Na preloženie dát sond bola použitá polynomickeá funkcia 2 rádu, ktorá najlepšie opisovala merané dáta. Pre preloženie dát boli vyskúšané aj iné aproximačné funkcie, napr. exponenciálna alebo logaritmická, ale tie nedokázali vyjadriť vzťah, ktorý by vyhovoval meraniam vo všetkých hĺbkach.

Pre každý časový záznam boli pre polynomickeú funkciu vypočítané špecifické parametre a , b a c , ktoré vyjadrovali závislosť teploty a hĺbky pod povrchom v daný čas. Podľa známych parametrov boli následne dopočítané hodnoty pre neznáme hĺbky, v ktorých sú umiestnené tenzometre. Tenzometre v hĺbkach 21 a 34 cm ležia

medzi teplotnými sondami, takže tieto hodnoty boli interpolované. Tenzometer 51 cm pod povrchom leží pod najhlbšie umiestneným meraním teploty, a preto museli byť hodnoty do tejto hĺbky extrapolované.



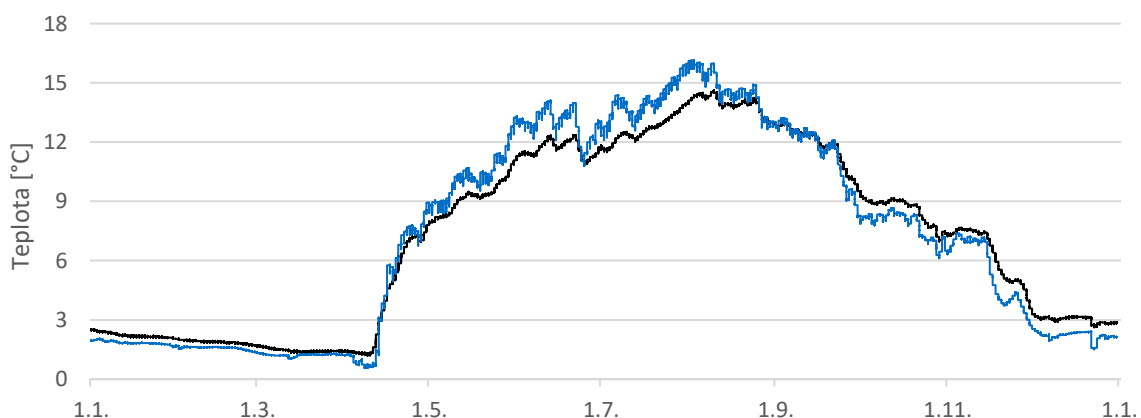
Obrázok 11 Porovnanie teplôt meraných tenzometrami s teplotami vypočítanými z meraní teplotných sond v hĺbkach (a) 21 cm, (b) 34 cm a (c) 51 cm s vyjadreným koeficientom determinácie (R^2) a znázornenou trendovou spojnicou (červená)

Ako je poznačené na obrázku 11, koeficient determinácie je takmer 1 pre všetky hĺbky, čo naznačuje veľmi dobrú zhodu medzi teplotami meranými tenzometrami a teplotami počítanými z meraní teplotných sond.

Vypočítané hodnoty sa líšia v hĺbke 21 cm s priemerným rozdielom 0,68 °C, s maximom až 3,2 °C. Pre hodnoty v 34 cm je priemerná odchýlka najvyššia, a to 0,7 °C a pre hĺbku v 51 cm je to naopak najmenej, len 0,58 °C.

Z porovnaných hodnôt sú pozorovateľné dva javy, ktoré platia pre všetky tri merané hĺbky. Pre teploty pod 4,5 °C platí, že hodnoty tenzometrov sú vyššie, než tie vypočítané z meraní teplotných sond, a naopak väčšina teplôt nad 13 °C je nižšia z tenzometrov, než zo sond. To by mohlo byť spôsobené tým, že teplota meraná v tenzometroch nie je v priamom kontakte s pôdou a je ovplyvnená telom tenzometru a keramickým médiom.

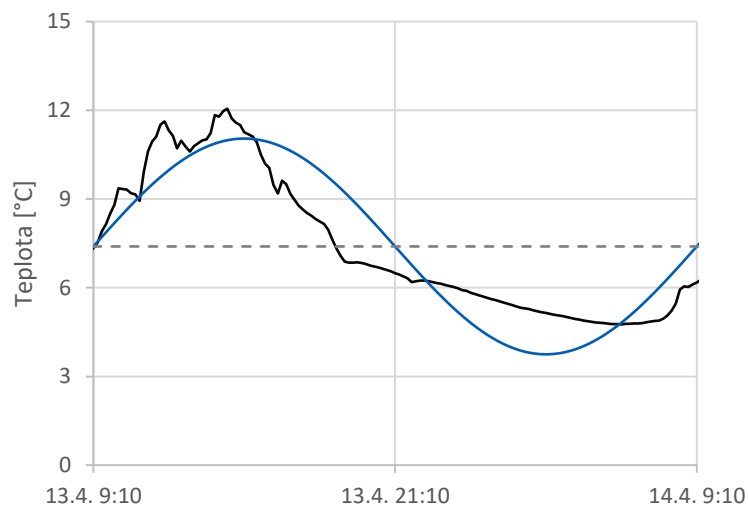
Na obrázku 12 je viditeľné, že počas zimy, keď je na povrchu snehová pokrývka, tenzometre merajú teplotu vyššiu než teplotné sondy. Keď sa začne profil otepľovať, od polovice apríla, po tom, ako sa roztopil posledný sneh až do polovice augusta, sú hodnoty merané teplotnými sondami vyššie než tenzometrov. Následne sa profil začne ochladzovať a merania tenzometrov pomaly nadobudnú vyššie hodnoty než teplotné sondy.



Obrázok 12 Priebeh teploty meranej tenzometrom (čierna) a teploty vypočítanej z meraní teplotných sond (modrá) v hĺbke 34 cm pod povrchom počas roku 2018

3.3 Výsledky modelu sínusovej funkcie

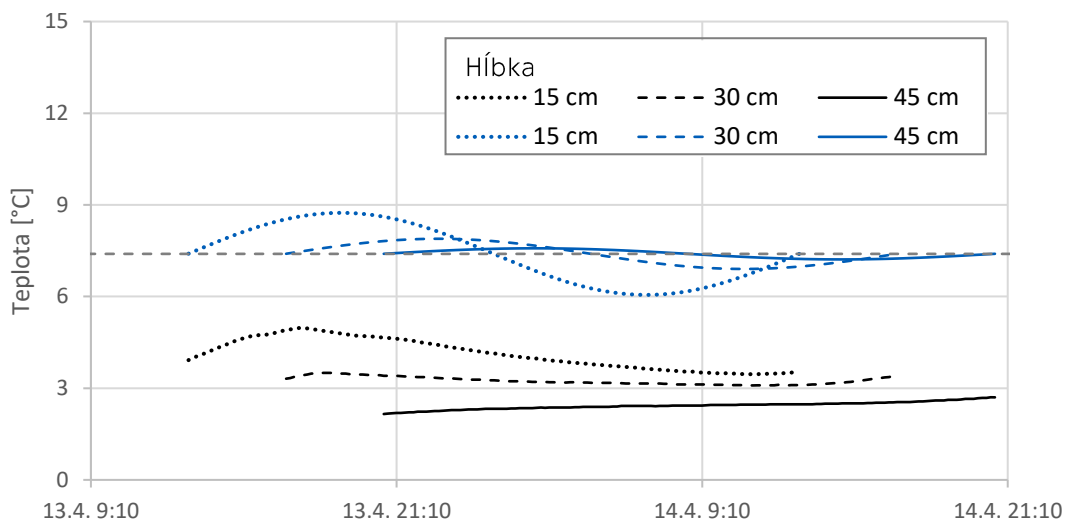
Pre výpočet denného priebehu teplôt pomocou modelu sínusovej funkcie podľa rovnice (1) bol vybraný ako prvý deň 13.04.2018 a bol porovnaný s meranými dátami. Jedná sa o druhý deň po tom, ako sa na povrchu roztopil posledný sneh. Dôležité je poznamenať, že vo výsledku sa nejedná o kalendárny deň, ale o 24 hodinovú frekvenciu, ktorá začína a končí na priemernej teplote.



Obrázok 13 Priebeh meranej teploty (čierna) porovnaný s priebehom sínusovej funkcie (modrá) a zobrazenie priemernej teploty počas 24 hodín vo vybraný jarný deň v roku 2018

Ako je vidieť na obrázku 13, jedná sa o hrubú aproximáciu priebehu teploty, nakoľko v niektorých časoch môže dôjsť k výraznej odchýlke od reality. Sínusová krivka nedosahuje najvyššiu meranú teplotu a obdobne zas presahuje najnižšiu meranú teplotu. To je spôsobené zvolenou priemernou teplotou, ktorá bola vypočítaná zo všetkých meraných dát za 24 hodín a nie z hodnôt minima a maxima.

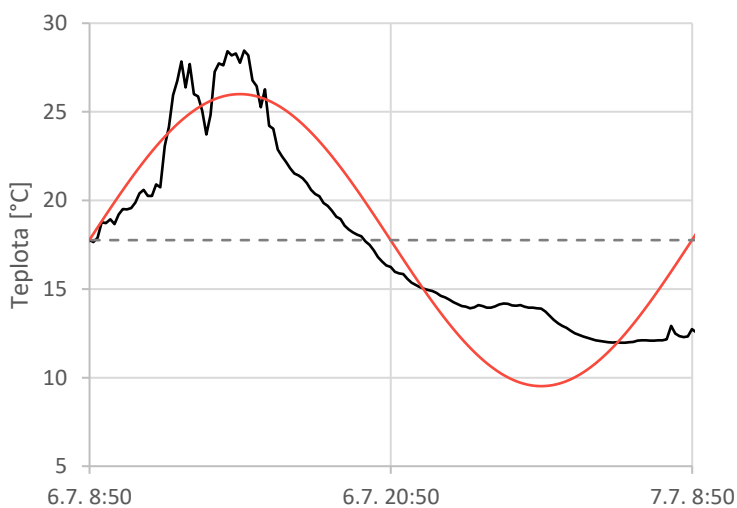
Pre analyzovaný deň boli spočítané aj sínusové funkcie pomocou rovnice (2) v hĺbkach 15, 30 a 45 cm, aby sa následne dali porovnať s meranými dátami. Pre tento výpočet bola najprv vyjadrená tlmiaca hĺbka pôdy podľa rovnice (3) a známych parametrov tepelnej vodivosti $0,0042 \text{ cal}/(\text{s cm } ^\circ\text{C})$ a tepelnej kapacity $0,5 \text{ cal}/(\text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$ pre časový interval $\omega = 86\,400 \text{ s}$ (1 deň). Tlmiaca hĺbka vyšla 15,2 cm.



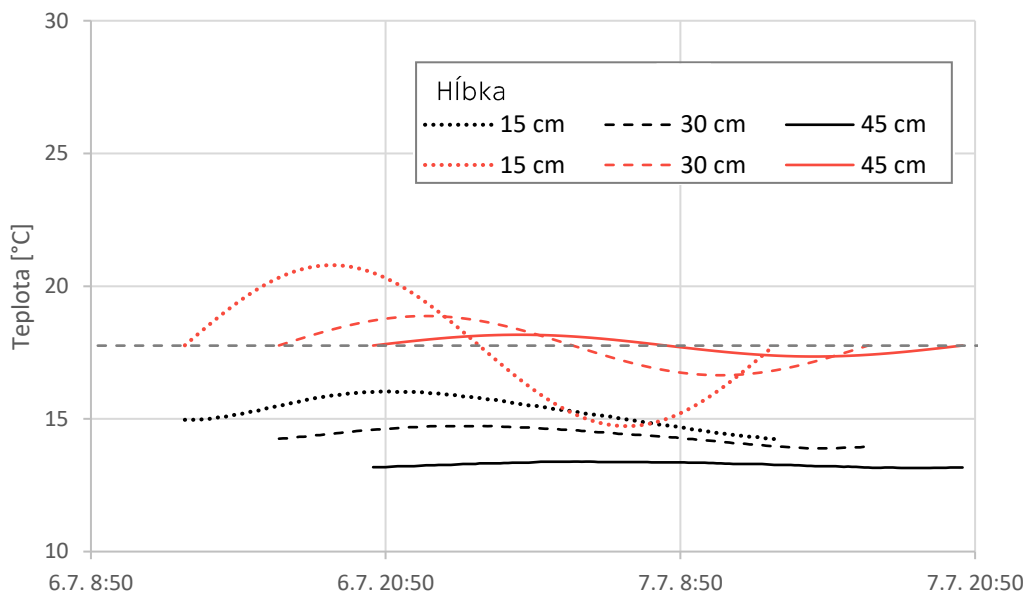
Obrázok 14 Zobrazenie priebehu meraných teplôt (čierna) a priebehu modelu sínusovej funkcie (modrá) vo vybraných hĺbkach v pôdnom profile počas jarného dňa v roku 2018

Z obrázku 14 je viditeľné, že predpoklad konštantnej priemernej teploty profilu v zvolenom jarnom dni nie je splnený. Po zime je profil výrazne chladnejší než je teplota pôdy na povrchu.

Druhý zvolený deň bol 06.07.2018. Teplý letný deň s priemernou teplotou na povrchu 17,7 °C, ktorá bola nameraná v čase 8:50.



Obrázok 15 Priebeh meranej teploty na povrchu profilu (čierna) a modelu sínusovej funkcie (červená) a zobrazenie priemernej teploty vo vybraný letný deň v roku 2018



Obrázok 16 Zobrazenie priebehu meraných teplôt (čierna) a modelu sínusovej funkcie (červená) vo vybraných hĺbkach v pôdnom profile a vyznačená priemerná teplota na povrchu vo vybraný letný deň v roku 2018

Pre vybraný júlový deň platí, obdobne ako pri jarnom dni, že predpoklad rovnakej priemernej teploty v celom profile nie je splnený. Zároveň dochádza aj k výraznejšej odchýlke amplitúd, ktoré sú zobrazené v tabuľke 4. Amplitúdy na povrchu sa zhodujú, keďže tie boli vypočítané z meraných hodnôt.

Pre analyzované dni bol určený aj koeficient determinácie v jednotlivých hĺbkach, ktorý udáva mieru lineárnej závislosti medzi počítanými a meranými hodnotami. Z tabuľky 4 je viditeľné, že presnosť sínusovej funkcie je na povrchu vysoká a s klesajúcou hĺbkou sa spoľahlivosť znižuje. To môže byť spôsobené tlmiacou hĺbkou, ktorá nemusí správne predstavovať zmenu amplitúdy a posun maxima sínusu alebo môže byť nesprávne určená.

Tabuľka 4 Porovnanie reálnych a počítaných amplitúd teplôt vo vybraných hĺbkach a koeficient determinácie meraných a modelovaných hodnôt

Hĺbka [cm]	13.4.2018			6.7.2018		
	Amp,r [°C]	Amp,p [°C]	R ²	Amp,r [°C]	Amp,p [°C]	R ²
0	3,65	3,65	0,81	8,24	8,24	0,82
15	0,76	1,34	0,85	0,66	1,51	0,39
30	0,18	0,49	0,56	0,24	0,55	0,59
45	0,2	0,18	0,39	0,11	0,16	0,31

3.4 Výsledky modelu S1D

Riešený časový úsek simulácie bol vegetačná sezóna roku 2018, ktorá začala 12.04. a skončila 31.10. Celkovo sa teda jednalo o 203 dní. Riešené boli dva varianty modelovania, kedy prvý bol do hĺbky 45 cm pod povrchom a druhý hlbší do 300 cm. Simulácia prenosu tepla v pôde bola riešená s uvažovaním duálneho prúdenia vody v profile a predpísaným odberom vody koreňmi rastlín.

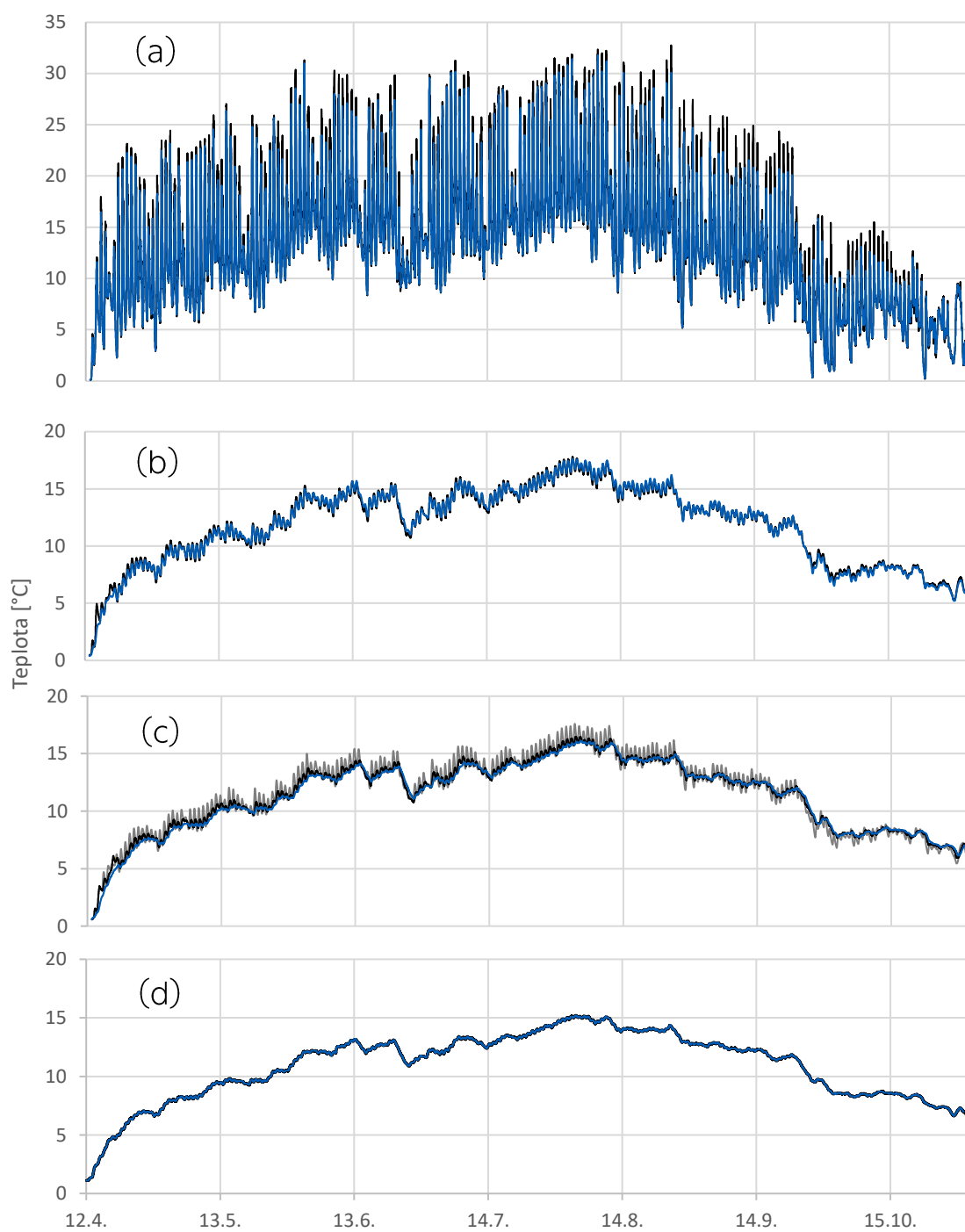
Pre porovnanie výsledkov modelu a meraných hodnôt boli následne použité výstupy, ktoré reprezentovali teploty v doméne pôdnej matrice. Predpokladá sa, že teplotné sondy v pôde merajú teploty v pôdnej matrici, a ich hodnoty nie sú významne ovplyvnené cestami preferenčného prúdenia. Všetky výsledky simulácií teplôt nezaraďované do textu sú uvedené v sekcii príloh.

3.4.1 Variant A

Ako prvá simulácia bola riešená len jednoduchšia simulácia do hĺbky 45 cm, kde je umiestnená teplotná sonda. Z tohto dôvodu bolo možné použiť merané dáta ako okrajovú podmienku, ktorá do veľkej miery odpovedá skutočnosti.

Ako je vidieť na obrázku 17, teploty na povrchu pôdy sa v niektorých časoch neprekrývajú úplne. To je spôsobené vstupom do modelu. Pre vstup do modelu boli použité priemerné hodinové teploty, ktoré pri maximálnych denných teplotách úplne nedosahovali tie najvyššie hodnoty. Celkovú výslednú presnosť modelu to napriek tomu výrazne neovplyvnilo. Pri hĺbke 45 cm sa hodnoty merané, a tie použité ako okrajové podmienky takmer zhodujú, aj keď boli opäť použité hodinové priemery. To je spôsobené menšou dennou variáciou teplôt v danej hĺbke.

V hĺbke 15 cm sa modelované teploty takmer presne zhodujú s teplotami meranými. Najväčšie odchýlky sú sledovateľné v hĺbke 30 cm pod povrchom pôdy, kedy sú modelované teploty menej variabilné v priebehu dňa oproti skutočnosti. To by mohlo byť spôsobené zadaním nižších hodnôt tepelnej vodivosti pôdy pre vrstvu v hĺbke 30 cm oproti skutočnosti. Iným dôvodom by mohol byť fakt, že merané teploty sú v skutočnosti ovplyvnené teplotou v puklinách, ktorá má v priebehu dňa väčšiu variabilitu.

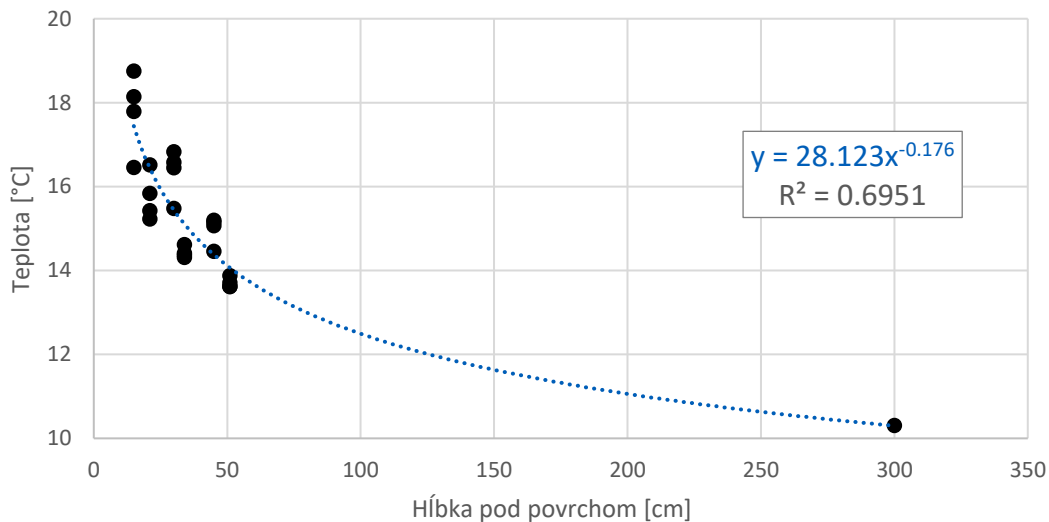


Obrázok 17 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v pôdnej matrici (modrá) a v doméne preferenčného prúdenia (šedá) modelom S1D vo variante A od 12.04.2018 do 31.10.2018 (a) na povrchu a v hĺbkach (b) 15 cm, (c) 30 cm a (d) 45 cm

3.4.2 Variant B

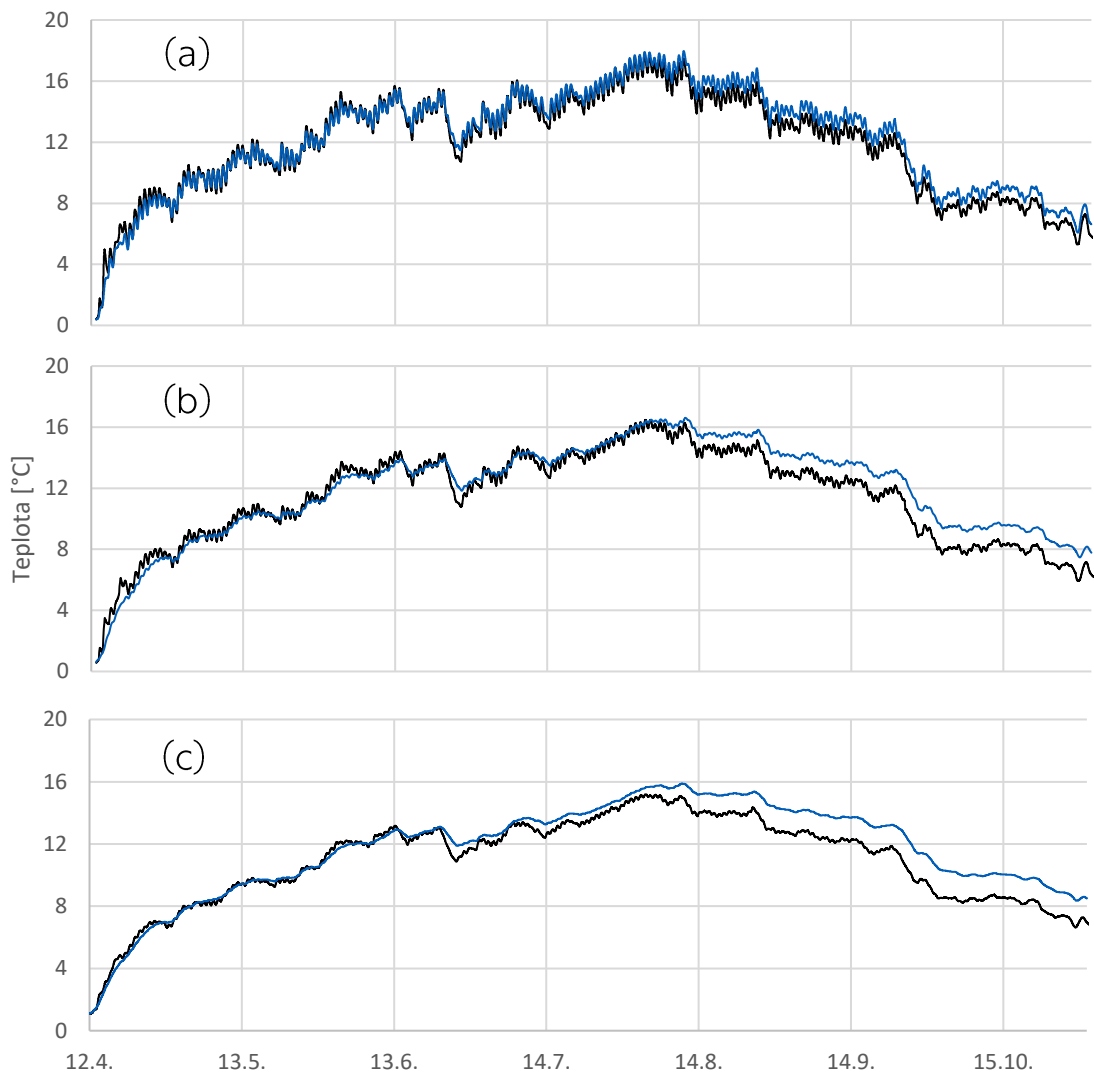
Scenár 1

Pre zadanie počiatkovej podmienky teploty v hĺbke 300 cm, bolo nutné túto teplotu získať. Za predpokladu, že v danej hĺbke sa už teplota veľmi nemení, boli použité maximálne hodnoty teplôt v meraných hĺbkach z rokov 2018 – 2021. Pre odhad nebolo možné použiť minimálne hodnoty, nakoľko počas každej zimy bola na povrchu snehová pokrývka, ktorá zabraňovala mrznutiu v pôde, a tým významne ovplyvnila namerané minimá. Pre výpočet boli použité maximá ako z meraní sond, tak aj z tenzometrov. Na preloženie všetkých dát bola použitá mocninová trendová spojnice (obrázok 18). Z tohto vzťahu vyšla extrapolovaná teplota v hĺbke 300 cm 10,3 °C a táto hodnota bola použitá ako počiatková podmienka.



Obrázok 18 Zobrazenie maximálnych meraní tenzometrami a teplotnými sondami v pôdnom profile v rokoch 2018 - 2021 s vyjadrením mocninatej funkcie pre odhad teploty v hĺbke 300 cm

Nakoľko bola simulácia ohraničená až v hĺbke 3 m, výsledky simulácie môžu byť vhodnejšie pre zistenie, či sú zadané parametre modelu správne zvolené. S1D má totiž v tomto prípade väčšiu voľnosť v stanovení priebehu teploty v čase a priestore. Ako horné okrajové podmienky boli použité rovnaké dáta ako v prípade variantu A, takže výsledky na povrchu sa zhodujú pre oba varianty.



Obrázok 19 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v pôdnej matrici (modrá) modelom *S1D* v scenári 1 pre variant B od 12.04.2018 do 31.10.2018 v hĺbkach (a) 15 cm, (b) 30 cm a (c) 45 cm

V hĺbke 15 cm pod povrchom dochádza k dobrej zhode medzi simulovanými a meranými teplotami. Simulácia takmer presne kopíruje dennú variabilitu meraných dát a aj celkový priebeh počas vegetačnej sezóny.

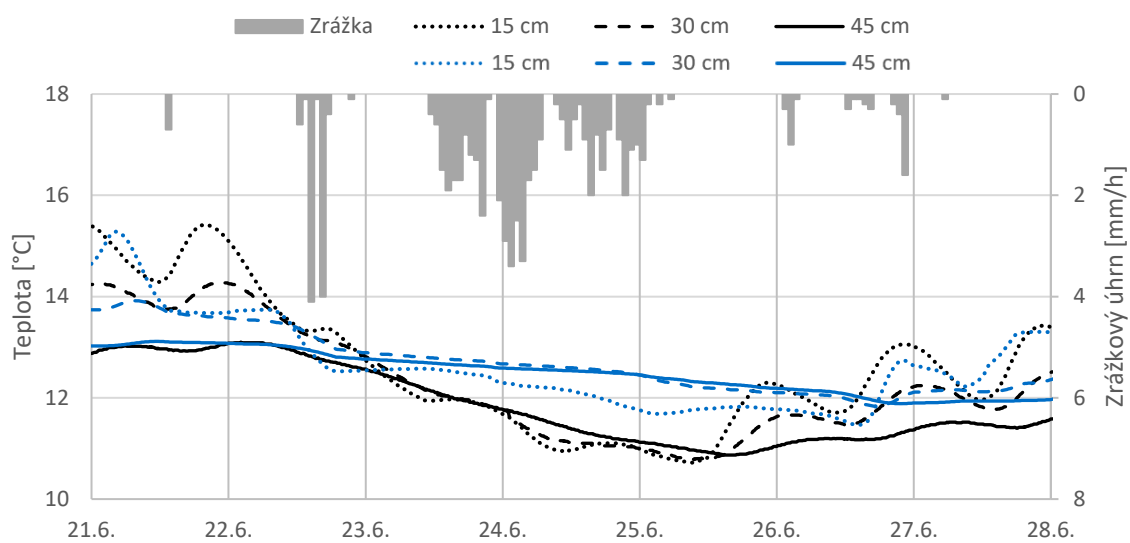
Pre pozorovanú hĺbku 30 cm je viditeľné z obrázku 19, že modelované hodnoty majú opäť ako vo variante A výrazne menšiu dennú variabilitu, než merané teploty.

V hĺbke 45 cm pod povrchom dochádza k podobnému problému ako v hĺbke 30 cm, avšak keďže už samotná reálna variabilita teploty počas dňa nie je veľmi veľká, rozdiel je menej významný.

Na výsledkoch na obrázku 19 je pozorovateľná aj malá odchýlka od meraní počas prvých 2 týždňov simulácie, kedy sú merané hodnoty väčšie. Táto odchýlka mohla

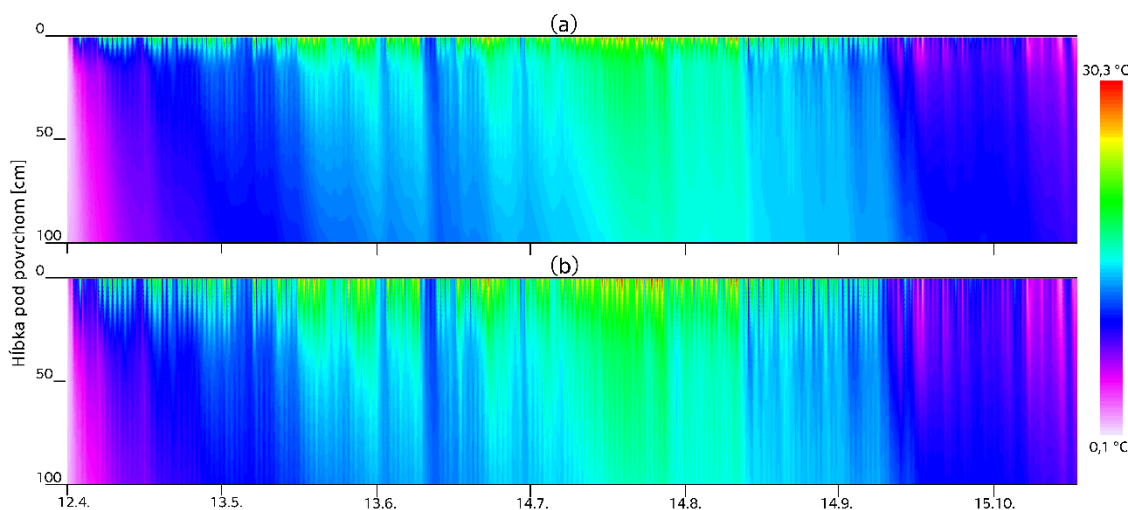
byť spôsobená voľbou počiatkových podmienok pre simuláciu prúdenia vody. Prostredie pravdepodobne nebolo na začiatku simulácie v rovnováhe, a to mohlo ovplyvniť výsledky.

Pre všetky tri hĺbky platí, že model sa v priebehu simulácie odchyľuje od meraní, pričom v hĺbke 45 cm na konci simulácie už rozdiel tvorí takmer 2 °C. K výraznejším odchýleniam od meraní dochádza hlavne pri zrážkových epizódach, ako je viditeľné na obrázku 20, kde je zobrazená už analyzovaná júnová zrážka. Podľa meraní počas tejto zrážkovej epizódy klesla teplota v hĺbke 45 cm až na 11 °C, zatiaľ čo pri simulácii dosiahla najnižšia teplota hodnotu 11,5 °C.



Obrázok 20 Priebeh zrážkovej epizódy na konci júna s priebehom modelovaných (modré) a meraných (čierne) teplôt v pôdnom profile vo vybraných hĺbkach pod povrchom v roku 2018

Pre porovnanie simulácie teploty v pôdnej matrici a v preferenčnom prúdení sú na obrázku 21 zobrazené výstupy modelu pre obe domény. Vo väčšine dní je denná variabilita v pôdnej matrici významne utlmená v hĺbke 8-10 cm pod povrchom. V cestách preferenčného prúdenia sa teplota vzduchu od povrchu dostáva do výrazne väčších hĺbok v pôdnom profile.



Obrázok 21 Simulované teploty (a) v doméne pôdnej matrice a (b) v doméne preferenčného prúdenia v scenári 1 vo variante B počas vegetačnej sezóny v roku 2018

Scenár 2

Pre porovnanie vplyvu niektorých parametrov na výsledky modelu, bola pre druhý scenár zmenená počiatková podmienka a simulovaná bola len teplota v doméne pôdnej matrice bez vplyvu preferenčného prúdenia. V riešenom profile majú preferenčné cesty pomerne malé zastúpenie, ktoré sa pohybuje v rozmedzí 7 % objemového podielu pri povrchu po 5 % v hĺbke 300 cm (tabuľka 5).

Tabuľka 5 Objemový podiel preferenčných ciest v pôdnom profile

Hĺbka	od	0	6	8	18	20	68	70	75
[cm]	do	6	8	18	20	68	70	75	300
Podiel [%]		7	6,84	6,79	6,52	6,47	5,19	5,13	5

V prípade tohto scenára bola počiatková podmienka v hĺbke 300 cm určená obdobne ako pri prvom scenári, ale pre odhad boli použité len maximá z roku 2018. To zvýšilo počiatkovú podmienku o 0,3 °C na 10,6 °C.

Výsledky po týchto dvoch zmenách boli takmer identické s minimálnymi rozdielmi. Simulácie teplôt oboch scenárov sa zhodujú počas celej vegetačnej sezóny. Vplyv domény preferenčného prúdenia na teplotu v pôdnej matrici je teda v tomto prípade veľmi malý. Rovnako nevýznamné je aj zvýšenie počiatkovej podmienky, ktorá by musela byť výrazne zmenená, aby bola dosiahnutá pozorovateľná zmena výsledkov.

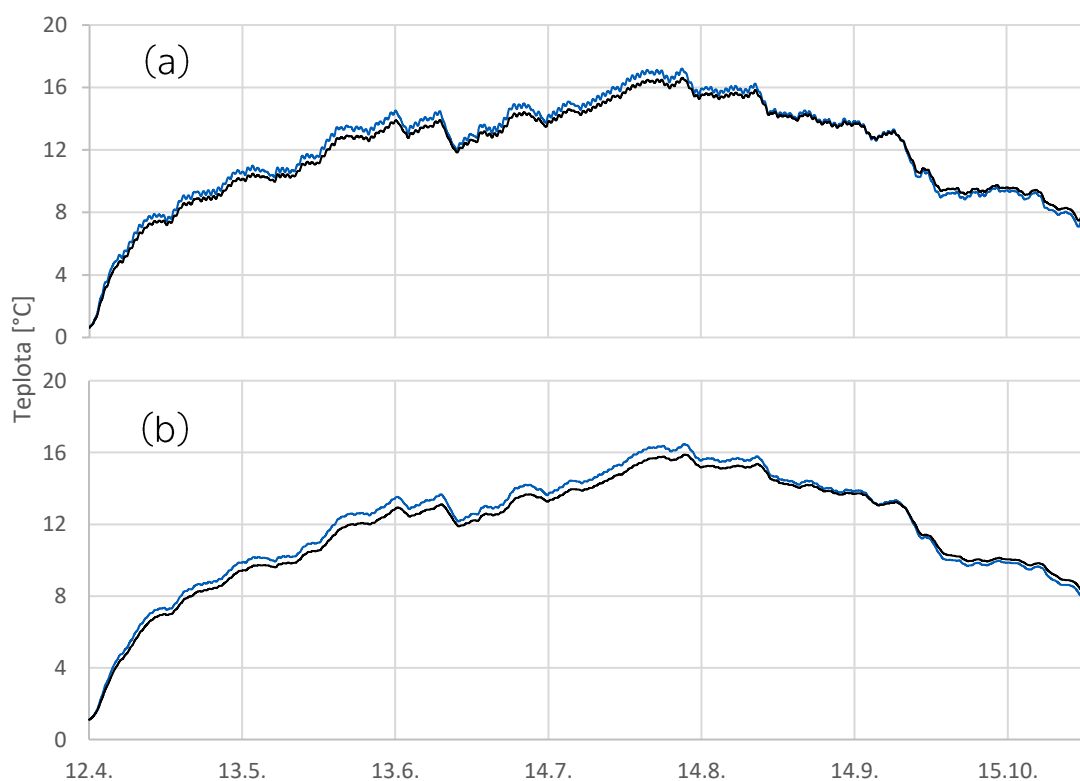
Scenár 3

V prípade tretieho scenára bolo opäť použité preferenčné prúdenia a počiatočná podmienka 10,3 °C v hĺbke 300 cm. Jedinou zmenou bolo zvýšenie tepelnej vodivosti nasýtenej pôdy o 20 cm²/d v prvých 3 vrstvách pôdneho profilu.

Tabuľka 6 Zvýšenie tepelnej vodivosti nasýtenej pôdy v profile vo vrstvách 1-3 pre scenár 3

Vrstva	Hĺbka [cm]	Scenár 1 b1/C _w [cm ² /d]	Scenár 3 b1/C _w [cm ² /d]
1	0 - 8	18,1	38,1
2	8 - 20	41,5	61,5
3	20 - 70	57,8	77,8

V tabuľke 6 je viditeľné, že zmena v prvej vrstve znamenala viac ako dvojnásobné zvýšenie vodivosti. Pre druhú vrstvu to bol nárast vodivosti o približne 50 % a v prípade tretej vrstvy predstavovala zmena približne jednu tretinu pôvodnej tepelnej vodivosti.



Obrázok 22 Porovnanie simulovaných teplôt modelom S1D v pôdnej matrici zo scenára 1 (čierna) a zo scenára 3 (modrá) vo variante B od 12.04.2018 do 31.10.2018 v hĺbkach (a) 30 cm a (b) 45 cm

Po tejto zmene sa výsledky simulácie mierne zmenili. Zlepšením, ktoré je viditeľné na obrázku 22, je zvýšenie dennej variability v profile v pre porovnávaných hĺbkach.

Z porovnaní scenárov na obrázku 22 je vidieť, že počas leta sa simulované teploty zvýšili, čo znamená väčšiu nezhodu s meranými teplotami. Naopak ku koncu simulácie sa teploty scenára 3 znížili a viac sa tak priblížili meraniam z vegetačnej sezóny roku 2018.

4 Záver

V blízkosti meteostanice Uhlířská boli v roku 2017 nainštalované do pôdneho profilu teplotné sondy 107 od spoločnosti Campbell Scientific, ktoré merajú teplotu na povrchu a v profile v hĺbkach 15, 30 a 45 cm. Teploty v profile od ich inštalácie do roku 2022 nenamerali ani raz hodnoty menšie než 0 °C. To naznačuje, že prítomná pôdna voda v profile vôbec nemrzne. Je to spôsobené snehovou pokrývkou, ktorá sa každý rok drží na povrchu celú zimu, a tým obmedzuje vplyv teploty vzduchu na teploty v pôde.

Teplotný režim pôdy v skúmanej lokalite by sa dal rozdeliť na dva typy, a to počas vegetačnej sezóny, kedy teplota klesá s klesajúcou hĺbkou a počas zimy, kedy naopak teplota s hĺbkou rastie. V septembri ku koncu vegetačnej sezóny dochádza k striedaniu oboch režimov počas niekoľkých dní, až sa nakoniec režim úplne ustáli na zimný.

Tenzometre tlaku pôdnej vody T8 od spoločnosti METER Group Inc., nainštalované v hĺbkach 21, 34 a 51 cm pod povrchom, ktoré merajú teplotu pôdy ako druhotnú veličinu boli overené ako spoľahlivé ukazovatele týchto hodnôt. Porovnania teplôt meraných tenzometrami s meraniami teplotných sond nainštalovaných v rovnakom profile ukázali, že merané dáta sú dostatočne reprezentatívne pre teplotu pôdneho profilu. Pre určenie zhody medzi meraniami boli použité koeficienty determinácie, ktoré vyšli viac ako 0,98 pre všetky tri riešené tenzometre.

Model sínusovej funkcie podľa Hillela (2004), ktorý aproximuje priebeh teploty počas dňa je zjednodušený model na základný odhad priebehu teploty v pôdnom profile. Model dokáže veľmi presne opísať priebeh na povrchu pôdneho profilu, avšak s klesajúcou hĺbkou klesá aj presnosť modelu. Tá závisí na priemernej teplote a amplitúde teploty na povrchu počas dňa a správne definovanej tlmiacej hĺbke, ktorá určuje posun a zmenu amplitúdy sínusovej funkcie. S prihliadnutím na fakt, že model je vysoko univerzálny a na výpočet potrebuje len 3 hodnoty je jeho presnosť dobrá a na prvotnú aproximáciu teplotného režimu v pôde je dostačujúci.

S1D je výpočtový, numerický, 1-dimenzionálny model, ktorý dokáže presne simulovať tok vody a priebeh teploty v pôdnom profile. Riešený profil v Jizerských horách počas vegetačnej sezóny v roku 2018 bol simulovaný dvomi variantami, pre ktoré sa líšila hĺbka simulácie.

Pri variante A bola riešená efektívna zvislica od povrchu do hĺbky 45 cm pod povrchom, kde bola použitá okrajová podmienka z nameraných teplôt v tejto hĺbke. Vďaka vysokej presnosti okrajových podmienok a pomerne malej uvažovanej hĺbke profilu boli dosiahnuté výsledky simulácie veľmi blízke meraným hodnotám.

V prípade variantu B bol riešený profil hlboký 3 m a okrajová podmienka bola zadaná ako nulový gradient. Počiatočná podmienka v hĺbke 3 m bola odhadnutá na 10,3 °C pomocou preloženia meraných maxím v rokoch 2018 – 2021. Simulované boli tri scenáre.

Prvý scenár bol simulácia so známymi parametrami pôdy a s odhadnutou teplotou v hĺbke 3 m. V tomto prípade sa teploty v hĺbke 15 cm veľmi dobre zhodovali s meranými dátami, ale výsledky v hĺbke 30 cm pod povrchom už neboli také uspokojivé a mali výrazne nižšiu dennú variabilitu, než merané hodnoty.

Pre druhý scenár bolo uvažované len prúdenie v doméne pôdnej matrice bez vplyvu preferenčných ciest a počiatočná podmienka bola odhadnutá len z maxím z roku 2018 ($T_{init} = 10,6$ °C). Výsledky teplôt druhého scenára sa takmer identicky zhodovali s prvým scenárom, a teda je možné usúdiť, že v študovanom prípade v porovnávaných hĺbkach (15, 30 a 45 cm) nemá preferenčné prúdenie výrazný vplyv na teploty v pôdnej matrici.

V prípade tretieho scenára boli navýšené hodnoty tepelnej vodivosti nasýtenej pôdy v prvých troch vrstvách prostredia o 20 cm²/d. Pomocou toho bola dosiahnutá vyššia denná variabilita teplôt v profile, čiže došlo k zlepšeniu oproti prvému scenáru. Rovnako sa zlepšila zhoda medzi simulovanými a meranými teplotami na konci vegetačného obdobia. Naopak, v letnom období došlo k navýšeniu simulovaných teplôt, a tým sa zhoda znížila.

5 Bibliografia

BUCHAN, G.D. (2001). Soil temperature regime. V Smith, K.A. & Mullins, E.D. (eds). Soil and environmental analysis: physical methods. Marcel Dekker, New York, 539-594

Campbell Scientific, 2023a. CS215 [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/cs215-l>

Campbell Scientific, 2023b. 107 [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/107>

Campbell Scientific, 2023c. CR1000 [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/cr1000>

ČGS, 2023, [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z:

<http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/mapove-aplikace>

CÍSLEROVÁ, M. & VOGEL, T. (1998). *Transportní procesy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01866-0.

ČÚZK, 2023. WMS – Ortofoto mapa [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz/>

DUCHÁČEK, L. (2015). *EXPERIMENTÁLNÍ POVODÍ ČHMÚ V JIZERSKÝCH HORÁCH-HISTORIE, ANALÝZA DAT A PŘÍNOS PRO HYDROLOGICKOU SLUŽBU*. http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_act_rain.php

HASEGAWA, S. & YOSHIDA, S. (1982). Water uptake by dryland rice root system during soil drying cycle. *Soil Science and Plant Nutrition*, 28(2), 191–204. <https://doi.org/10.1080/00380768.1982.10432436>

HILLEL, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.

Jizerky, 2023. [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <http://www.jizerky.eu/>

KUNG, K.-J. S., STEENHUIS, T. S., KLADIVKO, E. J., GISH, T. J., BUBENZER, G., & HELLING, C. S. (2000). Impact of Preferential Flow on the Transport of Adsorbing and Non-Adsorbing Tracers. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1290–1296. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441290x>

LI, L. J., YOU, M. Y., SHI, H. A., DING, X. L., QIAO, Y. F., & HAN, X. Z. (2013). Soil CO₂ emissions from a cultivated Mollisol: Effects of organic amendments, soil temperature, and moisture. *European Journal of Soil Biology*, 55, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.009>

Meter Group, 2023. *T8 manual* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://library.metergroup.com/Manuals/UMS/T8_Manual.pdf

ONWUKA, B. M. (2016). Effects of soil temperature on Some Soil properties and plant growth. *Scholarly Journal of Agricultural Science*, 6(3), 89–93. <http://www.scholarly-journals.com/SJAS>

PHILIP, J.R., & de VRIES, D. A. (1957). *Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients*. Trans. Am. Geophys. Union 38, 222–232

PREGITZER, K. & KING, J. (2005). Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake. V: BassiriRad, H. (eds) *Nutrient Acquisition by Plants*. Ecological Studies, vol 181. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27675-0_10

QIAN, B., GREGORICH, E. G., GAMEDA, S., HOPKINS, D. W., & WANG, X. L. (2011). Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(2). <https://doi.org/10.1029/2010JD015012>

SKALOVÁ, V., DOHNAL, M., VOTRUBOVÁ, J., VOGEL, T., & ŠANDA, M. (2022). Inter-annual variability of catchment water balance in a montane spruce forest. *Hydrological Sciences Journal*, 67(10), 1546–1560. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2093643>

SLODIČÁK M. et al. (2005). LESNICKÉ HOSPODAŘENÍ V JIZERSKÝCH HORÁCH. In *Dr. Ing. Maciej Skorupski, Ph.D. Zemědělská Univerzita Poznaň* (Vol. 5, Vydanie 4). Milan Stoklasa. www.chmi.cz

TACHECÍ, I. P. (2002). ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAHE, FAKULTA STAVEBNÁ, *Katedra hydrauliky a hydrológie. HYDROLOGICKÝ REŽIM MALÉHO HORSKÉHO POVODÍ A ODHAD ÚČINKŮ ZMĚNY POROSTU. Doktorská dizertačná práca.*

van GENUCHTEN, M. Th. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898

VOGEL, T., van GENUCHTEN M. Th., & CÍSLEROVÁ M. (2001). Effect of the shape of soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24

VOGEL, T., DOHNAL, M., & DUŠEK, J. (2004). AquaTerra. *Bench scale modeling approaches: Contract No.: 505428 (GOCE)*. Sub-Priority 1.1.6.3: Global Change and Ecosystems. EUROPEAN COMMISSION's Specific Programme: "Integrating and strengthening the European Research Area".

VOGEL, T., DOHNAL, M., & VOTRUBOVÁ, J. (2011). Modeling heat fluxes in macroporous soil under sparse young forest of temperate humid climate. *Journal of Hydrology*, 402(3–4), 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.030>

VOTRUBOVÁ, J., DOHNAL, M., VOGEL, T., & TESAŘ, M. (2012). On Parameterization of Heat Conduction in Coupled Soil Water and Heat Flow Modelling. V *Soil & Water Res* (Vol. 7, Vydanie 4).

VÚV TGM, 2023. *DIBAVOD* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.dibavod.cz/>

6 Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Povodie Uhlířská (Podklady: ČÚZK, 2023; VÚV TGM, 2023).....	14
Obrázok 2 Meteostanica Uhlířská (Fotografia: Jana Votrubová, 2023).....	15
Obrázok 3 Inštalácia teplotných sond 107 (Fotografia: Michal Dohnal, 2017).....	17
Obrázok 4 Schéma hlavice tenzometru T8 (MeterGroup, 2023).....	17
Obrázok 5 Schematické zobrazenie a) retenčnej krivky a b) funkcie hydraulickej vodivosti s vyznačenou vstupnou hodnotou vzduchu h_s a teoretickou maximálnou vlhkosťou θ_m (upravené podľa Vogela et al. (2004))	22
Obrázok 6 Zobrazenie meraných teplôt vzduchu v 200 cm nad povrchom v rokoch 2016 - 2021.....	28
Obrázok 7 Zobrazenie zmeny smeru prúdenia toku tepla v pôdnom profile v septembri 2018 v hĺbkach s meraniami teplotných sond.....	30
Obrázok 8 Zobrazenie priebehu teploty v pôdnom profile na základe meraní teplotných sond na povrchu a v hĺbkach 15, 30 a 45 cm pod povrchom vo vybraných časoch počas dňa 10.09.2018.....	30
Obrázok 9 Priebeh zrážkovej epizódy a teploty v pôdnom profile v hĺbkach s meraniami teplotných sond v júni 2018.....	31

Obrázok 10 Priebeh zrážkovej epizódy v decembri 2018 a zobrazenie priebehu teplôt na povrchu a v hĺbkach s meraniami teplotnými sondami.....	32
Obrázok 11 Porovnanie teplôt meraných tenzometrami s teplotami vypočítanými z meraní teplotných sond v hĺbkach (a) 21 cm, (b) 34 cm a (c) 51 cm s vyjadreným koeficientom determinácie (R^2) a znázornenou trendovou spojnicou (červená)....	33
Obrázok 12 Priebeh teploty meranej tenzometrom (čierna) a teploty vypočítanej z meraní teplotných sond (modrá) v hĺbke 34 cm pod povrchom počas roku 2018	34
Obrázok 13 Priebeh meranej teploty (čierna) porovnaný s priebehom sínusovej funkcie (modrá) a zobrazenie priemernej teploty počas 24 hodín vo vybraný jarný deň v roku 2018.....	35
Obrázok 14 Zobrazenie priebehu meraných teplôt (čierna) a priebehu modelu sínusovej funkcie (modrá) vo vybraných hĺbkach v pôdnom profile počas jarného dňa v roku 2018.....	36
Obrázok 15 Priebeh meranej teploty na povrchu profilu (čierna) a modelu sínusovej funkcie (červená) a zobrazenie priemernej teploty vo vybraný letný deň v roku 2018	36
Obrázok 16 Zobrazenie priebehu meraných teplôt (čierna) a modelu sínusovej funkcie (červená) vo vybraných hĺbkach v pôdnom profile a vyznačená priemerná teplota na povrchu vo vybraný letný deň v roku 2018.....	37
Obrázok 17 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v pôdnej matrici (modrá) a v doméne preferenčného prúdenia (šedá) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 (a) na povrchu a v hĺbkach (b) 15 cm, (c) 30 cm a (d) 45 cm	39
Obrázok 18 Zobrazenie maximálnych meraní tenzometrami a teplotnými sondami v pôdnom profile v rokoch 2018 - 2021 s vyjadrením mocninatej funkcie pre odhad teploty v hĺbke 300 cm.....	40
Obrázok 19 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v pôdnej matrici (modrá) modelom S1D v scenári 1 pre variant B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbkach (a) 15 cm, (b) 30 cm a (c) 45 cm.....	41
Obrázok 20 Priebeh zrážkovej epizódy na konci júna s priebehom modelovaných (modré) a meraných (čierne) teplôt v pôdnom profile vo vybraných hĺbkach pod povrchom v roku 2018.....	42
Obrázok 22 Simulované teploty (a) v doméne pôdnej matrice a (b) v doméne preferenčného prúdenia v scenári 1 vo variante B počas vegetačnej sezóny v roku 2018	43
Obrázok 23 Porovnanie simulovaných teplôt modelom S1D v pôdnej matrici zo scenára 1 (čierna) a zo scenára 3 (modrá) vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbkach (a) 30 cm a (b) 45 cm.....	44

7 Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Hydraulické vlastnosti pôdy.....	26
Tabuľka 2 Tepelné vlastnosti pôdy	26
Tabuľka 3 Základné štatistické parametre teplôt pôdy v meraných hĺbkach v rokoch 2018 - 2021.....	29
Tabuľka 4 Porovnanie reálnych a počítaných amplitúd teplôt vo vybraných hĺbkach a koeficient determinácie meraných a modelovaných hodnôt	37
Tabuľka 5 Objemový podiel preferenčných ciest v pôdnom profile.....	43
Tabuľka 6 Zvýšenie tepelnej vodivosti nasýtenej pôdy v profile vo vrstvách 1-3 pre scenár 3	44

8 Zoznam rovníc

Rovnica (1) Sínusová funkcia teploty na povrchu	20
Rovnica (2) Sínusová funkcia teploty pod povrchom.....	20
Rovnica (3) Tlmiaca hĺbka.....	20
Rovnica (4) Richardsova rovnica	21
Rovnica (5) Kapacitný tvar Richardsovej rovnice.....	21
Rovnica (6) Funkcia vlhkosti pôdy.....	22
Rovnica (7) Funkcia hydraulickej vodivosti pôdy	22
Rovnica (8) Richardsova rovnica domény pôdnej matrice.....	23
Rovnica (9) Richardsova rovnica domény preferenčného prúdenia	23
Rovnica (10) Transport tepla v doméne pôdnej matrice.....	24
Rovnica (11) Transport tepla v doméne preferenčného prúdenia	24
Rovnica (12) Počiatočná podmienka tlakovej výšky	24
Rovnica (13) Okrajová podmienka - nulový gradient	25

9 Prílohy

Zoznam príloh

Príloha 1 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu

Príloha 2 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (zelená) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom

Príloha 3 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (oranžová) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom

Príloha 4 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom

Príloha 5 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu

Príloha 6 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (zelená) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom

Príloha 7 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (oranžová) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom

Príloha 8 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom

Príloha 9 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu

Príloha 10 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (zelená) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom

Príloha 11 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (oranžová) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom

Príloha 12 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom

Príloha 13 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu

Príloha 14 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (zelená) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom

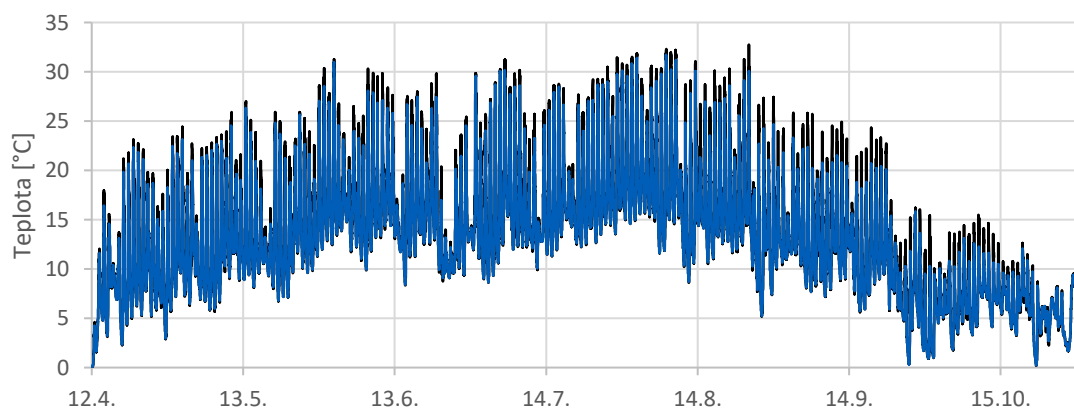
Príloha 15 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (oranžová) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom

Príloha 16 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom

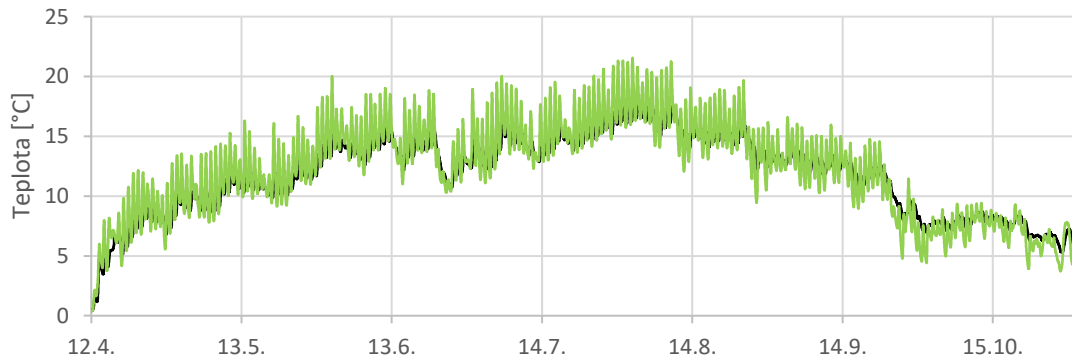
Príloha 17 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (zelená) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom

Príloha 18 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (oranžová) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom

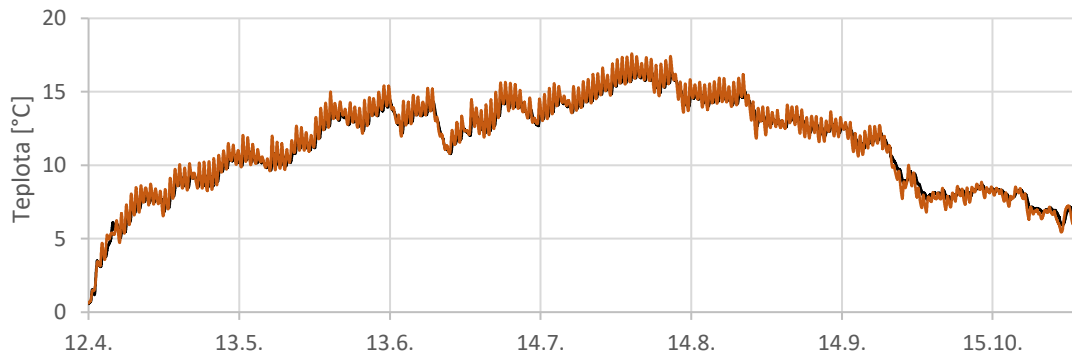
Príloha 19 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom



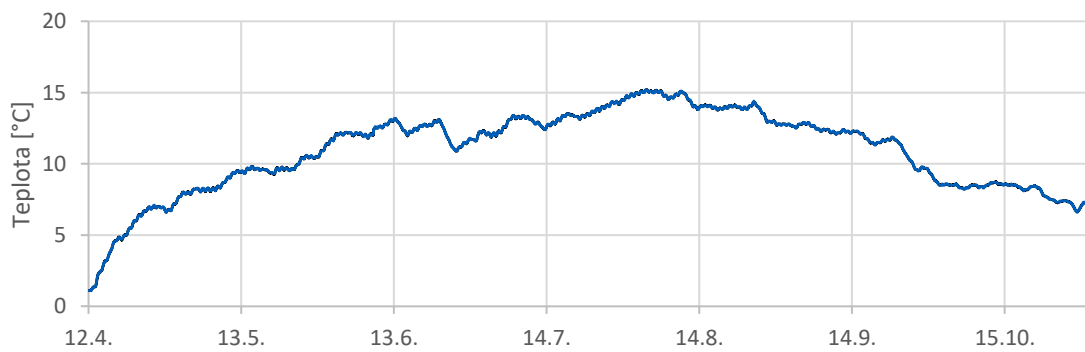
Príloha 1 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu



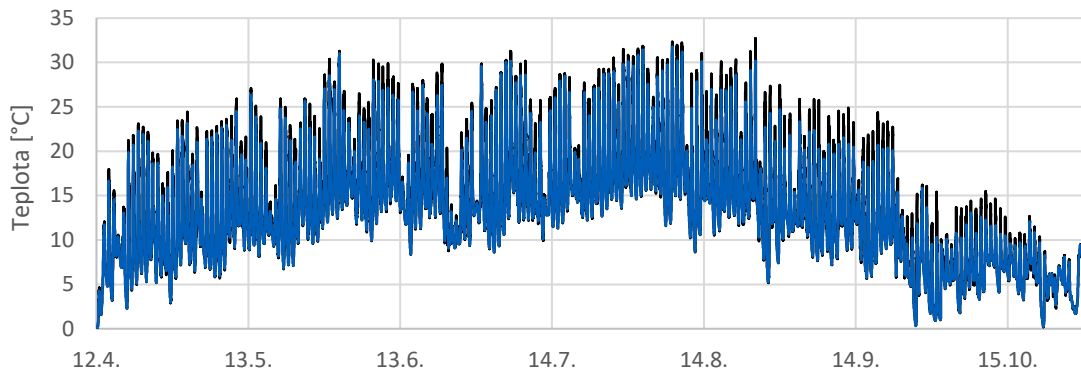
Príloha 2 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (zelená) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom



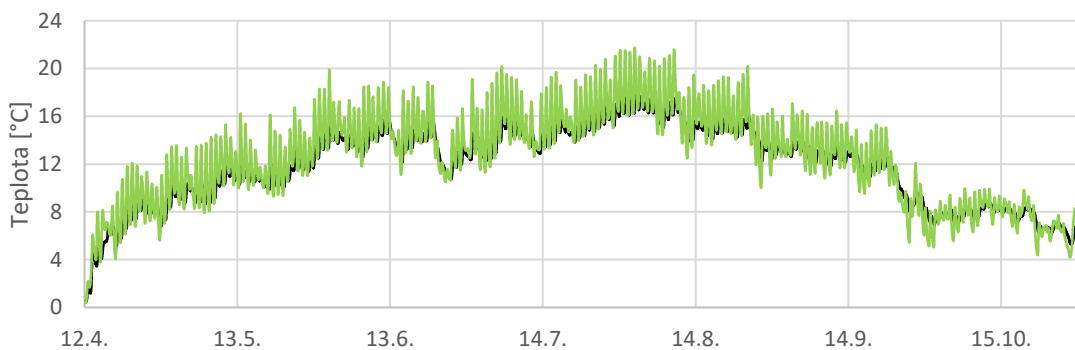
Príloha 3 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (oranžová) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom



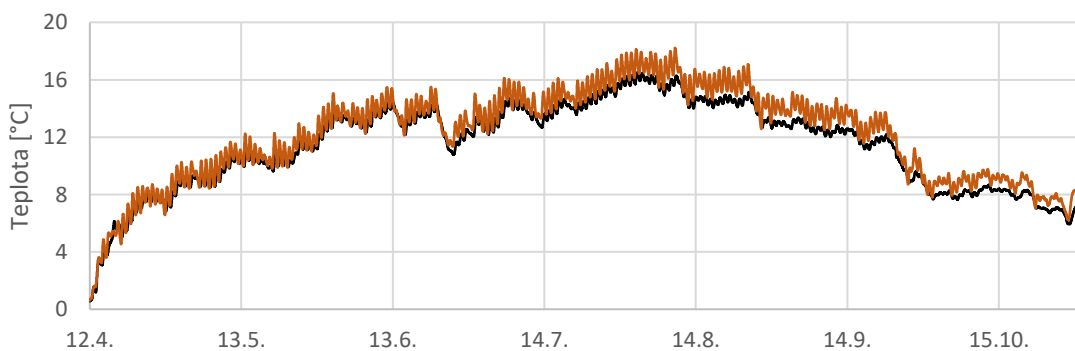
Príloha 4 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D vo variante A od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom



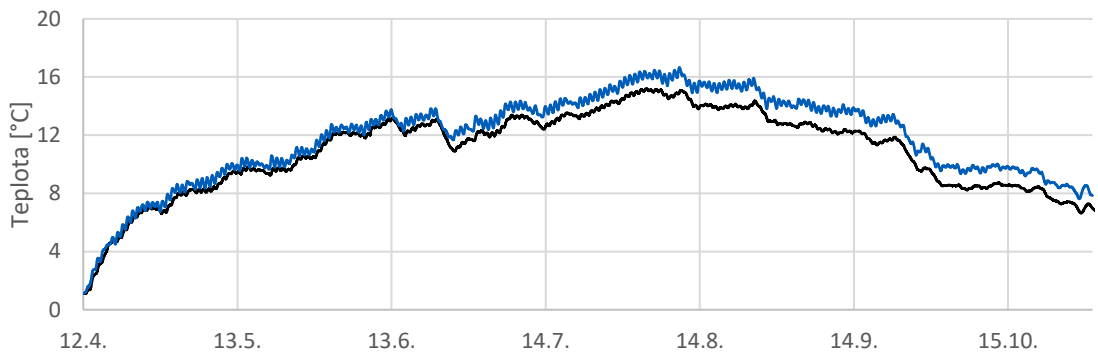
Príloha 5 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu



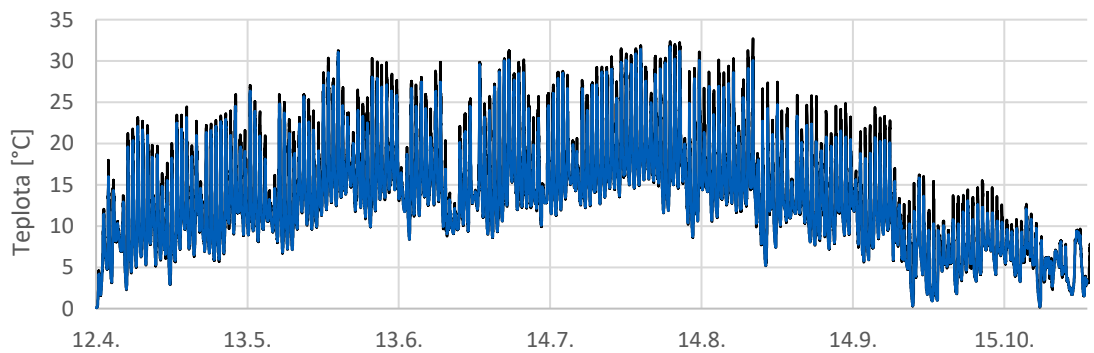
Príloha 6 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (zelená) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom



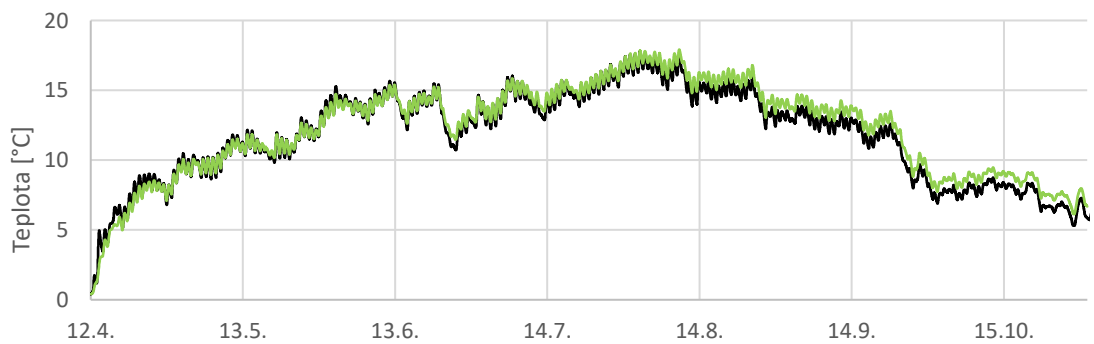
Príloha 7 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (oranžová) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom



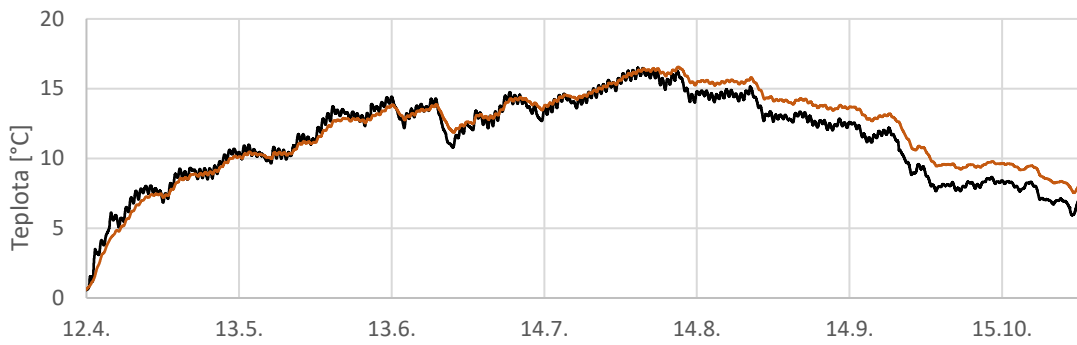
Príloha 8 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčných ciest (modrá) modelom S1D v scenári 1 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom



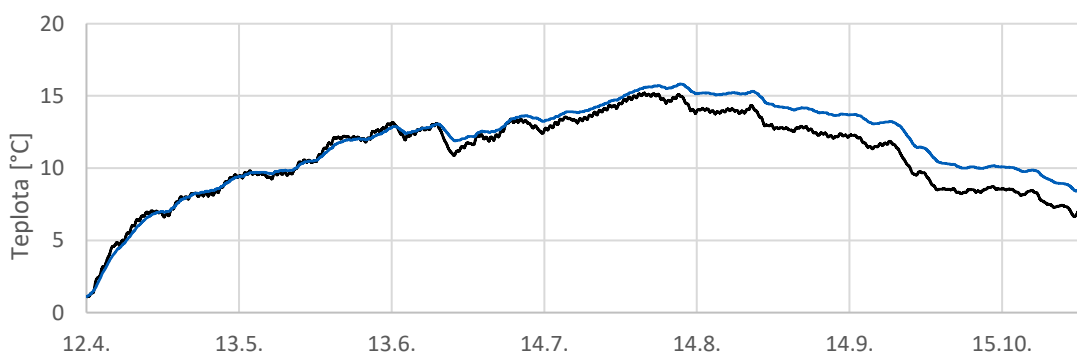
Príloha 9 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu



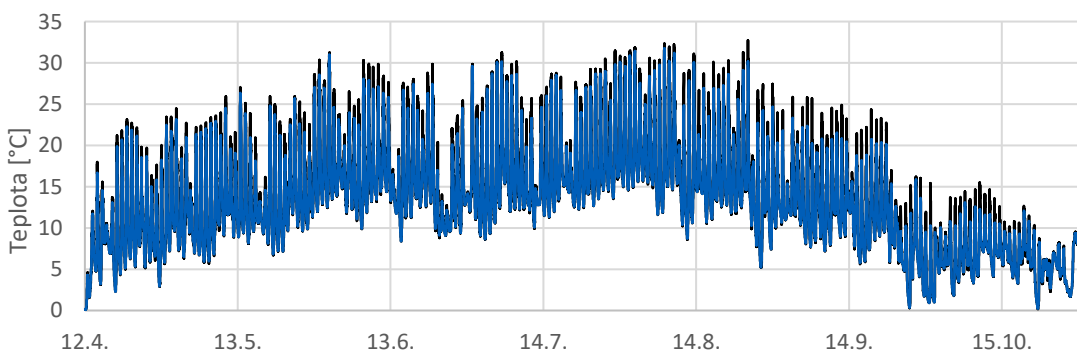
Príloha 10 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (zelená) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom



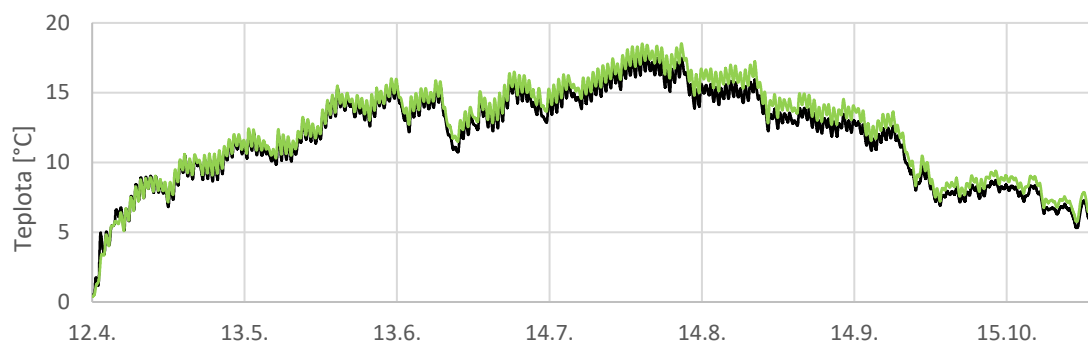
Príloha 11 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (oranžová) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom



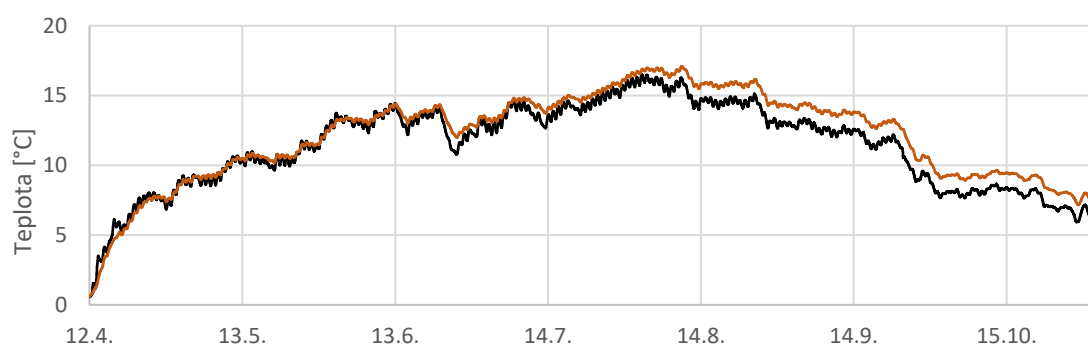
Príloha 12 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 2 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom



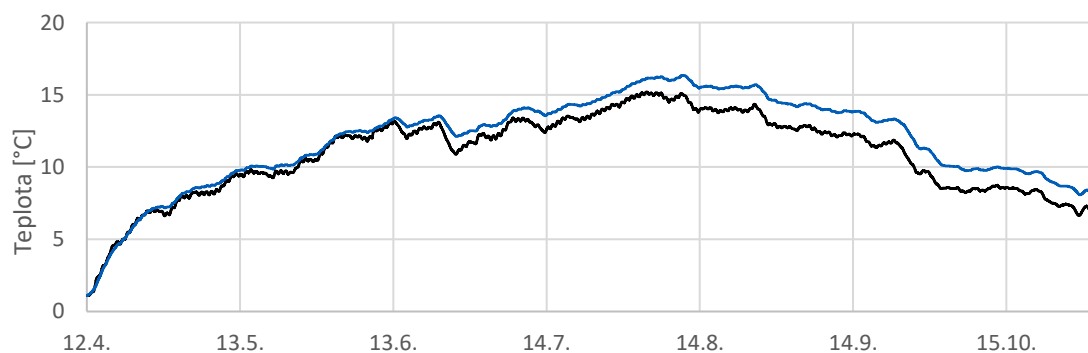
Príloha 13 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 na povrchu



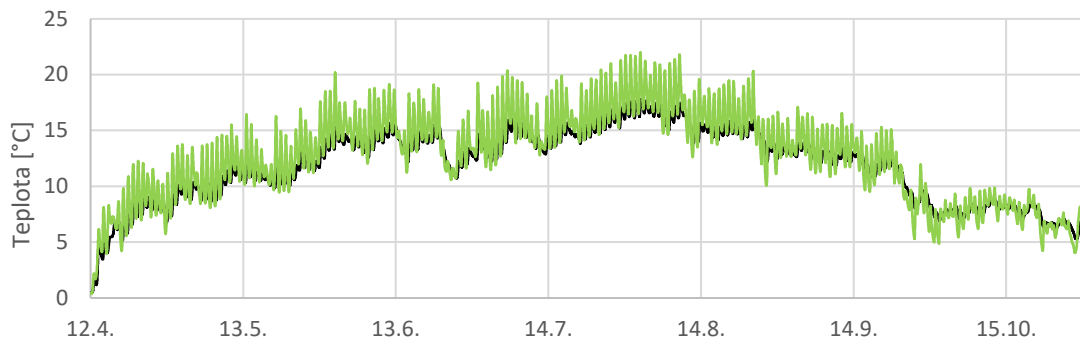
Príloha 14 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (zelená) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom



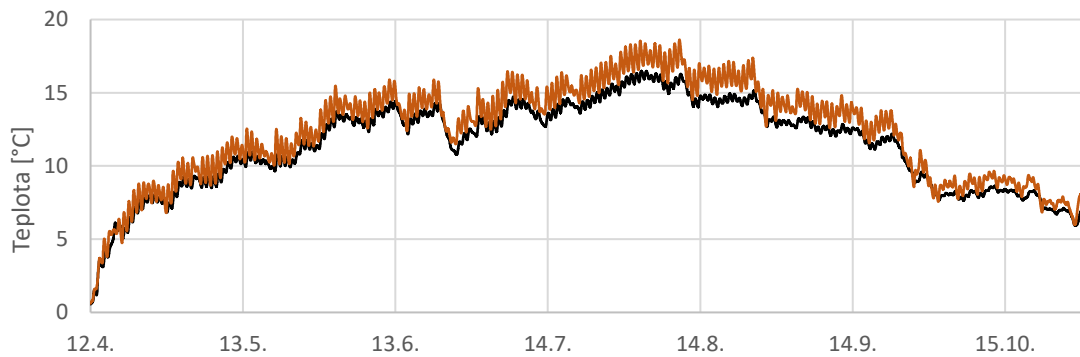
Príloha 15 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (oranžová) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom



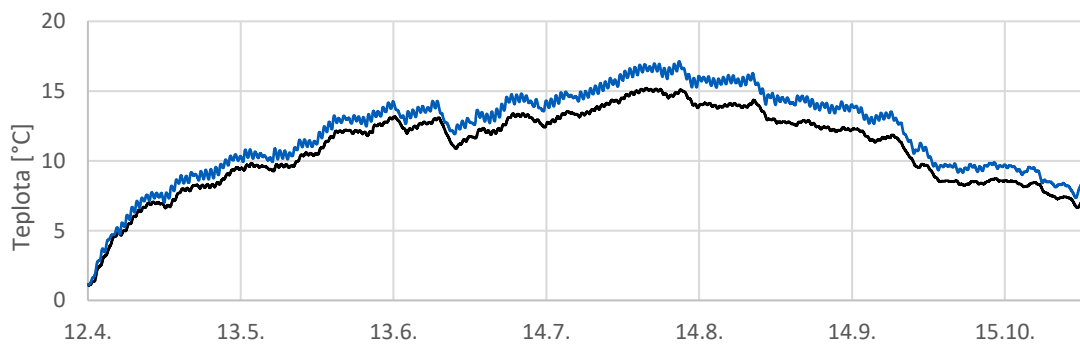
Príloha 16 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne pôdnej matrice (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom



Príloha 17 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (zelená) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 15 cm pod povrchom



Príloha 18 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (oranžová) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 30 cm pod povrchom



Príloha 19 Porovnanie meraných (čierna) a simulovaných teplôt v doméne preferenčného prúdenia (modrá) modelom S1D v scenári 3 vo variante B od 12.4.2018 do 31.10.2018 v hĺbke 45 cm pod povrchom