

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů  
Katedra pedologie a ochrany půd



**Monitoring a simulace půdní vlhkosti a tepla v okolí  
horizontálního tepelného výměníku**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Daniela Teplá  
Vedoucí práce: prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

© 2013 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Monitoring a simulace půdní vlhkosti a tepla v okolí horizontálního tepelného výměníku" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne \_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala své vedoucí diplomové práce prof. Ing. Radce Kodešové, CSc. za trpělivé a ochotné vedení a cenné připomínky. Dále bych ráda poděkovala Ing. Miroslavu Férovi a Ing. Aleši Klementovi za odborné konzultace. Také děkuji firmě VESKOM, spol. s r.o. za poskytnutí možnosti terénního měření na pozemku firmy a poskytnutí cenných informací o tepelných čerpadlech. Nakonec velice děkuji za podporu celé své rodině a partnerovi.

# **Monitoring a simulace půdní vlhkosti a tepla v okolí horizontálního tepelného výměníku**

## **Souhrn**

Povrchová vrstva Země je významným zdrojem tepla pro tepelná čerpadla používaná k vytápění objektů. V zemích, kde se dbá na životní prostředí, jsou tepelná čerpadla velmi rozšířena. Zavádění tepelných čerpadel se do budoucna bude neustále zvyšovat a to nejenom z hlediska ekonomického, ale i z hlediska životního prostředí. Proto se diplomová práce věnovala simulaci proudění vody a transportu tepla v půdě v blízkosti horizontálního tepelného výměníku.

Na pozemku firmy VESKOM, spol. s r.o. byla měřena půdní vlhkost v hloubkách 10, 20, 30, 40, 60 a 100 cm v pěti sondách během roku 2011 a 2012. Současně s půdní vlhkostí se měřila teplota půdy v hloubce 7 cm pod pěti různými povrchy (pod betonovou dlaždicí, pískem, štěrkem, mulčovací kůrou a trávou). Režim půdní vody a tepla byl simulován pomocí programu HYDRUS – 1D. K tomu účelu byly změřeny hydraulické a tepelné vlastnosti půdy.

Vyhodnocené základní půdní vlastnosti potvrdily antropogenitu půdy na sledovaném pozemku. Výsledky přímé simulace proudění vody uspokojivě odpovídají naměřeným vlhkostem. Některé nesrovnalosti lze připsat kavernám či větším zbytkům stavebního materiálu obsažených v půdě. Dále bylo použito inverzní modelování (tj. optimalizace hydraulických parametrů) tak, aby se přiblížily simulované vlhkosti v půdě k naměřeným hodnotám. Pro transport tepla byly využity tři varianty přímého modelování a tři varianty, které vznikly při inverzním modelování. Varianty se odlišovaly hydraulickými vlastnostmi půdy. Z kumulativních toků vody a tepla ve spodní části profilu vyplývá znatelný vliv proudění vody na transport tepla v půdě. Varianty se dále odlišovaly vlivem rozdílné úpravy povrchu půdy. Materiál, který zajišťoval nejvyšší prostup tepla, byla betonová dlaždice. Nejnižší prostup tepla poskytla mulčovací kůra. Upravený povrch štěrkem způsobil nejvyšší akumulaci tepla v profilu i nejvyšší dotaci tepla do oblasti pod simulovaným půdním profilem. Závěrem se dá říci, že úprava povrchu půdy výrazně ovlivňuje vodní a tepelný režim půdy.

**Klíčová slova:** půda, půdní voda, půdní teplo, využití půdního tepla, tepelné kolektory

## **Monitoring and simulation of soil water content and temperature nearby horizontal heat exchanger**

### **Summary**

The surface layer of the Earth is an important heat source for heat pumps used for space heating. Heat pumps are extensively in those countries where environment plays important role. Installation of heat pumps will increase constantly in the future, in economical as well as in environmental point of view. Therefore, the thesis was focused on water flow simulation and soil heat transfer near a horizontal heat exchanger.

The soil water content was measured in depths of 10, 20, 30, 40, 60 and 100 cm with five probes in the premises of company VESKOM, spol. s r. o. during years 2011 and 2012. Soil temperature was measured together with soil water content at 7 cm depth in five various layers (concrete paving stone, sand, gravel, mulch and grass). Soil water and heat mode was simulated through software application HYDRUS - 1D. For this purpose, soil hydraulic and thermal properties were measured.

Evaluated basic soil properties confirmed anthropogenic soil at the monitored premises. The results of the direct water flow simulation correspond satisfactory to the measured moisture. Some discrepancies can be attributed to caverns or to larger pieces of construction material contained in the soil. Inverse simulation was used (i.e. optimization of hydraulic parameters) in order to converge the simulated soil moisture to the measured values. Three alternatives of direct simulation and three alternatives that resulted from the inverse simulation were used for heat transfer. These alternatives differed in soil hydraulic properties. Obvious influence of the water flow on the heat transfer in the soil is consequent upon the cumulative water and heat flows in the lower part of the profile. Furthermore, the alternatives differed due to various modification of soil surface. Concrete paving stone proved to be the best material for heat transfer. Conversely, mulch provided the lowest heat transfer. The surface modified by gravel caused the highest accumulation of heat in the profile and the highest supply of heat into the area under the simulated soil profile. In conclusion, it can be stated that modification of soil surface significantly affects water and heat mode of soil.

**Key words:** soil, soil water, soil heat, soil heat recovery, thermal collectors

# OBSAH

<b>1.</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Vědecké hypotézy a cíle práce .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Literární rešerše .....</b>	<b>3</b>
3.1.	Tepelná čerpadla .....	3
3.1.1.	VZDUCH - VZDUCH.....	4
3.1.2.	VZDUCH – VODA.....	4
3.1.3.	VODA – VODA .....	5
3.1.4.	ZEMĚ – VODA.....	6
3.2.	Proudění vody v půdě .....	10
3.2.1.	Referenční evapotranspirace .....	11
3.2.2.	Hydraulické vlastnosti půdy .....	12
3.3.	Transport tepla v půdě .....	13
3.3.1.	Půdní tepelná kapacita .....	15
3.3.2.	Půdní tepelná vodivost.....	15
3.3.3.	Půdní tepelná difuzivita .....	16
3.4.	Program HYDRUS – 1D.....	17
<b>4.</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>19</b>
4.1.	Základní charakteristika vybraného území .....	19
4.2.	Monitoring režimu půdní vody ve vybraných profilech .....	21
4.3.	Měření teploty půdy pod různými povrchy .....	22
4.4.	Měření nasycených hydraulických vodivostí v terénu.....	23
4.5.	Stanovení hydraulických vlastností na neporušených půdních vzorcích v laboratoři .....	24
4.6.	Stanovení půdních vlastností na porušených půdních vzorcích .....	25
4.6.1.	Aktivní a výměnné pH.....	25
4.6.2.	Salinita půdy .....	25

4.6.3.	Stanovení obsahu oxidovatelného uhlíku.....	26
4.6.4.	Stanovení specifické hmotnosti půdy pomocí pyknometru.....	26
4.6.5.	Zrnitostní rozbor.....	26
4.6.6.	Tepelné vlastnosti.....	27
4.7.	Simulace proudění vody a transportu tepla.....	28
4.7.1.	Přímá simulace proudění vody v půdním profilu.....	28
4.7.2.	Kalibrace modelu proudění vody.....	30
4.7.3.	Modelování proudění vody a transportu tepla.....	31
<b>5.</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>34</b>
5.1.	Základní půdní vlastnosti.....	34
5.2.	Hydraulické půdní vlastnosti.....	35
5.3.	Tepelné půdní vlastnosti.....	35
5.4.	Simulace proudění vody a transportu tepla v půdě.....	38
5.4.1.	Přímá simulace proudění vody v půdě.....	38
5.4.2.	Numerická inverze – optimalizace parametrů.....	45
5.4.3.	Simulace transportu tepla v půdě.....	51
<b>6.</b>	<b>Diskuze.....</b>	<b>63</b>
6.1.	Půdní tepelné charakteristiky.....	63
6.2.	Přímá simulace proudění vody v půdě.....	64
6.4.	Simulace transportu tepla v půdě.....	65
6.4.1.	Vliv hydraulických vlastností na teplotu půdy.....	65
6.4.2.	Vliv úpravy půdního povrchu na teplotu půdy.....	67
<b>7.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>70</b>
<b>8.</b>	<b>Seznam literatury.....</b>	<b>71</b>
<b>9.</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>76</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam obrázků a tabulek.....</b>	<b>78</b>
<b>12.</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>81</b>

# 1. ÚVOD

Povrchová vrstva Země je zdrojem tepla pro tepelná čerpadla používaná k vytápění objektů. V bývalém Československu se první tepelná čerpadla využívala již v 50. a 60. letech 20. století. Od počátku 90. let 20. století nastal jejich výrazný rozvoj. V zemích, kde lidé zodpovědně přistupují k využívání přírodních zdrojů, jsou tepelná čerpadla velmi rozšířena. Zavádění tepelných čerpadel pro vytápění objektů se do budoucna bude neustále zvyšovat a to nejenom z hlediska ekonomického, ale i z hlediska životního prostředí.

Tato oblast alternativního zdroje obnovitelné energie z hlediska pedologie není zcela prozkoumána. Chybí dlouhodobý pohled na využití tepelného čerpadla pro vytápění a jeho vliv na povrchovou vrstvu Země a naopak. Tato práce se zabývá teoretickým prouděním vody a přenosem tepla v půdě na pozemku firmy VESKOM pomocí programu HYDRUS – 1D. Během necelých dvou let se na zájmovém území měřila půdní vlhkost i půdní teplota pod pěti různými povrchy (tráva, betonová dlaždice, štěrk, písek a mulčovací kůra). Vyhodnotily se hydraulické a tepelné charakteristiky půdy. Sloučením těchto informací byla snaha vyhodnotit skutečné proudění vody a tepla v půdě a zjistit, jak úprava půdního povrchu může ovlivnit obsah podzemní vody a teplotu půdy.



## 2. VĚDECKÉ HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE

Vědecké hypotézy jsou:

- Předpokládáme, že režim půdního tepla je významně ovlivněn režimem půdní vody.
- Předpokládáme, že režim vody a tepla v půdním profilu je ovlivněn úpravou povrchu půdy.

Cílem diplomové práce je seznámení se s principem tepelných výměníků a teorií popisu proudění vody a transportu tepla v půdách. Praktická část je věnována experimentálnímu a numerickému vyhodnocení vodního a tepelného režimu půdy v okolí horizontálního tepelného výměníku na pozemku firmy VESKOM, spol. s r.o.

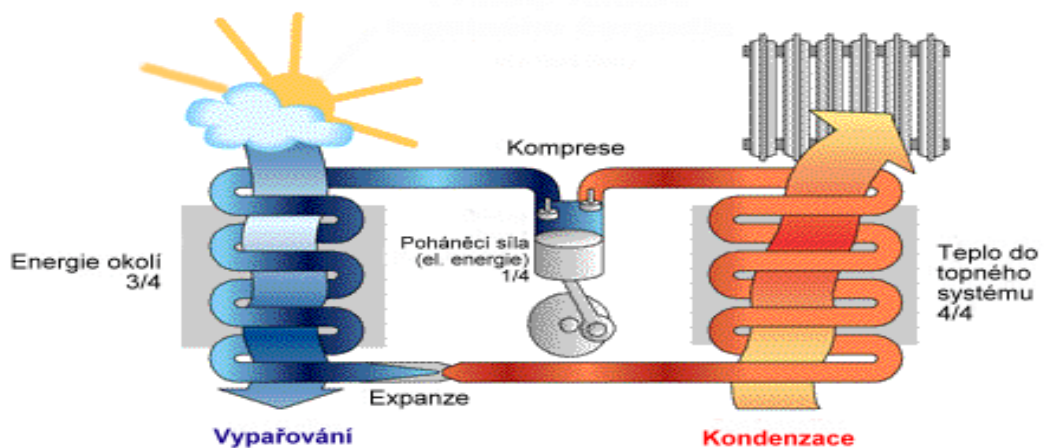
Cíle práce jsou:

- vyhodnotit základní, hydraulické a tepelné vlastnosti půdy na zkoumaném pozemku
- monitorovat vlhkostní poměry na daném pozemku
- nakalibrovat model HYDRUS – 1D pro simulaci vodního režimu půdy
- numericky vyhodnotit vliv úpravy půdního povrchu na tepelný režim půdy

## 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 3.1. Tepelná čerpadla

Tepelné čerpadlo je jedním z alternativních zdrojů obnovitelné energie. Odnímá teplo z okolního prostředí vytápěného objektu a převede ho na vyšší teplotní hladinu. Uvolněné teplo se používá pro vytápění budov a ohřev užitkové vody. Venkovní část tepelného čerpadla zajišťuje odebírání tepla ze zvoleného zdroje (země, vody, vzduchu). Všechny tyto zdroje mají obvykle nižší teplotu, než je ta, kterou potřebujeme získat. Tepelné čerpadlo z nich dokáže pomocí cyklu komprese a expanze plynu (tzv. Carnotův cyklus) získat teplo a vytvořit teplotu kolem 55 °C (obr. 1) (Karlík, 2009).



Obr. 1 Princip tepelného čerpadla (archiv IVT)

V bývalém Československu byla první tepelná čerpadla osazena již v 50. a 60. letech 20. století, jednalo se však o ojedinělé akce. K prvním rozsáhlejšími pokusům o jejich využití došlo až v první polovině 80. let, kdy byla instalována řada tepelných čerpadel z dovozu. Od poloviny 80. let pak byly k dispozici i první stroje tuzemské výroby. Od počátku 90. let 20. století nastal výrazný rozvoj využití tepelných čerpadel (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2011).

V zemích, kde lidé zodpovědně přistupují k využívání přírodních zdrojů, jsou tepelná čerpadla velmi rozšířena. Například ve Švédsku je tepelným čerpadlem vybaveno více než 90% nově postavených rodinných domů. U nás bylo k roku 2000 instalováno 400 tepelných čerpadel, v roce 2004 pak 1 597 kusů, v roce 2006 2 500 kusů, v roce 2008 4 032 kusů a v roce 2010 6 564 kusů. Zavádění tepelných

čerpadel pro vytápění objektů se do budoucna bude neustále zvyšovat a to nejenom z hlediska ekonomického, ale i z hlediska životního prostředí (Mikundová, 2008; Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2011).

### **Typy tepelných čerpadel**

Rozlišujeme několik základních typů tepelných čerpadel, podle toho, z jakého media je tepelná energie získávána (Karlík, 2009; PREforum, 2002).

#### **3.1.1. VZDUCH - VZDUCH**

Nejrozšířenějším tepelným čerpadlem pro malá nebo lokální využití jsou tepelná čerpadla systému vzduch – vzduch (obr. 2), kde způsob získávání nízkopotenciálního tepla je z venkovního vzduchu a teplo je předáváno uměle vyvolaným prouděním vnitřního vzduchu pomocí ventilátoru přes tepelný výměník. Vzhledem k umístění vnitřní jednotky v dané místnosti nebo vnitřním prostoru se jedná o druh "lokálního" topidla a je tak vhodný pro menší uzavřené prostory.



Obr. 2 Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch (archiv IVT)

#### **3.1.2. VZDUCH – VODA**

Venkovní vzduch je nejdostupnějším zdrojem nízkopotenciálního tepla. Teplo obsažené ve vzduchu se využívá přímo. Jinými slovy výparník tepelného čerpadla přímo proudí venkovní vzduch. Tepelné čerpadlo se většinou umísťuje vedle objektu na zahradu, v případě půdní vestavby na střechu objektu. Z hlediska instalace a finanční náročnosti je tento systém jednoznačně nejvýhodnější. Průměrná teplota venkovního vzduchu v topné sezoně v Praze převyšuje +4°C, což je dostatečná

teplota pro plnohodnotné vytápění objektu pomocí tepelného čerpadla vzduch – voda (obr. 3).

Obr. 3 Tepelné čerpadlo vzduch – voda (archiv IVT)



### 3.1.3. VODA – VODA

Nejefektivnější, ale zároveň nejrizikovější způsob získávání nízkopotenciálního tepla je systém voda – voda. Tepelná energie se může získávat z vody povrchové i podzemní. Nejlepším zdrojem tepelné energie jsou studny (obr. 4a). Teplo z podzemní vody se získává tak, že voda je čerpaná například z čerpací studny do výparníku tepelného čerpadla. V něm se ochladí a ochlazená je vrácena do druhé, vsakovací studny. Chod tepelného čerpadla je u tohoto systému přímo závislý na průtoku vody výměníkem, a to po celou dobu plánované životnosti tepelného čerpadla. Teplota podzemní vody je celý rok konstantní a pohybuje se kolem 10–12 °C. Hloubka studně se pohybuje mezi 5 a 15 metry a průměr vrtu studně je obvykle 22 cm. Čerpací a vsakovací studně musejí být od sebe vzdáleny minimálně 15 m. Dále lze využít povrchovou vodu, kde soustavu trubek odebírající nízkopotenciální teplo pro tepelné čerpadlo, můžeme umístit např. do potoka, řeky, či rybníka (obr. 4b). I zde musí být množství vody dostatečné a trubky umístěné pod hladinou musí být zajištěny proti povodni a jinému poškození. Důležité je, že tyto systémy vyžadují povolení příslušného vodoprávního úřadu.



Obr. 4 a, b Tepelná čerpadla voda – voda (archiv IVT)

### 3.1.4. ZEMĚ – VODA

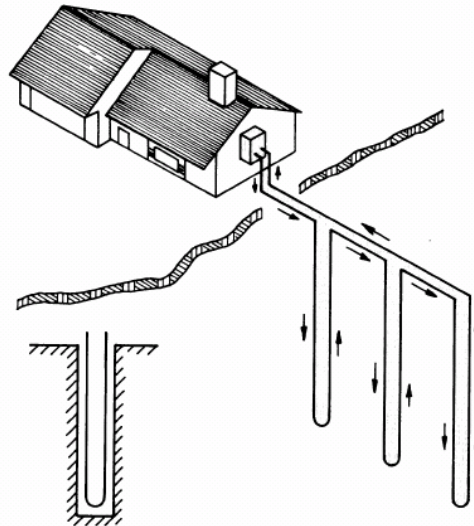
Tepelné čerpadlo země – voda využívá teplo obsažené v zemi (tzv. geotermální teplo). Principem je, že nízkopotenciální teplo vnějšího prostředí (půdy) je pomocí teplotonosné kapaliny, proudící v trubkách uložených v zemině, dopravováno do výměníku/výparníku tepelného čerpadla. Tam své teplo předá chladivu, které obíhá v uzavřeném okruhu tepelného čerpadla. Mírně zahřáté chladivo je následně v plynném stavu nasáváno do kompresoru, kde je stlačeno na vysoký tlak. Tím je také převedeno na mnohem vyšší teplotní úroveň. Stlačené a zahřáté chladivo je přiváděno do tepelného výměníku, ve kterém předává své teplo vodě topného okruhu objektu. Odevzdáním tepla chladivo zkondenzuje a přes expanzní ventil je (stále pod velkým tlakem) vstřikováváno do výparníku. Chladivo se (za expanzním ventilem) ve výparníku začne z důvodu náhlé ztráty tlaku a teploty okamžitě odpařovat a tím odnímat teplo teplotonosné kapaliny proudící výparníkem tepelného čerpadla. Páry chladiva jsou nasávány kompresorem a celý cyklus se tak uzavírá a opakuje. K využití tepla obsaženého v půdě se nejčastěji používají horizontální výměníky (zemní kolektory) nebo vertikální vrty (zemní vrty).

#### Vertikální vrty

Tradičním primárním zdrojem energie pro tepelná čerpadla jsou geotermální vertikální vrty (obr. 5). Vrty jsou prováděny většinou do hloubek 150 m, ale mohou být prováděny až do 300 m. Trubka je obvykle vyrobena z plastu polyethylenu nebo mědi. Tyto materiály umožňují účinný přenos tepla z půdy do media. Důležité pro

tento systém je, že s hloubkou se zvyšuje teplota, která je během roku konstantní (8-12°C). Tato skutečnost činí vertikální potrubní systémy mnohem účinnější než horizontální, ale z dlouhodobějšího hlediska se půda v okolí horizontálního výměníku lépe regeneruje (slunečním zářením). Rybach (2003) tvrdí, že u tepelného čerpadla, v jednosměrném režimu, je doba zotavení půdy zhruba rovná délce využívání (např. praktické využití 30 let zotavení 30 let).

Vrty jsou finančně i realizačně náročnější, například špatně se vrtá v jílech a nesoudržných zeminách, kde je potřeba pažit a vrt má tendenci se zavírat. Oproti tomu instalovat vrt do skály je lepší, jelikož drží profil a nemusí se pažit. Také vrtná soustava se nemusí vždy dostat ke konkrétnímu místu vrtu (členitost terénu, nevhodné přístupové cesty, apod.).



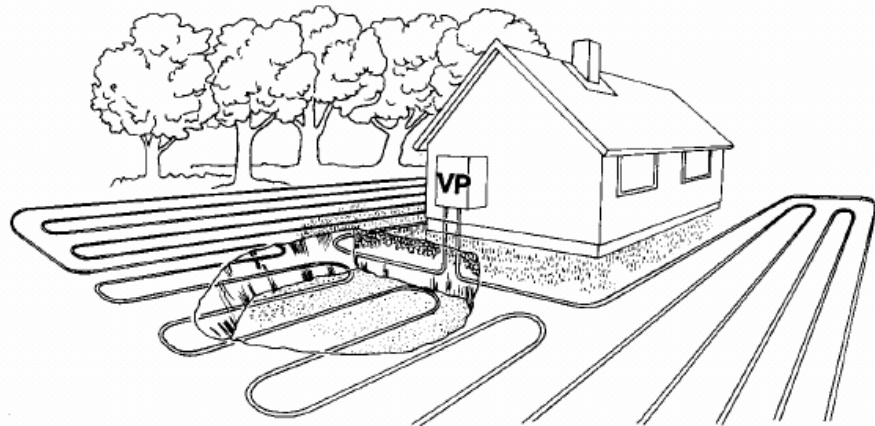
Obr. 5 Tepelné čerpadlo země – voda – vertikální vrty (Palomares, 2008)

### **Horizontální kolektory**

Tento systém je vhodný především u novostaveb a objektů, kde ještě nejsou dokončeny terénní úpravy zahrady a kde objekt má dostatečně velký pozemek. Kolektor je tvořený z polyethylenového potrubí které je ukládáno do výkopu. V našich podmínkách se doporučuje hloubka 1,2 - 1,5 m. Šířka a délka je určena vhodným systémem uložení potrubí (obr. 7. např. klasické uložení potrubí (3), spirály (2)). Celková potřebná délka kolektoru je stanovena výpočtem a vychází z výkonu tepelného čerpadla. Uvádí se, že je to plocha dvakrát větší než plocha vytápěného objektu. Pozemek, pod kterým je zemní kolektor uložen, má být co nejvíce přístupný



slunečnímu záření i dešťovým srážkám. Technologicky se pracuje s energií slunce, která se v letním období ve formě tepla akumuluje do vrchních vrstev země. Tuto naakumulovanou energii tepelným čerpadlem průběžně odebíráme. Uložení potrubí a napojení tepelného čerpadla ve vytápěném objektu je vidět na obrázku 6. Výkopové práce jsou podstatnou položkou v ceně instalace zemního kolektoru, nicméně nejsou zdaleka tak finančně a administrativně náročné jako hlubinné vrty.

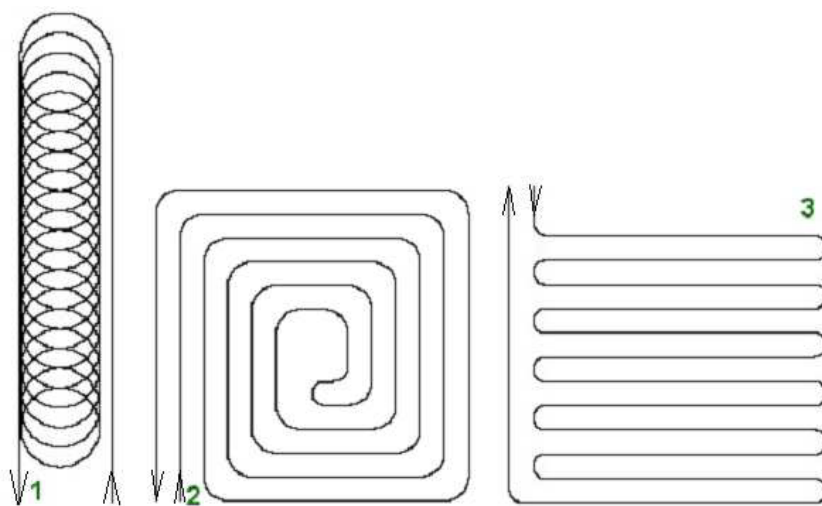


Obr. 6 Tepelné čerpadlo země – voda - horizontální výměník (Palomares, 2008)

Mezi nevýhody tohoto systému se uvádí např. ovlivnění povrchové vegetace vychlazováním zemin a topný faktor, který je ovlivněn střídáním ročních období. Dále se dá hovořit o částečném znehodnocení pozemku tím, že pod jeho velkou částí jsou uloženy trubky primárního výměníku, na které nelze dále stavět a vysazovat hlubokokořenní stromy. V kamenitých zeminách nebo silně zvodnělých štěrcích jsou výkopové práce velmi nákladné a ve skalním podloží se tato aplikace neprovádí.

### **Výměník typu Slink**

Jedná se o druh zemního výměníku tepla (obr. 7), který se ukládá do větší hloubky než horizontální výměníky tepla. Pokládá se do výkopu hloubky 2 m, šířce 1,2 m a délce cca 20 m. Výhodou výměníku typu Slink je, že není zapotřebí taková plocha pozemku jako u horizontálního tepelného výměníku. Nevýhodou je, že zde dochází k vyššímu podchlazování zemního masivu v důsledku využití menší plochy pozemku. Proto se tento systém doporučuje u objektů, které jsou v letním období systémem chlazeny a teplo odebrané z objektu pomáhá regenerovat zeminu.



Obr. 7 Možnosti uložení horizontálního tepelného výměníku - Slink (1), spirála (2), klasické uložení (3) (Karlík, 2009)

Funkci tepelného čerpadla mohou ovlivnit tepelné vlastnosti půdy a podzemní voda. Tepelné vlastnosti půdního prostředí a šíření tepla v půdě je významně ovlivněno typem horniny a režimem půdní vody (tab. 1) (Čížek, 2005). Například křemen má velmi vysokou tepelnou vodivost, ale pokud půda obsahuje velký počet pórů zaplněných vzduchem, tepelná vodivost je nízká (vzduch dobře izoluje). Když se půdní póry zaplní vodou, tepelná vodivost se zvýší, protože se propojí půdní zrna (voda je dobrým vodičem).

Tab. 1 Tepelná vodivost materiálů. Pro výpočet tepelné vodivosti vody a vzduchu jsou použity stupně Celsia (Bristow, 2002)

<b>Materiál</b>	<b>Tepelná vodivost (<math>W m^{-1} K^{-1}</math>)</b>
čedič	2,2
žula	2,0
křemen	8,8
jílové minerály	2,9
organická hmota	0,25
voda	$0,552 + 2,34 \times 10^{-3} T - 1,10 \times 10^{-5} T^2$
vzduch	$0,0237 + 0,000064 T$
led (0°C)	2,18



### 3.2. Proudění vody v půdě

Pohyb půdní vody je komplikovaný proces, protože půda je porézní prostředí. Voda v půdě se pohybuje v pórech. Rozlišujeme nasycené a nenasycené proudění, podle toho jestli voda vyplňuje všechny nebo jen část pórů. O nasycené proudění se jedná, pokud je objemová vlhkost půdy rovna pórovitosti. Pokud je objemová vlhkost menší než pórovitost, pak se jedná o nenasycené proudění. Proudění vody v půdě plynule přechází z nasyceného do nenasyceného proudění a naopak (Brady, 1990).

Pohyb vody v půdě je způsoben rozdílem v potenciální energii. Voda v půdě proudí z míst s vyšší potenciální energií do míst s nižší potenciální energií. Potenciální energie vody v půdě je označována jako celkový potenciál. Hlavní složky celkového potenciálu jsou tlakový, gravitační a osmotický potenciál. První dva jmenované potenciály jsou hnací silou pro pohyb vody ve všech půdách (Brady, 1990; Kutílek et Nielsen, 1994).

Proudění vody v půdě můžeme vyjádřit pomocí rovnice kontinuity (rovnice 1) a Darcyho zákona (rovnice 2). Rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění ve svislém směru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (1)$$

kde  $\theta$  je objemová vlhkost ( $L^3L^{-3}$ ),  $t$  je čas (T),  $q_z$  je hustota toku vody ( $LT^{-1}$ ) a  $z$  je souřadnice (L). Darcyho zákon pro jednorozměrné proudění vody:

$$q_z = K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2)$$

kde  $K(h)$  je nenasycená hydraulická vodivost ( $LT^{-1}$ ),  $H$  je celkový potenciál (L) a  $h$  je tlaková výška (L). Po dosazení Darcyho zákona do rovnice 1, vznikne Richardsova rovnice pro jednorozměrné proudění ve svislém směru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Pro výpočty se častěji využívá Richardsova rovnice v kapacitním tvaru, kde  $H=h+z$ :

$$\frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (4)$$

kde  $d\theta/dh$  je vodní kapacita  $C(h)$  ( $L^{-1}$ ). V této formě je Richardsova rovnice použitelná pro nasycené i nenasycené proudění, lze jí tedy kontinuálně popsat proudění vody v půdním profilu i s uvažováním polohy hladiny podzemní vody.

Zahrnutím do rovnice 4 propadový člen  $S$  ( $L^{-1}$ ), který odečítá potřebu vody rostlinným pokryvem, vznikne:

$$\frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S \quad (5)$$

Intenzita extrakce rostlinným pokryvem je pak definována pouze v oblasti kořenové zóny o určité hloubce a je závislá na čase. Nejčastěji se intenzita extrakce v numerických modelech transportu vyjadřuje pomocí vztahu (Feddes et al., 1978):

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (6)$$

kde  $\alpha(h)$  je bezrozměrná funkce vyjadřující schopnost rostlin extrahovat vodu v závislosti na tlakové výšce a  $S_p$  je potenciální rychlost extrakce.

### 3.2.1. Referenční evapotranspirace

Hodnotu evapotranspirace ovlivňují především klimatické podmínky a půdní poměry. Konkrétně je významná půdní vlhkost, intenzita vztlínání vody v půdě, hloubka hladiny podzemní vody, reliéf (sklon, expozice, nadmořská výška), teplota půdy a teplota vzduchu, vítr, vlhkost vzduchu a atmosférický tlak (Rožnovský a Litschmann, 2003).

Výpočet a určení referenční evapotranspirace (většinou se uvažuje travní porost) podle metodiky FAO je obecným přístupem k řešení problematiky výparu (evaporace, evapotranspirace). Pod pojmem referenční evapotranspirace se rozumí evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobnému standardnímu travnímu porostu, který se vyznačuje během celého kalendářního roku konstantní výškou, konstantním albedem, konstantním povrchovým odporem hypotetické plodiny, plným (maximálním) zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou (Rožnovský a Litschmann, 2003). Penman-Monteithova rovnice podle metodiky FAO pro výpočet referenční evapotranspirace (FAO, 1990):

$$ET_o = \frac{1}{\lambda^*} \left( \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{\rho c_p (e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \right) \quad (7)$$

kde  $ET_0$  je referenční evapotranspirace ( $\text{mm den}^{-1}$ ),  $\lambda^*$  je výparné latentní teplo ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ),  $R_n$  je radiace na povrchu hypotetického povrchu ( $\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$ ),  $G$  je tok tepla v půdě ( $\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$ ),  $\rho$  je hustota atmosféry ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  je měrné teplo vlhkého vzduchu (tj.  $1,013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $(e_a - e_d)$  je sytostní doplněk (kPa),  $e_a$  je tlak nasycených vodních par při teplotě  $T$  (kPa),  $e_d$  je skutečný tlak vodní páry (kPa),  $r_c$  je odpor povrchové plodiny ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $r_a$  je aerodynamický odpor ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $\Delta$  je sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) a  $\gamma$  je psychrometrická konstanta ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### 3.2.2. Hydraulické vlastnosti půdy

K základním charakteristikám půdy, popisující hydraulické vlastnosti půdního prostředí, patří průběh retenční čáry půdní vlhkosti a hydraulické vodivosti. Na jejich správném určení a vhodném použití závisí výsledky modelování pohybu vody v půdě.

**Retenční čára půdní vlhkosti (RČPV)** představuje schopnost půdy zadržovat vodu. RČPV je vztah mezi objemovou vlhkostí  $\theta$  a tlakovou výškou  $h$ . Objemová vlhkost půdy je definována jako poměr objemu vody v pórech k objemu půdního vzorku. Je tedy závislá na poměru jemných a hrubých kapilárních pórů. Pro každou půdu musíme stanovovat vlastní retenční čáru, protože je pro každou půdu jedinečná. V terénu lze stanovit retenční čáru pomocí čidel na měření vlhkosti s čidly na měření tlakové výšky. V laboratoři se retenční čáry stanovují pomocí podtlakových (pískový tank) a přetlakových přístrojů (přetlakový aparát). Stanovení retenční čáry půdní vlhkosti Tempskou celou je uvedeno v části 4.5.

Využívané analytické funkce k vyjádření retenčních čar půdní vlhkosti jsou rovnice Brookse a Coreyho (1964), van Genuchtena (1980) a Kosugi (2002). Pro simulaci proudění vody v půdě je nejpoužívanější vyjádření retenční čáry podle van Genuchtena (1980):

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

$$\theta_e = \frac{1}{(1 + (\alpha_1 |h|)^n)^m} \quad (9)$$

kde  $\theta_e$  je efektivní vlhkost ( $\text{L}^3 \text{ L}^{-3}$ ),  $\theta_r$  je reziduální vlhkost ( $\text{L}^3 \text{ L}^{-3}$ ),  $\theta_s$  je nasycená vlhkost ( $\text{L}^3 \text{ L}^{-3}$ ),  $\alpha_1$  je převrácená hodnota vstupní hodnoty vzduchu ( $\text{L}^{-1}$ ),  $|h|$  je

absolutní hodnota tlakové výšky ( $L$ ) a  $n$ ,  $m$  jsou empirické tvarové koeficienty, často je uvažován vztah mezi parametrem  $m$  a  $n$ :  $m=1-1/n$ .

**Křivka hydraulických vodivostí** vyjadřuje vztah mezi hydraulickou vodivostí  $K$  a tlakovou výškou vody  $h$  nebo objemovou vlhkostí  $\theta$ . Hydraulická vodivost vyjadřuje schopnost půdy transportovat vodu a zvyšuje se s rostoucím obsahem půdní vody (Nassar et Horton, 2002). Vyjádření hydraulické vodivosti vyplývá z Darcyho zákona (rovnice 2). Pro vyjádření průběhu nenasycených hydraulických vodivostí (popřípadě pro jejich předpověď z relativních hydraulických vodivostí) se používá spojení Brookse a Coreyho s teorií kapilárního modelu Burdina (1953) nebo spojení van Genuchtena (rovnice 9) s teorií kapilárního modelu Mualema (1976) (rovnice 10), popřípadě Kosugi s teorií kapilárního modelu Mualema (1976).

$$K(\theta) = K_s \theta_e^{0,5} \left[ 1 - \left( 1 - \theta_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (10)$$

kde  $K(\theta)$  je křivka hydraulických vodivostí,  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost ( $LT^{-1}$ ),  $\theta_e$  je efektivní vlhkost ( $L^3 L^{-3}$ ),  $m=1-1/n$ ,  $n>1$ ,  $n$  je empirický tvarový koeficient.

Nenasycená hydraulická vodivost lze stanovit pomocí crust metody, one-step a multi-step outflow metody nebo evaporační metodou v laboratorních podmínkách. V terénních podmínkách pak můžeme použít podtlakový diskový permeametr.

Nasycená hydraulická vodivost lze stanovit terénními metodami jako je dvouválcová výtopová infiltrace, tlakovým permeametrem nebo Guelphským permeametrem (část 4.4.). Pokud se vyskytuje hladina podzemní vody lze nasycenou hydraulickou vodivost stanovit jednosondovou nebo piezometrickou metodou. V laboratorních podmínkách lze hydraulickou vodivost stanovit přístroji s konstantním či proměnným spádem (Reynolds et al., 2002).

### 3.3. Transport tepla v půdě

Hlavním zdrojem tepla je sluneční záření dopadající na povrch půdy. Ohřátý půdní povrch předává teplo do hlubších půdních vrstev. Teplota povrchu půdy je po celý rok vyšší než teplota okolního vzduchu, protože je během dne zahřívána slunečním zářením a v noci je teplo vedeno z hlubších vrstev směrem k povrchu.

Transport tepla můžeme popsat rovnicí, která se skládá z rovnice kontinuity (rovnice 11) a z Fourierova zákona (rovnice 12). Rovnice kontinuity pro jednorozměrné vertikální prostředí je:

$$\frac{\partial CT}{\partial t} = -\frac{\partial q_T}{\partial z} \quad (11)$$

kde  $q_T$  je hustota tepelného toku ( $MT^{-3}$ ),  $T$  je teplota (K),  $t$  je čas (T),  $C$  je objemová tepelná kapacita ( $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$ ) a  $z$  je souřadnice (L) (Horton, 2002).

**Hustota tepelného toku půdy** je dána množstvím přepravované energie přes jednotku plochy půdy za jednotku času ( $MT^{-3}$ ). Energie může být vedena radiací a konvekcí ve svrchních vrstvách půdy, vedení je většinou považováno za hlavní způsob přenosu energie v půdě. Často je předpokládáno, že tepelný tok v půdě je popsán analogicky k toku v pevné látce, a platí Fourierův zákon:

$$q_T = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (12)$$

kde  $\lambda$  je tepelná vodivost půdy ( $MLT^{-3}K^{-1}$ ) (Horton, 2002). Fourierův zákon je definován pro tuhé homogenní materiály za ustálených podmínek s tepelnou vodivostí, která je v podstatě konstantní po malé teplotní rozsahy. Situace je podstatně složitější při aplikaci na porézní, třífázový médium, jako je půda. Tepelná vodivost půdy se liší podle složení pevné frakce (minerální typ a množství organické hmoty), obsahem vody a objemovou hmotností. Tyto vlastnosti se obvykle liší v prostoru (horizontálně i vertikálně) a v čase. Teplotní gradient půdy indikuje proud vody přes odpařování a kondenzaci, které zahrnují současně přenos latentní energie. Sluneční záření je nejvyšší hnací silou přenosu tepla v půdě. Půdní tepelné vlastnosti se neustále mění, ale na těchto naskládaných složitých variacích jsou roční a denní vzory slunečního záření a nesrovnalosti v počasí. Výsledkem je vysoce komplexní cyklický vzor hustoty tepelného toku v půdním prostředí (Sauer, 2002).

Rovnice pro transport tepla se získá kombinací rovnic 11 a 12 (Horton, 2002):

$$\frac{\partial CT}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (13)$$

Je-li do transportu tepla zahrnuto proudění vody a odběr tepla kořeny rostlin a zanedbá-li se vliv difúze vodních par na transport tepla, lze transport tepla vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$\frac{\partial C(\theta)T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_w \frac{\partial qT}{\partial z} - C_w S T \quad (14)$$

kde  $q$  je tok vody ( $L^3T^{-1}$ ),  $C_w$  je objemová tepelná kapacita vody ( $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$ ),  $S$  je propadový člen pro vodu ( $L^{-1}$ ).

### 3.3.1. Půdní tepelná kapacita

Půdní tepelná kapacita  $C$  ( $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$ ) je tepelná vlastnost, která umožňuje charakterizaci množství tepla v půdě. Tepelná kapacita půdy především vyjadřuje množství přijímaného a uvolňovaného tepla při změně teploty. Proto hraje důležitou roli ve stanovení rozsahu kolísání ročních a denních teplot půdy (Kluitenberg, 2002). Dále tepelnou kapacitu půdy ovlivňuje voda. Vlhká zemina vykazuje vyšší úložnou tepelnou kapacitu než suchá zemina, protože suchá zemina má 3x až 5x menší měrnou tepelnou kapacitu než voda (Beneš, 2011).

Principem přímého měření objemové tepelné kapacity je zjistit maximální teplotu půdy po uvolnění tepelného impulsu na krátkou vzdálenost od zdroje tepla. Toto měření se provádí s čidlem, které se skládá ze dvou paralelních jehel, z nichž jedna obsahuje topné těleso (ohříváč sondy) a druhá obsahuje termočlánek nebo termistor (teplotní čidlo). Tepelně - pulzní dvoujehlový senzor (DPHP) se může použít k získání dat v laboratorních i v terénních podmínkách. Výhodou čidla DPHP je, že lze měřit další půdní fyzikální vlastnosti jako je tepelná vodivost půdy (Kluitenberg, 2002).

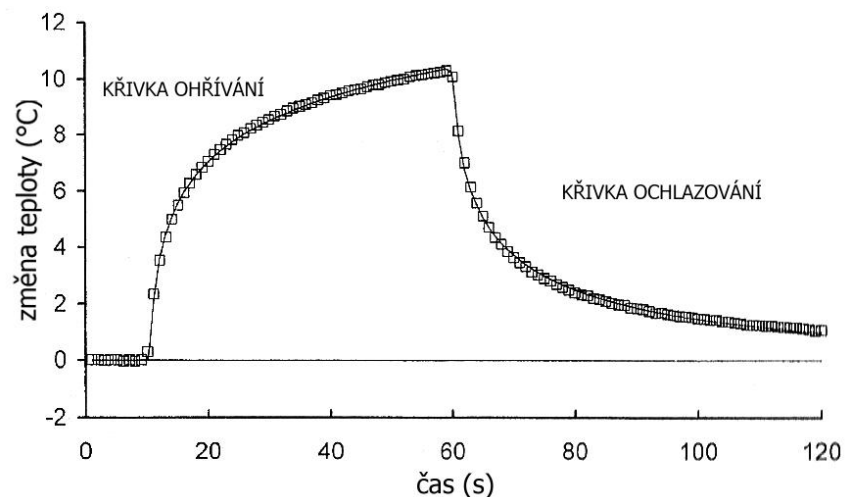
### 3.3.2. Půdní tepelná vodivost

Tepelná vodivost půdy  $\lambda$  ( $MLT^{-3}K^{-1}$ ) je schopnost půdních součástí vést teplo z jednoho místa na druhé. Tepelná vodivost půdy se vyjadřuje jako množství tepla protékajícího půdním tělesem o jednotkové ploše a mocnosti při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. Popsána Fourierovým zákonem vedení tepla (rovnice 11) (Bristow, 2002).

Tepelná vodivost půdy je složitou funkcí především mineralogického složení, strukturálně texturních vlastností horniny, její hustoty, pórovitosti a obsahu vody v hornině. Čím má zemina více pórů, tím je její tepelná vodivost menší, protože obsahuje větší množství vzduchu, který je velmi špatným vodičem tepla. Při nasycení

pórů zeminy vodou dochází ke zvětšování vlhkosti půdy a tím ke snadnějšímu vedení tepla. To je zapříčiněno podstatně vyšší tepelnou vodivostí vody než vzduchu. Se vzrůstající vlhkostí tepelná vodivost stoupá, se vzrůstajícím provzdušením klesá (Beneš, 2011).

Přímé měření tepelné vodivosti půdy může být prováděno pomocí jednojehlového senzoru nebo tepelně - pulzním dvoujehlovým senzorem, který je popsán v části Půdní tepelná kapacita. Pomocí DPHP se měří za jakou dobu a v jaké intenzitě se dostane teplo vydané topným tělesem k teplotnímu čidlu. Jednojehlový senzor má topné těleso i teplotní čidlo na jedné prodloužené jehle senzoru. Po vložení senzoru do půdy se měří teplota jehly při zahřívání a při ochlazování. Na obrázku 8 je vidět změna teploty půdy při měření prodlouženým jednojehlovým senzorem (Bristow, 2002).



Obr. 8 Změna teploty za čas při měření tepelné vodivosti půdy jednojehlovým senzorem

### 3.3.3. Půdní tepelná difuzivita

Tepelná difuzivita  $\alpha_2$  ( $L^2 T^{-1}$ ) je definována jako poměr tepelné vodivosti na objemovou tepelnou kapacitu:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda}{c} \quad (15)$$

Půdní tepelná difuzivita je parametr, který popisuje rychlost přenosu změny teploty v půdě. Laboratorní metoda pro stanovení tepelné difuzivity vyžaduje měření teploty ve známých hloubkách a času, kdy bylo odebráno nebo přidáváno teplo na

povrch půdní kolony. Metoda vyžaduje jednotnou počáteční teplotu půdní kolony a přechodovou odezvu změny teploty na povrchu kolony na začátku pokusu (Horton, 2002).

### **3.4. Program HYDRUS – 1D**

Proudění vody a transport tepla v profilu může být simulován pomocí numerických modelů. Program HYDRUS-1D je volně dostupný programový prostředek, který obsahuje jednorozměrný model konečných elementů HYDRUS pro simulaci pohybu vody, tepla a rozpuštěných látek v porézním prostředí. Numericky řeší Richardsovu rovnici pro nasycené i nenasycené proudění a advekčně disperzní rovnici pro šíření tepla a transport látek. Pomocí programu může být analyzován pohyb vody a tepla v nenasyceném, částečně nasyceném nebo zcela nasyceném porézním prostředí. Nenasycené hydraulické charakteristiky jsou zadávány výrazy dle van Genuchtena (1980) a Brookse a Corey (1964). Proudění vody a tepla se může odehrávat ve vertikálním, horizontálním nebo v jakémkoliv nakloněném směru (Šimůnek et al., 2008; Šimůnek et al., 2012).

Při přímé úloze simulace proudění vody a transportu tepla v profilu se předpokládá znalost všech parametrů charakterizujících půdní vlastnosti ve zmíněných rovnicích v předešlých kapitolách. Parametry bývají stanoveny pomocí laboratorních a terénních metod. Ve skutečnosti se, ale výsledky přímého modelování často odlišují od naměřených hodnot. Proto lze provést kalibraci modelu pro přiblížení modelovaných dat k pozorovaným hodnotám. Manuální kalibrace nebo numerická optimalizace upravuje vstupní hodnoty parametrů půdních vlastností tak, aby se co nejvíce přiblížila modelovaná a pozorovaná data. Kalibrace modelu numerickou optimalizací se nazývá inverzní modelování.

Přesná reprezentace skutečností v numerických modelech proudění ve vodou nenasycené půdě vyžaduje spolehlivé určení potřebných parametrů modelu. Inverzním modelováním se snažíme o určení takových parametrů, jako jsou zbytková vlhkost půdy, nasycená hydraulická vodivost, tvarové parametry hydraulických funkcí půdy, využitím snadno realizovatelné pozorování momentálních nebo kumulativních toků vody, tlakových výšek a vlhkostí půdy. Inverzní procedura obvykle kombinuje nelineární optimalizaci parametrů založenou na metodě nejmenších čtverců s



numerickým řešením transportních rovnic ve vodou nenasycené půdě (Twarakavi et al., 2010).

Je dobře známo, že pohyb vlhkosti a tepla v půdě jsou spojeny. Vzhledem k tomu, teplota půdy a vlhkost půdy v blízkosti rozhraní pozemků a atmosféry jsou základní proměnné pro zemědělství. Biologické procesy, jako je půdní mikrobiální aktivita a růst rostlin též závisí na vlhkosti a teplotě půdy. Vlhkost půdy v blízkosti zemského povrchu určují srážky (odtok a infiltrace) a teplotu půdy určuje rozdělení dostupné energie tepelných toků atmosféry (Parlange et al., 1998).

Chcete-li zkontrolovat vývoj půdní teploty při zemském povrchu a půdní transport tepla a vody, model HYDRUS-1D je spojen s atmosférickým systémem povrchové vrstvy. Idealizované simulace jsou prováděny za různých meteorologických podmínek (rychlosti větru a teploty) (Kleissl et al., 2007). Dahiya a kol. (2007) využili model HYDRUS-1D jako nástroj pro analýzu transportu vody a tepla a pro odhad hydraulických parametrů v polních podmínkách ve výzkumu Vliv mulčování a obdělávání půdy na vodní a teplotní režimy na sprašových půdách. Saito a kol. (2006) potvrdili, že dynamika půdní vody je silně spojena s režimem půdní teploty na základě analýzy distribuce vodních toků a toků vodní páry vs hloubka. Také Zhao a kol. (2010) použili program HYDRUS 1 – D pro modelování půdních režimů. Výzkum se zabýval otázkou, jak ovlivňuje pastva dobytka vodní a tepelný režim půdy v Mongolsku.

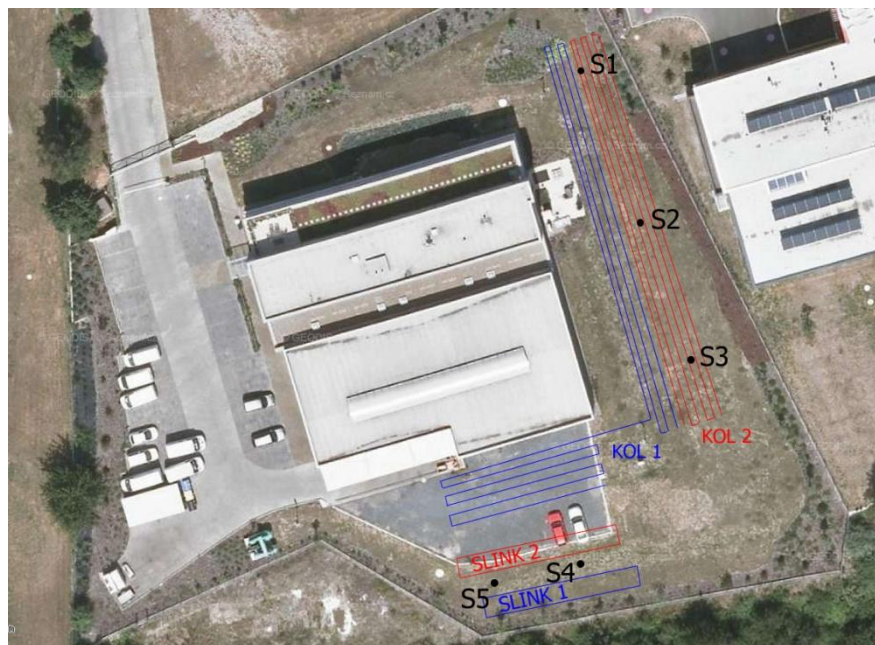
## 4. METODIKA

### 4.1. Základní charakteristika vybraného území

Pozemek se nachází na parcelách č.661/4 a 661/5; katastrální území Dolní Měcholupy, okres Hlavní město Praha. Vybraný pozemek se nachází okolo nové budovy školícího centra společnosti VESKOM, spol. s r.o. Nadmořská výška je cca 281 m. V srpnu 2008 byl dokončen administrativně-skladový areál VESKOM a tepelná čerpadla uvedena do provozu.

Na vybraném pozemku se nachází horizontální i vertikální tepelný výměník. V této diplomové práci se budeme věnovat horizontálním kolektorům. V blízkosti budovy VESKOM jsou v půdě umístěny kolektory na dvou místech. Kolektory 1, 2 mají délku 368 m vč. přívodů. Slinky 1, 2 mají délku 20 m. Kolektor 1 je v hloubce 1,5 m. Kolektor 2 je v hloubce 1 m. Slink 1 je v hloubce 1,5 m, šířka 1,2 m a slink 2 je v hloubce 1 m, šířka 1,2 m.

V blízkém okolí kolektorů bylo instalováno 5 pažnic, ve kterých se měřila půdní vlhkost. Na obrázku 9 je zobrazeno umístění kolektorů a sond na pozemku.



Obr. 9 Umístění kolektorů a pažnic

Terén okolo sídla firmy je rovný, byl upraven pomocí navezené zeminy. Půdním typem na tomto pozemku je antropozem (určeno podle českého klasifikačního systému půd Němeček a kol., 2011) (obr. 10). Profil byl rozčleněn na dva horizonty. Prvních 25 cm byla navezená kvalitnější zemina (ornice). Od 25 cm níž se nacházela různorodá zemina smíchaná se zbytky stavebního materiálu, kamenů apod.

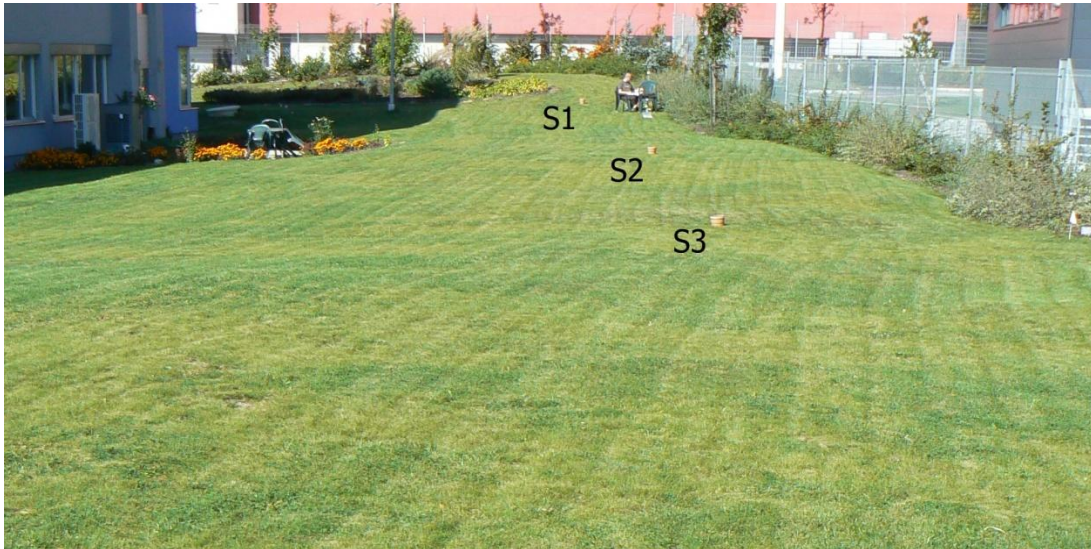


Obr. 10 Půdní profil na pozemku VESKOM



#### 4.2. Monitoring režimu půdní vody ve vybraných profilech

Na pozemku byla měřena půdní vlhkost sondou Profile Probe typ PR2 (výrobce: Delta-T Devices Ltd). V blízkosti horizontálních kolektorů bylo instalováno 5 pažnic. Půdní vlhkost se měřila v hloubce 10, 20, 30, 40, 60 a 100 cm. U kolektorů 1, 2 se nacházely 3 pažnice (sonda č. 1, 2 a 3) (obr. 11) a u slinků 1, 2 byly 2 pažnice (sonda č. 4 a 5) (obr. 12). Hodnoty byly měřeny od 2. 5. 2011.



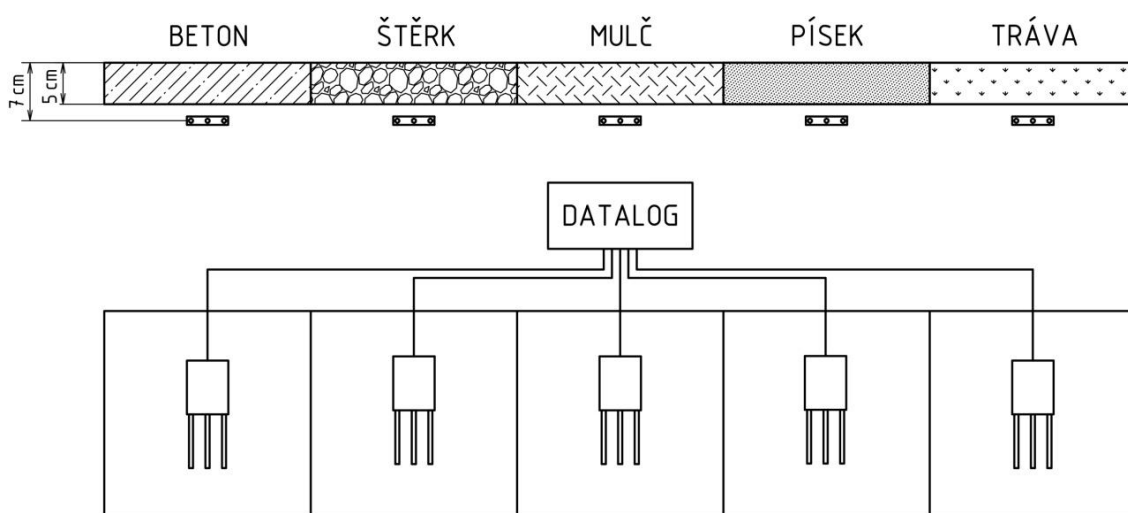
Obr. 11 Pažnice pro měření půdní vlhkosti (S1, 2, 3)



Obr. 12 Pažnice pro měření půdní vlhkosti (S4, 5)

### 4.3. Měření teploty půdy pod různými povrchy

Úprava půdního povrchu významně ovlivňuje jak vodní tak tepelný režim půdy. Proto byly na vybraném území od 26. 5. 2011 měřeny teploty a vlhkosti půdy pod různými povrchy (obr. 14). Měřilo se pod betonovou dlaždicí, štěrkem, mulčem, pískem a trávou pomocí čidel ECH<sub>2</sub>O-TE (výrobce: Decagon Devices, Inc.). Senzory jsou 5 cm dlouhé a mají tři hroty, které měří teplotu a objemovou půdní vlhkost (Anonymous, 2007). Senzory byly umístěny cca 7 cm pod různými povrchy (obr. 13). Hodnoty se automaticky zaznamenávaly každých 30 minut pomocí datalogu Em50 (výrobce: Decagon Devices Inc.).



Obr. 13 Schéma uložení senzorů ECH<sub>2</sub>O-TE



Obr. 14 Měření teploty a vlhkosti pod různými povrchy



Dále byla měřena teplota půdy teplotními čidly typu Pt1000 A. Čidla byla instalovaná 1 m od kolektoru v hloubce 20 cm a 180 cm pod povrchem. Teploty byly měřeny od 1. 3. 2011 do 28. 2. 2012. Data byla získána od firmy VESKOM.

#### 4.4. Měření nasycených hydraulických vodivostí v terénu

Nasyčená hydraulická vodivost je stav, kdy za konstantního tlaku jsou všechny póry vyplněny vodou. Takže vlhkost půdy  $\theta$  je rovna hodnotě pórovitosti  $P$ . Pro stanovení nasycené hydraulické vodivosti na pozemku firmy VESKOM byl použit Guelphský permeametr (výrobce: Soil Equipment Corp.) (obr. 15). Guelphský permeametr je zařízení fungující na principu Mariottovy láhve. Přístroj se skládá ze zásobníku vody a perforované výtokové části. Měření bylo provedeno v 10 a 50 cm pod povrchem půdy. V prvním kroku byla do dané hloubky vyvrtána nepažená válcová sonda o průměru 6 cm. Do sondy byl vsunut permeametr. Pomocí trubky pro přívod vzduchu byla nastavena konstantní hladina vody v sondě. Konstantní hladina byla udržována po dobu 30 minut. Pomocí přístroje byla změřena infiltrační rychlost. Nasyčená hydraulická vodivost  $K_s$  ( $LT^{-1}$ ) byla vypočtena podle Elrick et al. (1989) a Reynolds et al. (2002):

$$K_s = \frac{C^*AR}{2\pi H^{*2} + \pi a^2 C^* + 2\pi H^*/\alpha_3} \quad (16)$$

kde  $C^*$  je bezrozměrný tvarový koeficient závisící na  $H/r$ ,  $A$  je průřezová plocha zásobníku vody Guelphského permeamtru (L),  $R$  je ustálený pokles hladiny v zásobníku za časovou jednotku,  $H^*$  je aplikovaný tlak (L),  $a$  je poloměr sondy (L) a  $\alpha_3$  je parametr charakterizující půdní strukturu (Reynolds, 1993).

Měření proběhlo v blízkosti pažnic. U sondy 1 bylo měření provedeno v hloubce 10 cm na 5 místech a v hloubce 50 cm také na 5 místech. Měření u sondy 2 proběhlo v hloubce 10 cm na 5 místech a v hloubce 50 cm na 5 místech. U sondy 3 bylo měřeno v hloubce 10 cm na 6 místech a v hloubce 50 cm na 5 místech a mezi sondami 4 a 5 v hloubce 10 cm na 5 místech a v hloubce 50 cm na 5 místech.



Obr. 15 Měření infiltrace Guelphským permeametrem

#### **4.5. Stanovení hydraulických vlastností na neporušených půdních vzorcích v laboratoři**

Půdní hydraulické vlastnosti byly zkoumány v laboratoři pomocí multi-step outflow metody (van Dam et al., 1990) na odebraných neporušených půdních vzorcích. Vzorky byly odebrány do Kopeckého válečku o objemu  $100 \text{ cm}^3$ . Bylo odebráno 5 vzorků z hloubky 10 cm v okolí pažnic (S1, S2, S3, S4 a S5). Dále byly odebrány vzorky z hloubky 20 cm, 30 cm, 40 cm a u sondy 4 z hloubky 10 cm a 22-25 cm. Metoda byla provedena pomocí Tempských cel, přístrojů pracujících v přetlakových a podtlakových podmínkách. Touto metodou lze stanovit odvodňovací (zvlhčovací) větve retenční čáry půdní vlhkosti a nenasycenou hydraulickou vodivost. Hlavní součástí Tempské cely je polopropustná keramická destička. Po nasycení destičky a vzorku vodou se tlaková výška vody řídí polohou byrety připojené ke spodní části přístroje nebo přetlakem vzduchu. Pomocí několika tlakových změn, při kterých vzorek drénujeme (zvlhčujeme) a monitorujeme kumulativní odtok (přítok) vody ze (do) vzorku. V našem případě byl proveden pouze drenážní pokus. Bylo

nastaveno 10 tlakových výšek (1, 10, 30, 50, 100, 170, 250, 350, 500 a 1000 cm). Parametry hydraulických funkcí (rovnice 8 a 9) byly určeny numerickou optimalizací programem HYDRUS – 1D (Šimůnek et al., 2012). Tato analýza nebyla součástí mé práce, proto ji dále nebudu rozebírat.

#### **4.6. Stanovení půdních vlastností na porušených půdních vzorcích**

Na pozemku firmy VESKOM bylo odebráno několik vzorků. Odběr byl rozdělen podle vytvořených pažnic. Vzorky se odebíraly u 5 pažnic z hloubky 10 cm a z 50 cm. U sondy 1 byl odebrán 1 vzorek v hloubce 10 cm a 3 vzorky v 50 cm. U sondy číslo 2 byl odebrán 1 vzorek v 10 cm a 4 vzorky v 50 cm. U sondy 3 byl odebrán 1 vzorek v 10 cm a 2 vzorky v 50 cm. U sondy 4 byl odebrán 1 vzorek v 10 cm a 1 vzorek v 50 cm. U sondy 5 byl odebrán 1 vzorek v 10 cm a 1 vzorek v 50 cm. A navíc byl odebrán vzorek mezi sondou 4/5 v hloubce 50 cm a vzorek z hloubky 20-40 cm za plotem pozemku. Na všech odebraných vzorcích nebyly provedeny všechny rozbory.

##### **4.6.1. Aktivní a výměnné pH**

Aktivní a výměnné pH bylo stanoveno na 18 vzorcích. Pro určení pH vzorků bylo do kádinky odváženo 10 g vzorku zeminy. Pro zjištění aktivního pH bylo přidáno 25 ml destilované vody a pro zjištění výměnného pH se přidalo 25 ml 0,2M KCl. Každý vzorek měl tři opakování. Poté se připravené vzorky ponechaly v klidu 24 hodin a druhý den byly vzorky změřeny pH metrem (výrobce: WTW) (ISO 10390:1994).

##### **4.6.2. Salinita půdy**

Salinita byla stanovena u 11 vzorků odebraných na pozemku firmy VESKOM. Zjištění zasolení půdy se provádělo také na třech opakováních. Do PE lahve bylo naváženo 10 g vzorku zeminy a přidáno 50 ml 50% ethanolu. Poté se vzorky nechaly třepat 45 minut na třepačce. Po sundání vzorků a usazení zeminy na dno lahvičky se změřila vodivost konduktometrem (výrobce: WTW) (Rhoades, 1996).



#### **4.6.3. Stanovení obsahu oxidovatelného uhlíku**

Stanovení obsahu humusu bylo stanoveno u 14 vzorků. Z připravené jemnozeme II. bylo naváženo do kádinky v rozmezí 0,2 - 0,3 g zeminy. Poté bylo k vzorku přidáno 10 ml chromsírové směsi, zakryto hodinovým sklem a vloženo na 45 minut při 125 °C do sušárny. Po vyndání a vychladnutí vzorků byly titrovány Mohrovou solí do mrtvého bodu. Vzorky se proměřovaly se třemi opakováními a proměřeny byly i slepé vzorky pro kontrolu. Spotřeba Mohrové soli byla odečtena ze stupnice byrety a vypočten obsah oxidovatelného uhlíku a obsah humusu (Skjemstad et Baldock, 2008).

#### **4.6.4. Stanovení specifické hmotnosti půdy pomocí pyknometru**

Stanovení specifické hmotnosti půdy bylo stanoveno u 11 vzorků. Pyknometr byl naplněn destilovanou vodou a vložen do temperovací lázně na 20 minut. Mezi tím bylo naváženo 10 g vzorku do varné porcelánové misky a zalito destilovanou vodou, aby zemina byla pod hladinou vody. Vzorky se mírně povařily 5 minut za občasného míchání, aby se vypudil všechny vzduch. Vychladlá suspenze byla převedena do pyknometru, který byl před tím vyndán z temperovací lázně, uzavřen, osušen, zvážen a vyprázdněn. Pyknometr se suspenzí a doplněný destilovanou vodou byl vložen do temperovací lázně, také na 20 minut. Poté byl uzavřený a osušený pyknometr zvážen. Ze zaznamenaných hmotností byla vypočítána specifická hmotnost vzorků (Flint et Flint, 2002).

#### **4.6.5. Zrnitostní rozbor**

Zrnitost se stanovovala u 10 vzorků hustoměrnou metodou podle A. Casagrandeho. Vzorek S1, S2, S3, S4 a S5 odebraný v 10 cm, vzorek odebraný z 20-40 cm a vzorky odebrané v 50 cm (S1, S2, S3 a S4). Navážka vzorku byla kolem 50 g, do varné misky bylo k vzorku přidáno cca 50 ml dispergačního činidla a cca 50 ml destilované vody. Takto připravený vzorek byl povařen na varné desce přibližně 15 minut. Po vychladnutí suspenze byla převedena do sedimentačního válce a válec doplněn po rysku destilovanou vodou. Minutu před začátkem sedimentace se suspenze promíchávala, poté se vložil hustoměr a hustota se odečítala v čase 30'', 1', 2', 5', 15', 45', 2hod., 5hod. a 24hod. K vyhodnocení byl použit monogram, rozdělení na kategorie slouží k určení půdního druhu. Použita byla

Novákova stupnice, která bere v úvahu pouze procenta z I. Kategorie. I. kategorie jsou jílnaté částice (<0,01 mm), II. kategorie je prach (0,01-0,05 mm), III. kategorie je práškový písek (0,05-0,1 mm) a IV. kategorie je písek (0,1-0,2 mm) (Gee et Or, 2002).

#### 4.6.6. Tepelné vlastnosti

Pro tuto analýzu bylo připraveno celkem 9 vzorků. Vzorek S1, S2, S3, S4 a S5 odebraný v 10 cm u každé sondy, směsný vzorek z 20-40 cm (S20-40 cm), směsný vzorek sond 1 až 3 odebraný v 50 cm (S 1-3 I. 50 cm s opakováním S 1-3 II. 50 cm) a vzorek odebraný v 50 cm u sondy 5 (S5 50cm).

Hodnotila se závislost tepelné vodivosti, tepelné kapacity, tepelné difuzivity a tepelného odporu na objemové vlhkosti. Tepelné vlastnosti se měřily pomocí přístroje KD-2 Pro, analyzátor tepelných vlastností materiálu (výrobce: Decagon Devices Inc.). Byla změřena tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita senzorem TR-1 (prodloužený jednojehlový senzor) a senzorem SH-1 (dvoujehlový senzor) byla změřena tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, tepelná difuzivita a měrný tepelný odpor. Měření proběhlo na půdních vzorcích nahutněných do válce o objemu 423 cm<sup>3</sup>. Měření začínalo na suchých vzorcích a při každém dalším měření byla zemina ovlhčována 20 ml destilované vody. Po každém ovlhčení, před měřením byl vzorek zvážen. Bylo provedeno 7 kroků ovlhčení. U prvních třech měření byl vzorek vysypán z válce a rovnoměrně ovlhčen rozprašovačem a nahutněn zpátky do válce. U dalších měření se vzorky ovlhčovaly z vrchu válce a ponechány do druhého dne, aby se voda rovnoměrně rozdělila po válci. Sensory bylo měřeno z vrchu válce a prováděno ve dvou opakováních. Od 5 měření bylo senzorem SH-1 měřeno na obou stranách válce.

Objemové vlhkosti vzorků byly spočítány gravimetrickou metodou. Ze změřených hodnot byly spočítány průměry tepelných vlastností ze dvou opakování (Příloha 1 - 9). Hodnotila se závislost tepelné vodivosti na objemovou půdní vlhkost. Tepelná vodivost byla vyjádřena následující rovnicí:

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0,5} \quad (17)$$

kde  $b_1$ ,  $b_2$  a  $b_3$  jsou empirické parametry ( $\text{MLT}^{-3}\text{K}^{-1}$ ),  $\lambda_0(\theta)$  je tepelná vodivost neproudící-li voda (Chung et Horton, 1987). Pro snadnější analýzu byla spočítána

odmocnina z objemové vlhkosti a pro proložení byl pak použit polynom 2. stupně, tj. rovnice 18, která vznikne z rovnice 17 se substitucí  $\sqrt{\theta} = x$ .

$$\lambda_0(\theta) = b_2x^2 + b_3x + b_1 \quad (18)$$

Dále se vyhodnotila závislost tepelné kapacity na objemovou půdní vlhkost. Objemová tepelná kapacita je vyjádřena pomocí rovnice 19 (Kluitenberg, 2002).

$$C = \rho_d(c_s + c_w w) \quad (19)$$

kde indexy  $s$  a  $w$  označují pevnou část a vodu,  $\rho_d$  je objemová hmotnost a  $w$  je hmotnostní vlhkost a platí:

$$C = a + b\theta \quad (20)$$

kde  $a = \rho_d c_s$ ,  $b = c_w$ ,  $\theta = w(\rho_d/\rho_w)$ , přičemž  $\rho_w = 1 \text{ g cm}^{-3}$ .

Pro ilustraci byla dopočítána tepelná difuzivita a tepelný odpor. Tepelný odpor lze vyjádřit jako převrácená hodnota tepelné vodivosti. Tepelná difuzivita byla vypočítána podle rovnice 21.

$$\alpha = \lambda/C \quad (21)$$

## 4.7. Simulace proudění vody a transportu tepla

Simulace proudění vody a transportu tepla v půdním profilu byla provedena pomocí matematického simulačního modelu HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2012).

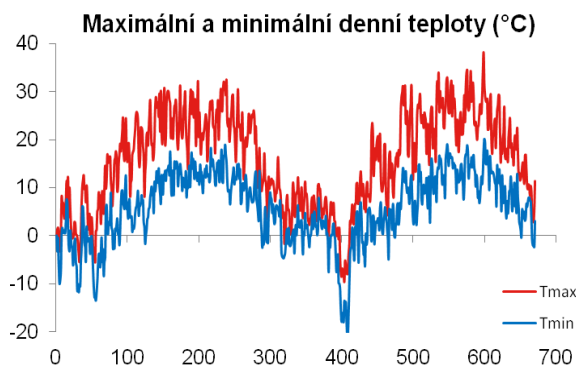
### 4.7.1. Přímá simulace proudění vody v půdním profilu

Prvním krokem byla přímá simulace proudění vody v půdním profilu. Byly vytvořeny tři varianty proudění vody, které se odlišovaly retenčními čarami půdní vlhkosti a nasycenými hydraulickými vodivostmi (tab. 2). Profil byl rozdělen na 3 materiály. Do 25 cm byla kvalitnější zemina (ornice), která byla rozdělena na dvě vrstvy. Od 0 cm do 12 cm byla první vrstva profilu obsahující kořeny trávy a druhá vrstva byla od 12 – 25 cm. U sondy 4 byla druhá vrstva profilu zadána od 12 – 32 cm. Třetí vrstva byla od 25 cm níž, která obsahovala zeminu smíchanou se zbytky stavebního materiálu. Hloubka půdního profilu byla 200 cm. Simulace byla provedena pro necelé dva roky. Začínala 1. 1. 2011 (0 den) a končila 31. 10. 2012

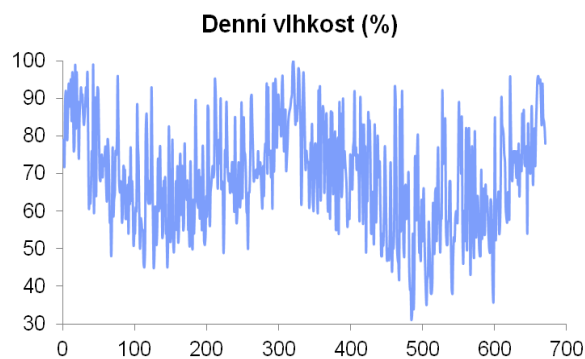
(670 den). Časový interval výstupů byl určen jako jeden den a výpočetní krok byl omezen na minimální hodnotu 0,00001 dne a maximální hodnotu 0,5 dne. Iterační kritéria byla zadána: maximální počet iterací 30, tolerance vodního obsahu 0,001 a tolerance tlakové výšky 1 cm. Jako hydraulický model byl použit jednoduchý pórovitostní model van Genuchtena a Mualema (parametry vypsány v tab. 2) a hystereze byla zanedbána. Zadána byla atmosférická okrajová podmínka s povrchovou vrstvou 0,5 cm a ve spodní části profilu byl zadán volný odtok. Model adsorpce vody kořeny byl vyjádřen vztahem Feddes et. al. (1978) a parametry byly zadány pro trávu podle databáze. Kořenová zóna byla určena do 10 cm. Pro výpočet evapotranspirace byla určena Penman – Montheithova rovnice, proto byla zadána následující data: radiace, maximální a minimální denní teplota, vlhkost, srážky a rychlost větru - obr. 16 – 20. Dále byla zadána radiace slunečním zářením, zeměpisná šířka a nadmořská výška. V záložce profilových informací byl profil rozdělen na 3 vrstvy, oblast proudění byla rozdělena na 200 elementů a zahuštěna v horní části profilu. V celém profilu byla zadána konstantní hodnota vlhkosti  $0,334 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Hustota kořenů byla v prvních 5 cm rozdělena konstantně a dalších 5 cm lineárně. Pozorovací body byly umístěny v hloubce 10, 20, 30, 40, 60, 100 a 180 cm. Výsledky tří variant simulace půdních vlhkostí v profilu byly porovnány s měřenými půdními vlhkostmi v sondách 1-5.

Tab. 2 Hodnoty parametrů zadaných retenčních čar půdní vlhkosti

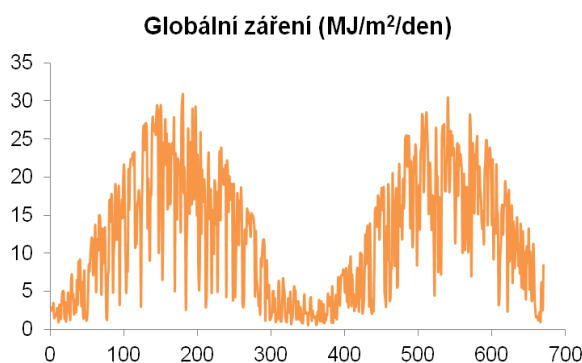
Vrstva	Varianta 1			Varianta 2			Varianta 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,418	0,426	0,343	0,395	0,436	0,336	0,395	0,436	0,336
$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,100	0,100	0,100	0,125	0,117	0,100	0,125	0,117	0,100
$\alpha_4$ (1/cm)	0,042	0,041	0,057	0,041	0,065	0,139	0,041	0,065	0,139
n (-)	1,184	1,256	1,213	1,209	1,294	1,191	1,209	1,294	1,191
$K_s$ ( $\text{cm den}^{-1}$ )	3,907	2,319	5,618	2,986	7,028	27,8	9,452	9,452	30,556



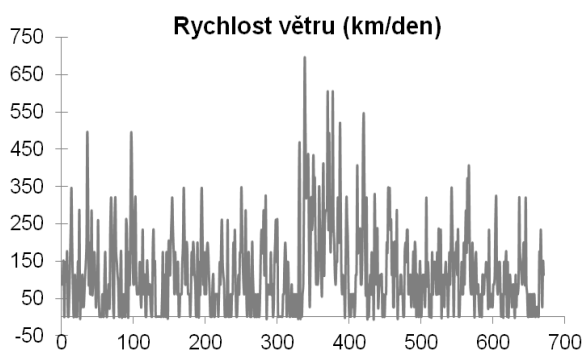
Obr. 16 Maximální a minimální denní teplota



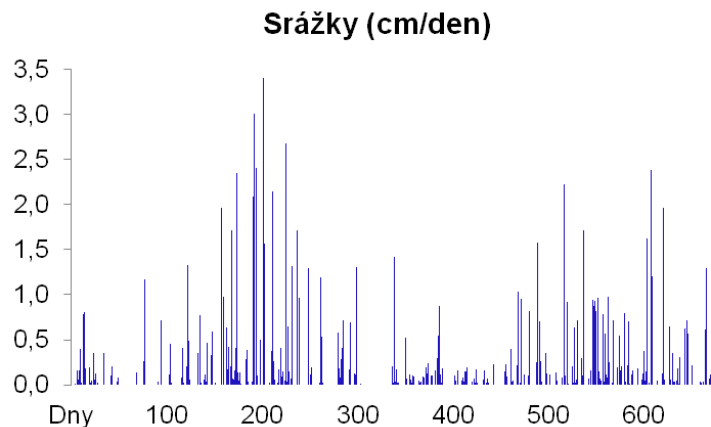
Obr. 17 Denní vlhkost



Obr. 18 Globální záření



Obr. 19 Rychlost větru



Obr. 20 Denní srážky

#### 4.7.2. Kalibrace modelu proudění vody

Varianty z předchozí části (tab. 2) byly použity pro následující inverzní modelování. V programu HYDRUS – 1D bylo navíc vybráno inverzní modelování a byla doplněna data změřených půdních vlhkostí (obr. 37 - 66). U každé varianty byly vytvořeny modely s měřenými půdními vlhkostmi ze sondy 1, 2, 3, 4 a 5. U S1 byla odebrána měřená hloubka 60 cm, kde se hodnoty vlhkostí velmi odlišovaly (Obr. 41).

U S3 byla odebrána měřená hloubka 100 cm (Obr. 54) a u S4 byla odebrána hloubka 60 cm (Obr. 59). Cílem inverzního modelování bylo nakalibrovat parametry hydraulických vlastností tak, aby modelované průtoky půdních vlhkostí co nejvíce odpovídaly naměřeným hodnotám.

#### 4.7.3. Modelování proudění vody a transportu tepla

V další části modelování se přidal transport tepla v půdě. Varianta 1, 2, 3 (tab. 2) a projekty inverzního modelování varianty 2 - sonda 1, 3, 4 (tab. 5, 7 a 8) byly následovně upraveny. U každé varianty byla horní vrstva rozdělena na dvě vrstvy 0-7 cm a 7-12 cm. Dále byly upraveny časové podmínky. Nultý den byl 151 den neboli 31. 4. 2011 a poslední den zůstal stejný. Bylo to dáno tím, že teploty a vlhkosti pod materiály se začaly měřit od 1. 5. 2011 (obr. 21 a 23). Vlhkost měřená senzorem ECH<sub>2</sub>O-TE byla upravena pomocí rovnice 22 na referenční vlhkost  $\theta_{ref}$  (Kočárek et Kodešová, 2012).

$$\theta_{ref} = \theta_m - 0,002(t_m - t_{ref}) \quad (22)$$

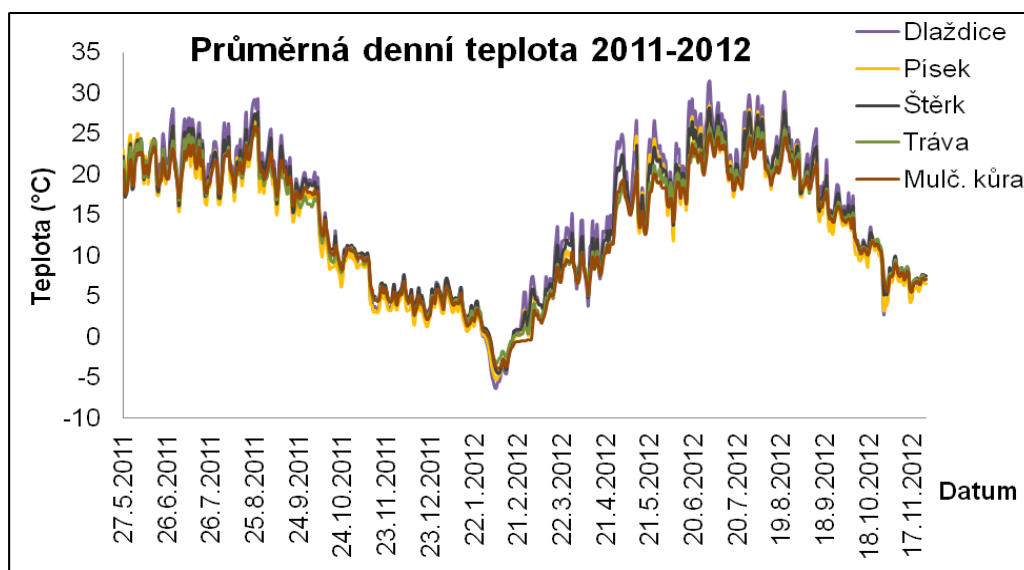
kde  $\theta_m$  je měřená půdní vlhkost,  $t_m$  je odpovídající teplota měřené půdní vlhkosti a  $t_{ref}$  je referenční teplota 20 °C. Senzor byl totiž nakalibrován v laboratoři při 20 °C a měření v terénu bylo ovlivněno teplotou. Časový interval výstupů byl snížen na 0,1 dne a bylo vybráno 8 dnů, u kterých se následně hodnotil denní režim tepla v profilu. Tepelné okrajové podmínky byly určeny na povrchu, zadáním průměrné denní teploty (obr. 21) a denní amplitudy (obr. 22), ve spodu profilu byl zadán nulový gradient. Protože program neumožňuje zadat teplotní okrajovou podmínku v případě, že je pomocí programu počítána i evapotranspirace, byla nejdříve pomocí HYDRUS – 1D spočítána evapotranspirace (obr. 24) a pak byla při simulaci transportu tepla přímo zadána. Dále byly upraveny tepelné vlastnosti materiálů. Protože zadané teplotní podmínky na povrchu půdy byly ve skutečnosti měřeny v hloubce 7 cm, byla v horní vrstvě 0-7 cm zadána velmi nízká tepelná kapacita a velmi vysoká tepelná vodivost, tak aby nedocházelo ke zdržování tepla v této vrstvě.

Z takto připravených variant byl vybrán projekt S1, který byl dále použit pro sledování transportu tepla v profilu pod různými povrchy (pod betonovou dlaždicí, štěrkem, mulčovací kůrou a pískem). Nastavení programu zůstalo stejné, jen se odstranil model adsorpce vody kořeny. Výpar z holého povrchu byl opět nejdříve

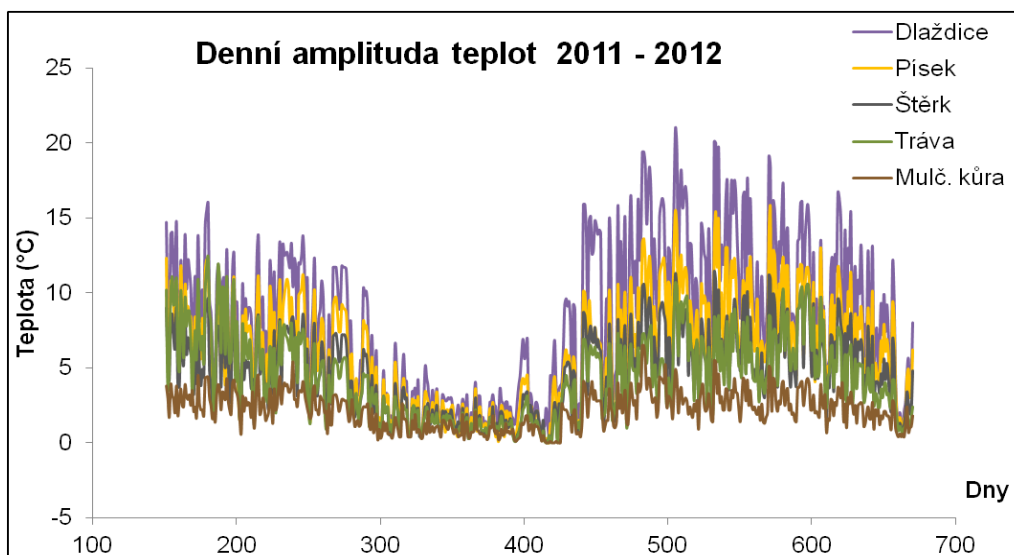
vypočítán pomocí programu HYDRUS - 1D a pak zadán jako v předcházejícím případě. Dále se zadali hydraulické vlastnosti daných materiálů (tab. 3). Tyto hodnoty byly změřeny v laboratoři. V případě hodnot  $K_s$  bylo použito inverzní modelování pro zlepšení výsledků. Jako vstupy sloužily změřené půdní vlhkosti v hloubce 7 cm (obr. 23).

Tab. 3 Hodnoty parametrů zadaných retenčních čar půdní vlhkosti různých povrchů

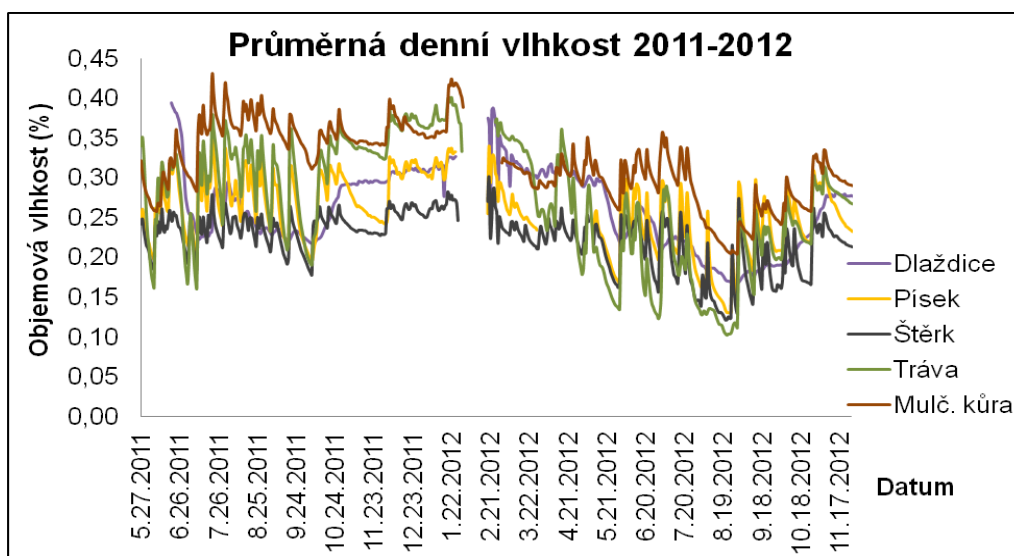
Materiál	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	$K_s$ (cm den <sup>-1</sup> )
Bet. dlaždice	0,04	0,15	0,00397	1,9	26,24
Štěrka	0	0,1	0,07	2	700
Mulč. kůra	0,366	0,778	0,093	2,167	7 247
Písek	0,0355	0,346	0,0329	2,723	3 672,9



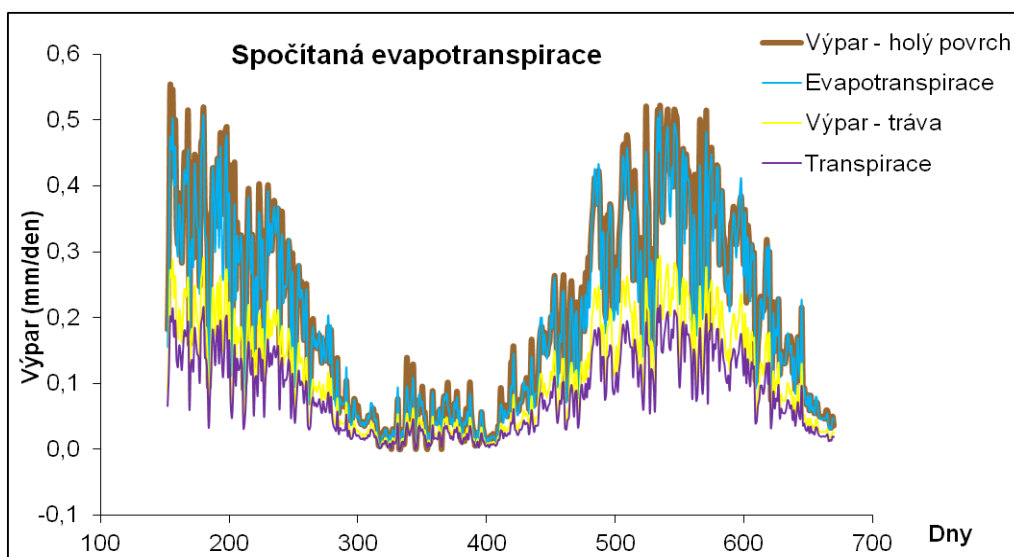
Obr. 21 Průměrná denní teplota půdy pod různými povrchy 2011-2012



Obr. 22 Denní amplituda



Obr. 23 Průměrná denní vlhkost půdy pod různými povrchy 2011-2012



Obr. 24 Spočítaná evapotranspirace



## 5. VÝSLEDKY

### 5.1. Základní půdní vlastnosti

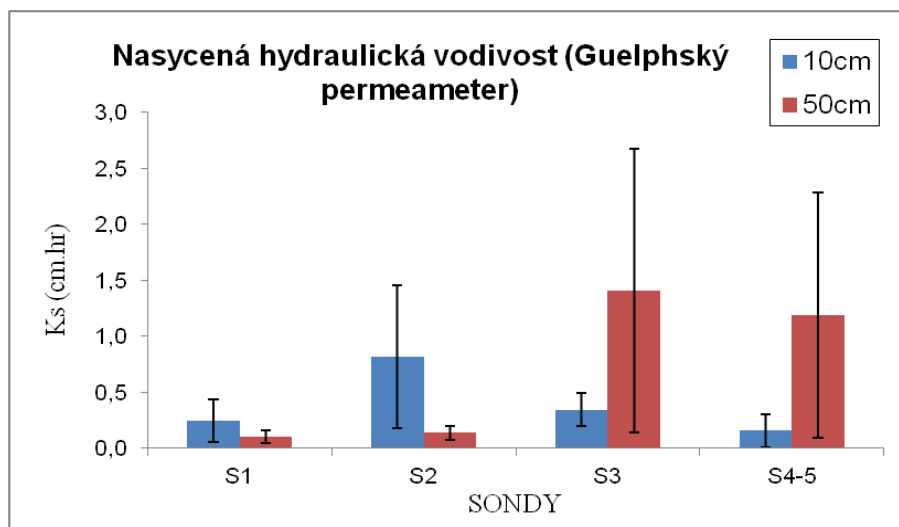
Půdní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4. Aktivní a výměnné pH bylo stanoveno ve třech opakováních na 18 vzorcích, v tabulce je uveden průměr hodnot. Obsah oxidovatelného uhlíku bylo stanoveno také ve třech opakováních na 11 vzorcích a vyhodnocen průměr. Stanovení specifické hmotnosti půdy bylo provedeno na 11 vzorcích. Salinita byla stanovena ve třech opakováních na 14 vzorcích a zapsán průměr. Zrnitostní rozbor byl proveden u 10 vzorků.

Tab. 4 Půdní vlastnosti

Vzorek	pH H <sub>2</sub> O (-)	pH KCl (-)	Cox (%)	ρ <sub>z</sub> (g.cm <sup>-3</sup> )	Salinita (μS.cm <sup>-1</sup> )	Půdní druh
S1 (10 cm)	6,92	6,60	1,11	2,67	103,5	jílovitohlinitý
S2 (10 cm)	7,07	6,15	1,05	2,59	74,3	jílovitohlinitý
S3 (10 cm)	7,05	6,47	1,12	2,58	107,8	jílovitohlinitý
S4 (10 cm)	7,22	6,80	1,19	2,67	158,5	jílovitohlinitý
S5 (10 cm)	7,33	6,44	0,93	2,65	83,2	jílovitohlinitý
S1 3 (50 cm)	7,10	6,46	0,3	2,69	84,4	hlinitý
S1 4 (50 cm)	6,03	5,13				
S1 5 (50 cm)	5,96	5,16				
S2 1 (50 cm)	7,77	7,21	0,75	2,67	174,9	písčitohlinitý
S2 2 (50 cm)	7,76	7,25	0,44			
S2 3 (50 cm)	7,68	7,15	0,99			
S2 4 (50 cm)	7,66	7,19	1,47			
S3 1 (50)	7,55	7,15	1,0	2,6	243	písčitohlinitý
S3 2 (50)	7,59	7,32				
S4 (50 cm)	7,47	7,12	0,68	2,7	145,6	písčitohlinitý
S4/5 (50 cm)	7,56	6,92				
S5 (50cm)	7,65	7,14	1,15	2,62	200	
S20-40	7,61	7,21	1,29	2,14	214	písčitohlinitý

## 5.2. Hydraulické půdní vlastnosti

Na obrázku 25 jsou zobrazeny nasycené hydraulické vodivosti. Stanovení Guelphským permeametrem proběhlo na pozemku v hloubkách 10 a 50 cm.



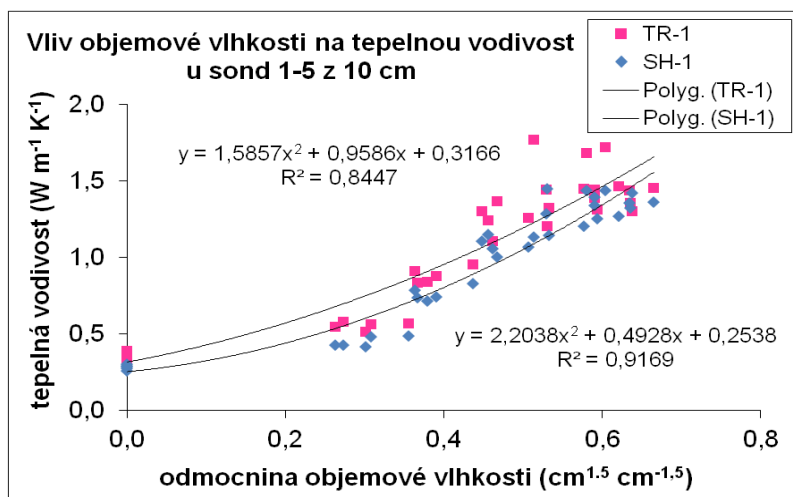
Obr. 25 Nasycená hydraulická vodivost stanovena Guelphským permeametrem

## 5.3. Tepelné půdní vlastnosti

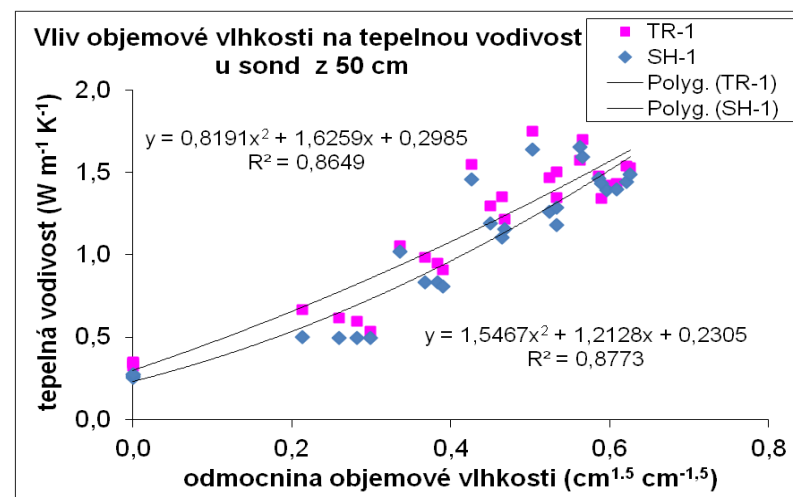
V příloze 1 – 9 se nachází změřené a vypočtené hodnoty tepelných charakteristik půdních vzorků odebraných na pozemku firmy VESKOM.

Na obrázcích 26 a 27 je znázorněn vliv objemové vlhkosti na tepelnou vodivost v hloubce 10 a 50 cm. Body jsou proloženy polynomickou funkcí druhého stupně a dále jsou zobrazeny rovnice regrese a hodnoty spolehlivosti. Na obrázcích 28 a 29 je znázorněn vliv objemové vlhkosti na tepelnou kapacitu půdy ve dvou hloubkách. Body jsou proloženy lineární funkcí a dále jsou zobrazeny rovnice regrese a hodnoty spolehlivosti.

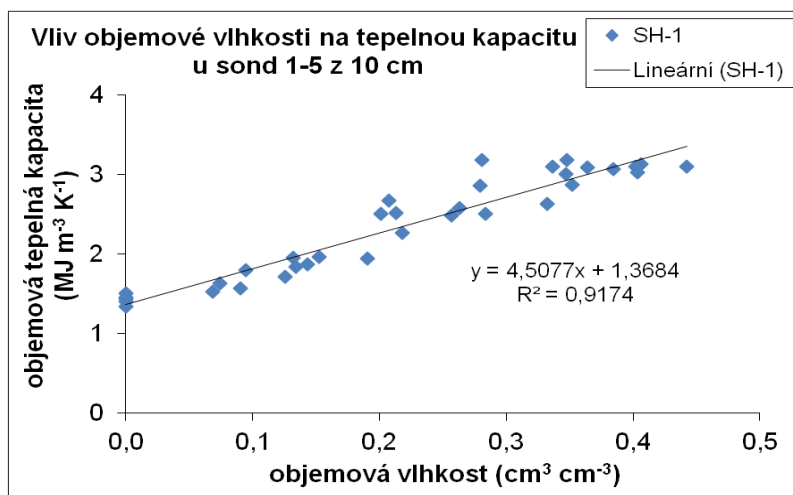
Obrázek 30 a 31 zobrazují vliv objemové vlhkosti na tepelný odpor v hloubce 10 cm a 50 cm. Změřené hodnoty jsou proloženy křivkou, která byla pro zajímavost vypočítána. Tepelný odpor je převrácená hodnota tepelné vodivosti. Obrázek 32 a 33 zobrazují vliv objemové vlhkosti na tepelnou difuzivitu také v hloubce 10 a 50 cm. Změřené hodnoty byly proloženy vypočítanou křivkou podle rovnice 20.



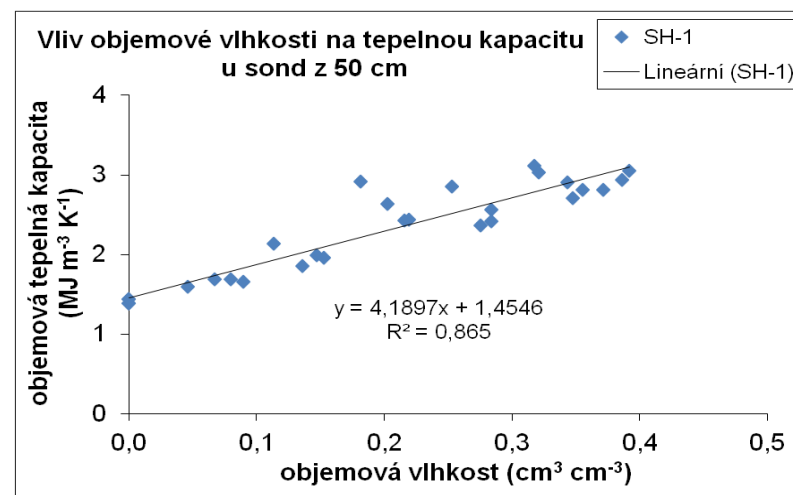
Obr. 26 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou vodivost u sond z 10 cm



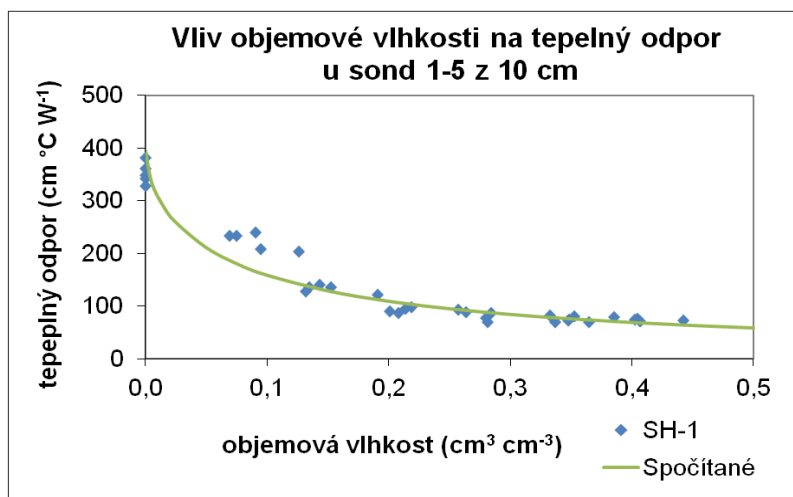
Obr. 27 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou vodivost u sond z 50 cm



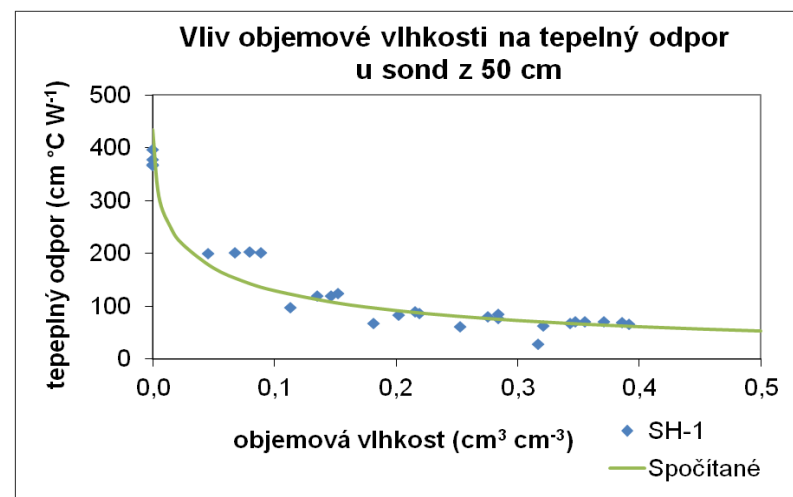
Obr. 28 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou kapacitu u sond z 10 cm



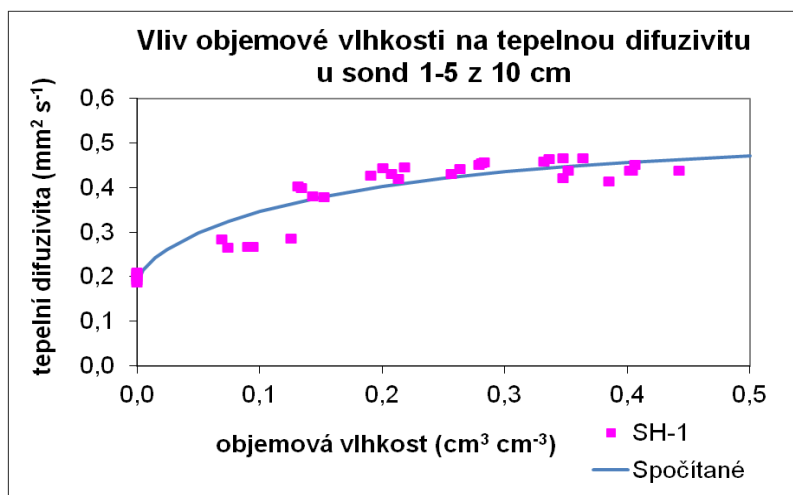
Obr. 29 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou kapacitu u sond z 50 cm



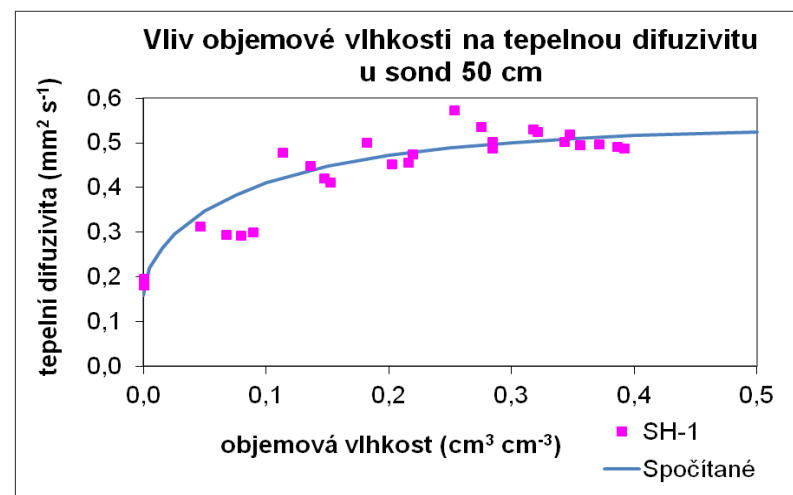
Obr. 30 Vliv obj. vlhkosti na tepelný odpor u sond 1-5 z 10 cm



Obr. 31 Vliv obj. vlhkosti na tepelný odpor u sond z 50 cm



Obr. 32 Vliv obj. vlhkosti na tep. difuzivitu u sond 1-5 z 10 cm



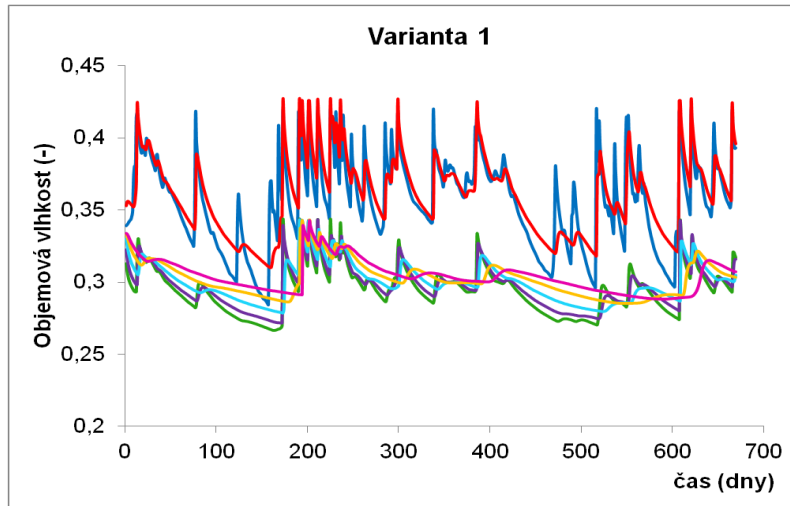
Obr. 33 Vliv obj. vlhkosti na tep. difuzivitu u sond z 50 cm

## **5.4. Simulace proudění vody a transportu tepla v půdě**

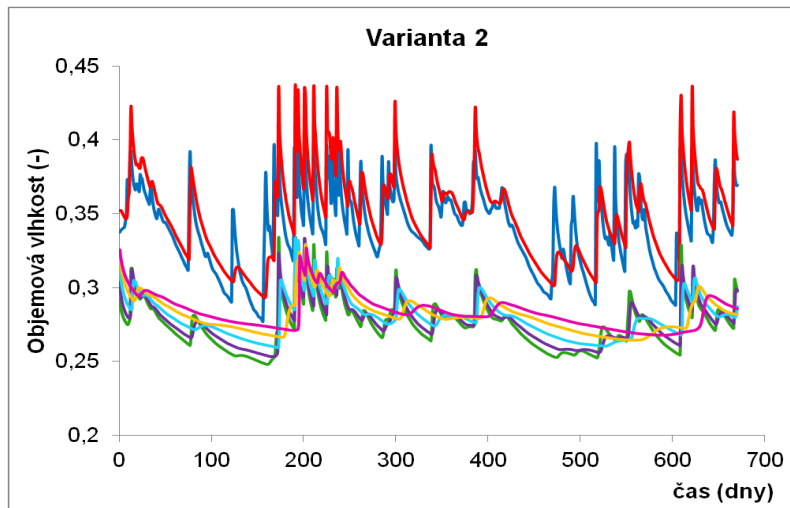
### **5.4.1. Přímá simulace proudění vody v půdě**

Na obrázku 34, 35 a 36 jsou zobrazeny 3 varianty simulace proudění vody (objemová vlhkost za čas) na pozemku firmy VESKOM. Varianty se liší parametry retenční čáry půdní vlhkosti a nasycenými hydraulickými vodivostmi (tab. 2). V části 5. 4. 2. (obr. 45 - 47) je zobrazen kumulativní tok na povrchu profilu, kumulativní transpirace a kumulativní odtok dnem profilu pro 3 varianty.

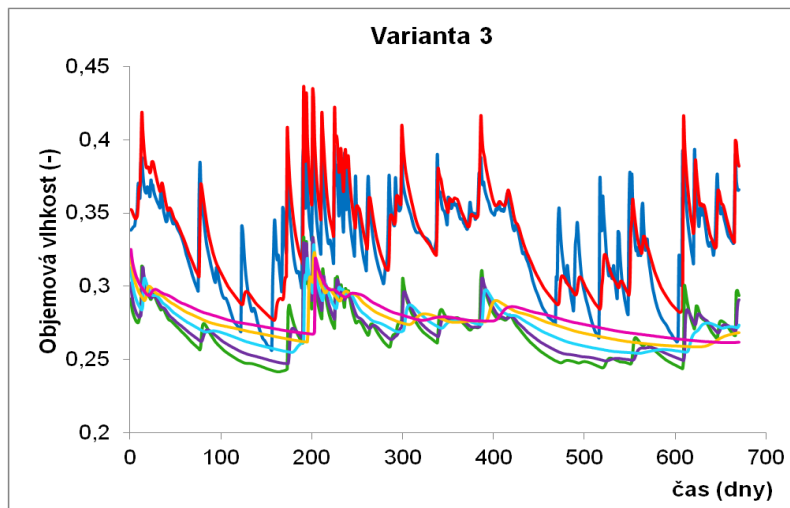
Na následujících 5 stránkách jsou uvedeny obrázky objemové vlhkosti za čas v 5 sondách. Obrázky jsou rozděleny na 6 hloubek, ve kterých se měřila půdní vlhkost. Půdní vlhkost se měřila od 2. 5. 2011 do 22. 10. 2012. Do obrázků byly připojeny namodelované varianty 1, 2 a 3 po jednotlivých hloubkách, které byly namodelovány od 1. 1. 2011 do 31. 10. 2012.



Obr. 34 Varianta 1 – objemová vlhkost za čas



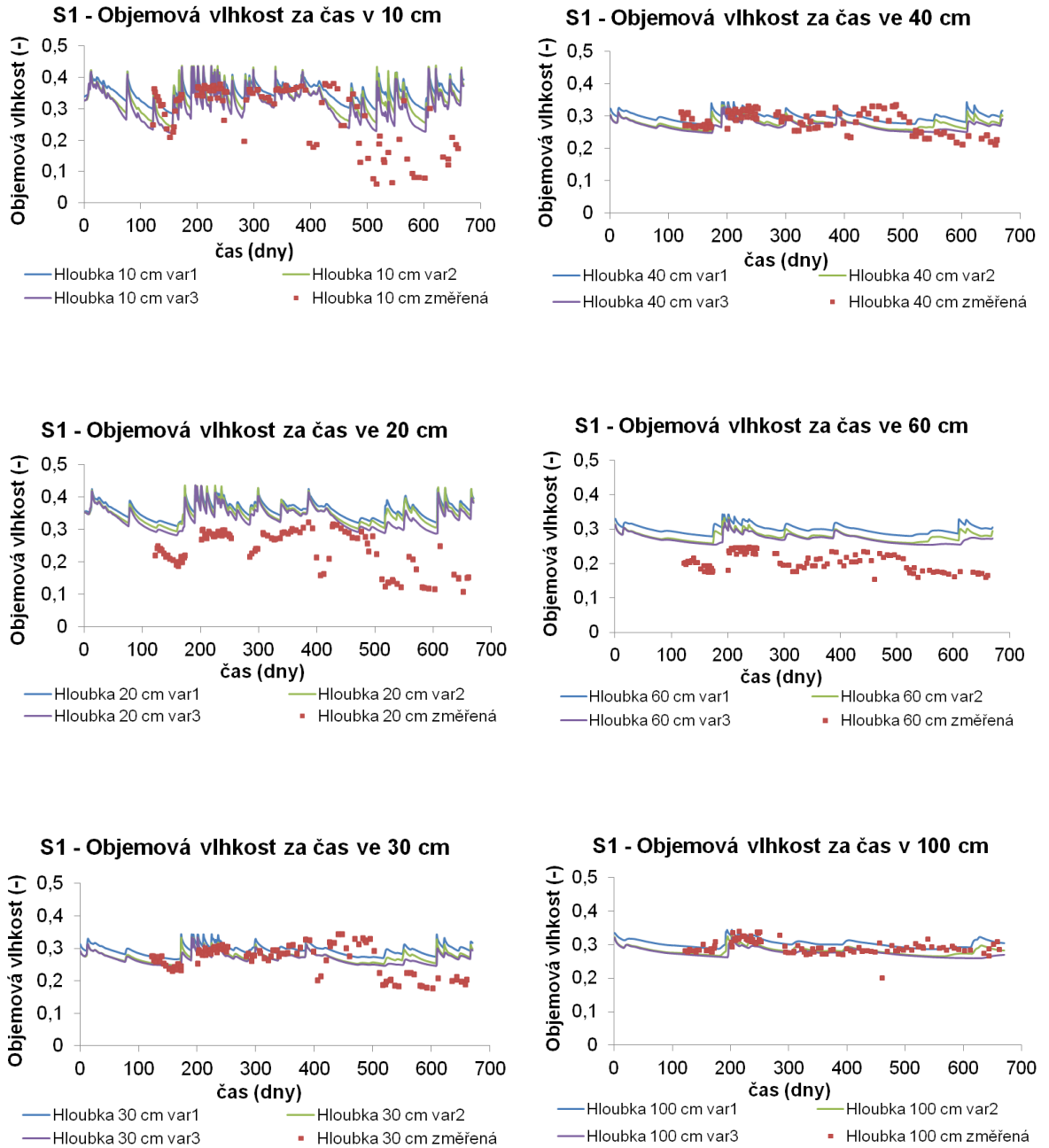
Obr. 35 Varianta 2 – objemová vlhkost za čas



Obr. 36 Varianta 3 – objemová vlhkost za čas

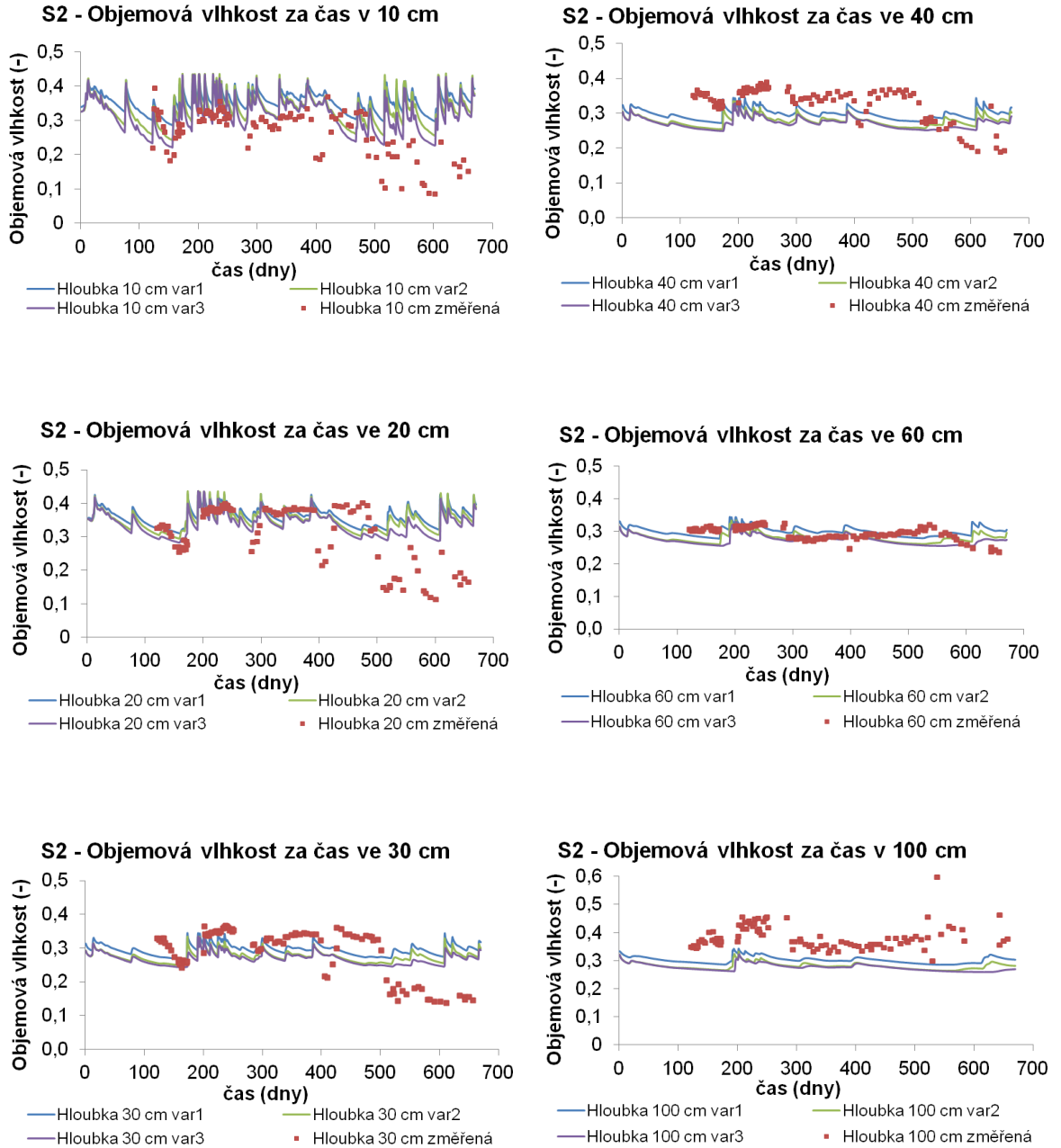
- Hloubka 10 cm
- Hloubka 20 cm
- Hloubka 30 cm
- Hloubka 40 cm
- Hloubka 60 cm
- Hloubka 100 cm
- Hloubka 180 cm

## Půdní vlhkost simulovaná a změřená v sondě 1



Obr. 37 - 42 Objemová vlhkost v sondě 1 za čas

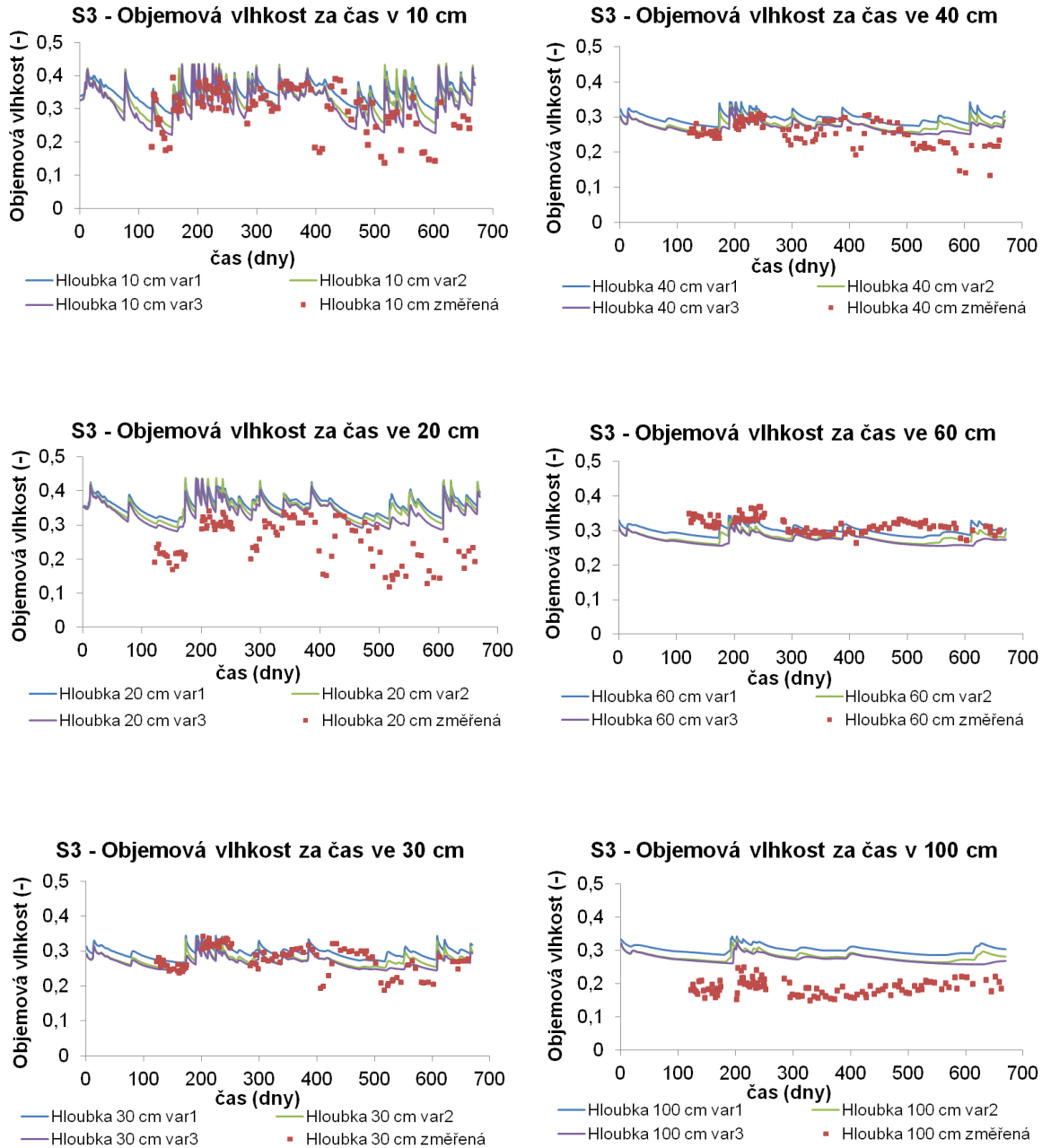
## Půdní vlhkost simulovaná a změřená v sondě 2



Obr. 43 - 48 Objemová vlhkost v sondě 2 za čas

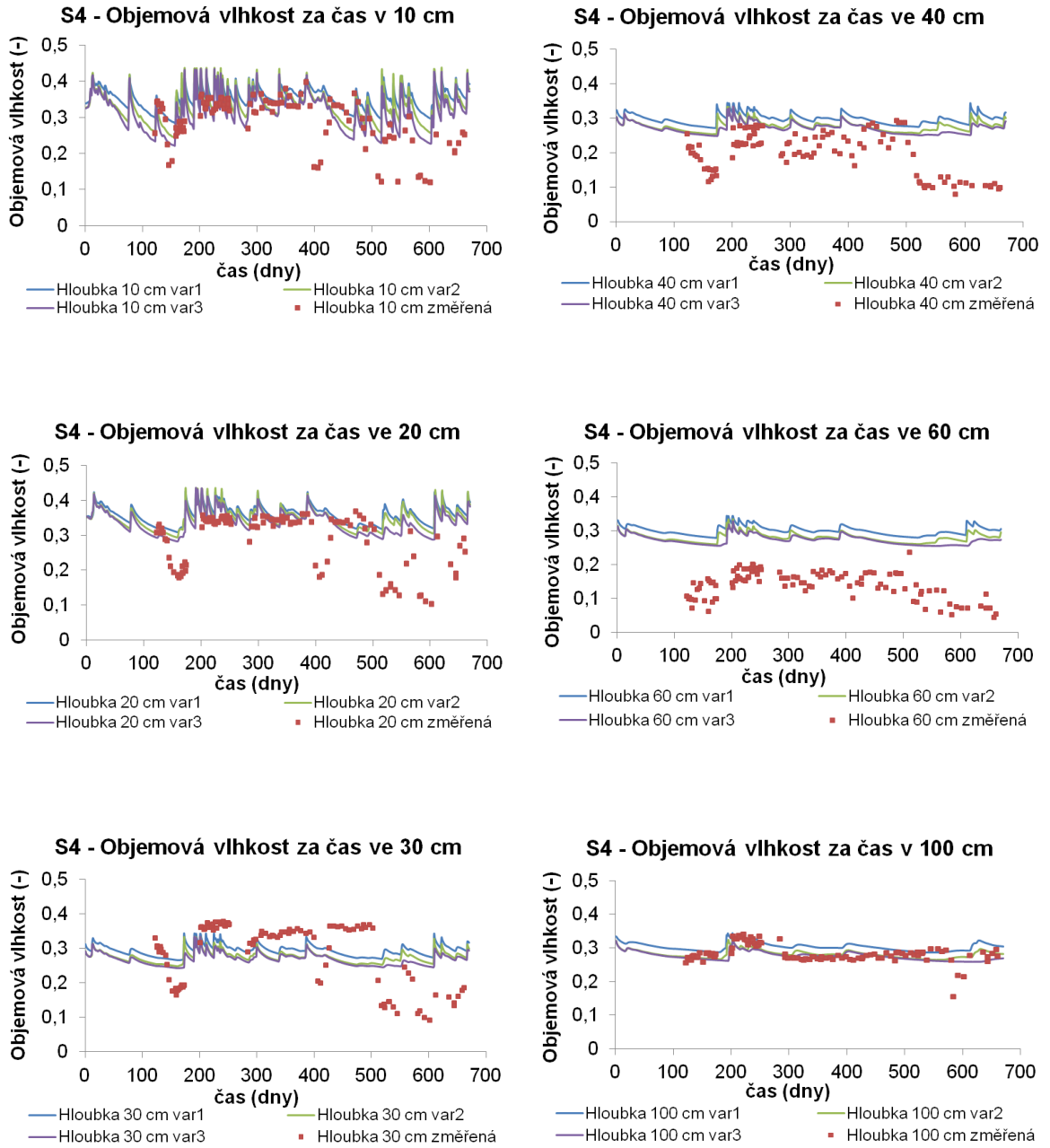


## Půdní vlhkost simulovaná a změřená v sondě 3



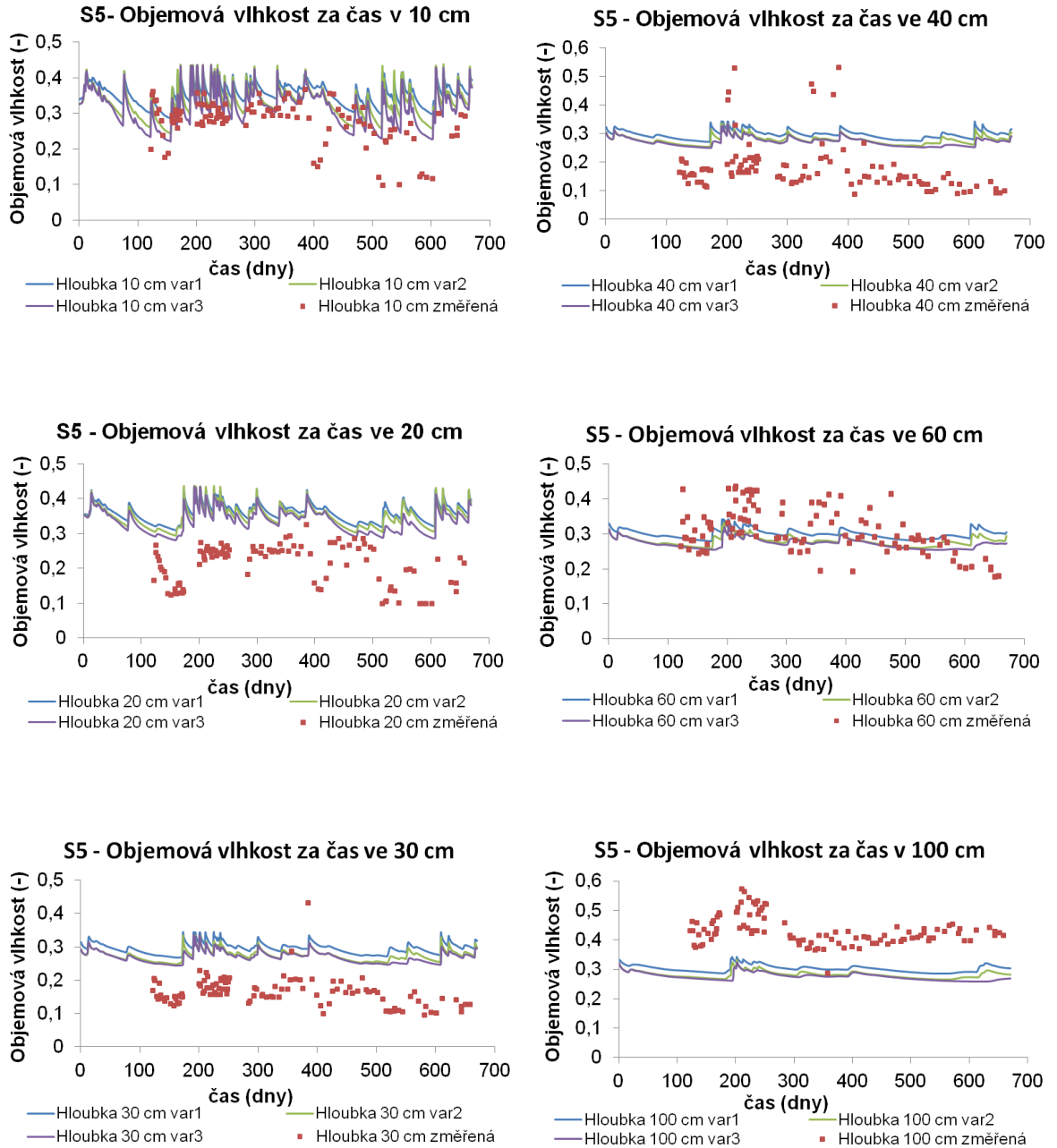
Obr. 49 - 54 Objemová vlhkost v sondě 3 za čas

## Půdní vlhkost simulovaná a změřená v sondě 4



Obr. 55 - 60 Objemová vlhkost v sondě 4 za čas

## Půdní vlhkost simulovaná a změřená v sondě 5



Obr. 61 - 66 Objemová vlhkost v sondě 5 za čas

### 5.4.2. Numerická inverze – optimalizace parametrů

Pro další simulaci byla vybrána pouze varianta číslo 2. U druhé varianty byly inverzní optimalizací upravovány parametry retenčních čar a nasycená hydraulická vodivost. Jaké parametry se měnily a jakou měli těsnost výsledného proložení dat, je uvedeno v tabulkách 5 – 9.

Tab. 5 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 1

Varianta 2 pro sondu 1								
Horizont	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	Ks (cm d <sup>-1</sup> )	L (-)	$\Phi$	R <sup>2</sup>
H1	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,739	0,0021
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,732	0,0018
	0,125	0,395	0,006	2,012	0,31	0,5	0,617	0,3833
	0,084	0,395	0,041	1,209	2,71	0,5	1,401	0,0467
	0,103	0,395	0,031	1,209	3,09	0,5	1,002	0,1168
	0,071	0,395	0,017	1,461	2,20	0,5	0,611	0,4098
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,98	0,5	1,676	0,0046
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,714	0,0025
H2	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,739	0,0021
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,732	0,0018
	0,117	0,436	0,030	1,606	17,52	0,5	0,617	0,3833
	0,066	0,436	0,065	1,294	7,98	0,5	1,401	0,0467
	0,056	0,436	0,076	1,294	6,06	0,5	1,002	0,1168
	0,025	0,436	0,093	1,410	14,44	0,5	0,611	0,4098
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,676	0,0046
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,714	0,0025
H3	0,100	0,336	0,139	1,191	2,78	0,5	1,739	0,0021
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,732	0,0018
	0,100	0,336	0,035	1,166	36,12	0,5	0,617	0,3833
	0,150	0,336	0,139	1,191	26,96	0,5	1,401	0,0467
	0,102	0,336	0,048	1,191	63,33	0,5	1,002	0,1168
	0,110	0,336	0,127	1,201	10,44	0,5	0,611	0,4098
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,81	0,5	1,676	0,0046
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,714	0,0025

**zelené buňky**

... optimalizované parametry

**červené hodnoty** ... vybrané hodnoty pro simulaci transportu tepla

Tab. 6 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 2

Varianta 2 pro sondu 2								
Horizont	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	Ks (cm d <sup>-1</sup> )	L (-)	$\Phi$	R <sup>2</sup>
H1	0,125	0,395	0,041	1,209	2,91	0,5	1,254	0,0001
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,272	0,0001
	0,114	0,395	0,041	1,209	2,98	0,5	1,191	0,0008
	0,078	0,395	0,039	1,209	2,61	0,5	1,065	0,0188
H2	0,117	0,436	0,065	1,294	7,19	0,5	1,254	0,0001
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,272	0,0001
	0,107	0,436	0,065	1,294	7,30	0,5	1,191	0,0008
	0,091	0,436	0,047	1,294	6,52	0,5	1,065	0,0188
H3	0,100	0,336	0,139	1,191	28,37	0,5	1,254	0,0001
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,272	0,0001
	0,124	0,336	0,139	1,191	25,69	0,5	1,191	0,0008
	0,273	0,336	0,142	1,191	33,17	0,5	1,065	0,0188

Tab. 7 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 3

Varianta 2 pro sondu 3								
Horizont	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	Ks (cm d <sup>-1</sup> )	L (-)	$\Phi$	R <sup>2</sup>
H1	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,587	0,0277
	0,125	0,395	0,041	1,387	6,00	0,2	0,608	0,3985
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,545	0,0322
	0,125	0,395	0,041	1,392	9,27	0,5	0,611	0,4046
	0,088	0,395	0,041	1,209	3,04	0,5	1,365	0,0537
	0,021	0,395	0,022	1,209	9,00	0,5	0,578	0,4437
H2	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,587	0,0277
	0,117	0,436	0,065	1,988	18,67	1,9	0,608	0,3985
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,545	0,0322
	0,117	0,436	0,065	2,018	5,05	0,5	0,611	0,4046
	0,102	0,436	0,065	1,294	6,04	0,5	1,365	0,0537
	0,000	0,436	0,102	1,294	21,59	0,5	0,578	0,4437
H3	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,587	0,0277
	0,100	0,336	0,139	1,194	11,01	0,2	0,608	0,3985
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,82	0,5	1,545	0,0322
	0,100	0,336	0,139	1,203	8,23	0,5	0,611	0,4046
	0,115	0,336	0,139	1,191	33,66	0,5	1,365	0,0537
	0,070	0,336	0,068	1,191	4,26	0,5	0,578	0,4437

Tab. 8 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 4

Varianta 2 pro sondu 4								
Horizont	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	Ks (cm d <sup>-1</sup> )	L (-)	$\Phi$	R <sup>2</sup>
H1	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,370	0,1719
	0,125	0,395	0,041	1,361	40,57	0,5	0,567	0,4366
	0,125	0,395	0,027	1,209	686,85	0,5	0,604	0,4040
	0,028	0,395	0,041	1,333	5,33	0,5	0,504	0,5003
	0,125	0,395	0,019	1,722	1,84	0,5	0,557	0,4591
	0,000	0,395	0,041	1,278	7,38	0,5	0,500	0,5040
	0,000	0,395	0,020	1,209	9,79	0,5	0,555	0,4500
	0,014	0,395	0,033	1,325	4,77	0,5	0,498	0,5109
H2	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,370	0,1719
	0,117	0,436	0,065	1,559	23,95	0,5	0,567	0,4366
	0,117	0,436	0,036	1,294	1810,80	0,5	0,604	0,4040
	0,019	0,436	0,065	1,515	9,92	0,2	0,504	0,5003
	0,117	0,436	0,054	1,766	11,31	0,5	0,557	0,4591
	0,040	0,436	0,065	1,490	20,64	0,5	0,500	0,5040
	0,034	0,436	0,042	1,294	32,59	0,5	0,555	0,4500
	0,000	0,436	0,054	1,462	13,41	0,5	0,498	0,5109
H3	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,370	0,1719
	0,100	0,336	0,139	1,587	1,10	0,5	0,567	0,4366
	0,100	0,336	0,141	1,191	130,75	0,5	0,604	0,4040
	0,003	0,336	0,139	1,510	0,96	1,3	0,504	0,5003
	0,100	0,336	0,225	1,460	2,69	0,5	0,557	0,4591
	0,003	0,336	0,139	1,439	1,02	0,5	0,500	0,5040
	0,041	0,336	0,144	1,191	47,84	0,5	0,555	0,4500
	0,016	0,336	0,228	1,322	3,23	0,5	0,498	0,5109

Tab. 9 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 5

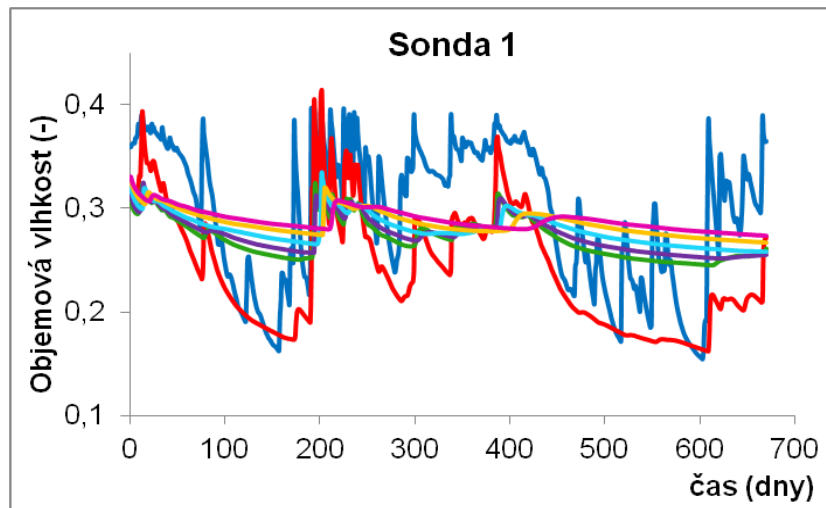
Varianta 2 pro sondu 5								
Horizont	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha_4$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	Ks (cm d <sup>-1</sup> )	L (-)	$\Phi$	R <sup>2</sup>
H1	0,125	0,395	0,041	1,209	2,90	0,5	1,208	0,0049
	0,125	0,395	0,041	1,526	8,25	0,5	0,853	0,1499
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,99	0,5	1,265	0,0029
	0,000	0,395	0,041	1,209	12,41	0,5	0,920	0,0870
	0,106	0,395	0,041	1,669	3,88	0,5	0,853	0,1572
	0,125	0,395	0,041	1,209	2,98	0,5	1,215	0,0041
H2	0,117	0,436	0,065	1,294	7,08	0,5	1,208	0,0049
	0,117	0,436	0,065	2,168	33,70	0,5	0,853	0,1499
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,03	0,5	1,265	0,0029
	0,007	0,436	0,065	1,294	19,43	0,5	0,920	0,0870
	0,037	0,436	0,065	2,051	9,75	0,5	0,853	0,1572
	0,117	0,436	0,065	1,294	7,04	0,5	1,215	0,0041
H3	0,100	0,336	0,139	1,191	29,21	0,5	1,208	0,0049
	0,100	0,336	0,139	1,391	1,74	0,5	0,853	0,1499
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,80	0,5	1,265	0,0029
	0,074	0,336	0,139	1,191	33,65	0,5	0,920	0,0870
	0,041	0,336	0,139	1,511	0,46	0,5	0,853	0,1572
	0,100	0,336	0,139	1,191	27,86	0,5	1,215	0,0041

zelené buňky

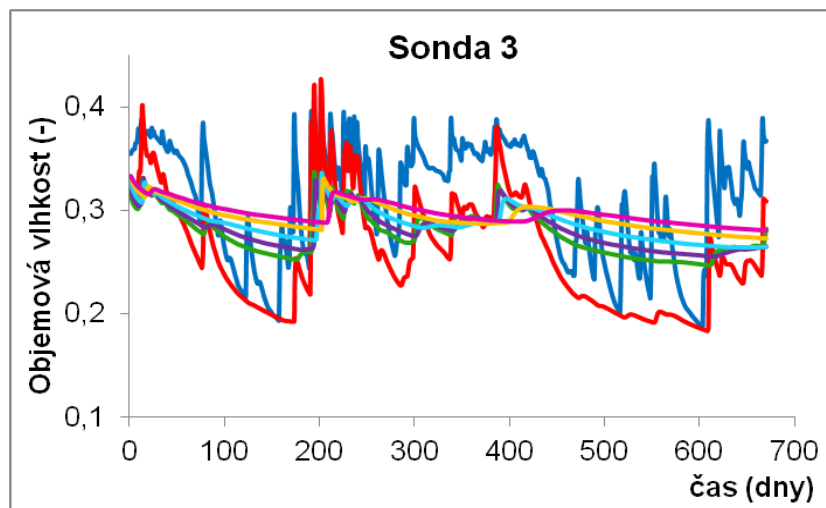
... optimalizované parametry

červené hodnoty ... vybrané hodnoty pro simulaci transportu tepla

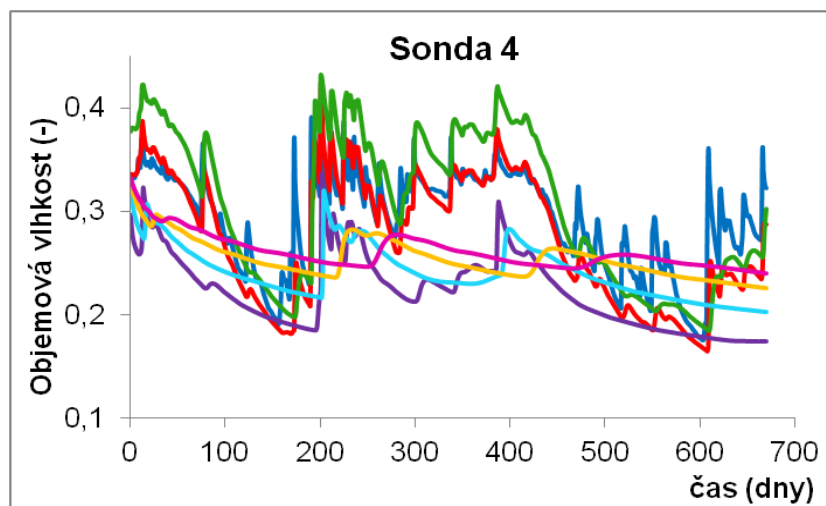
Protože měřená data v sondách 2 a 5 vykazovala významně rozdílné hodnoty od dalších variant a také nedošlo k výraznému zpřesnění simulací, jsou na obrázcích 67, 68 a 69 znázorněny objemové vlhkosti v čase jen pro sondy 1, 3 a 4. Objemová vlhkost je zobrazena v hloubce 10, 20, 30, 40, 60, 100, a 180 cm. Na obrázku 70 je zobrazen kumulativní tok na povrchu profilu pro sondu 1, 3, 4 a variantu 1, 2, 3. Pro stejné varianty je na obrázku 71 zobrazena kumulativní transpirace a na obrázku 72 je vidět kumulativní odtok dnem profilu.



Obr. 67 Sonda 1 – objemová vlhkost za čas



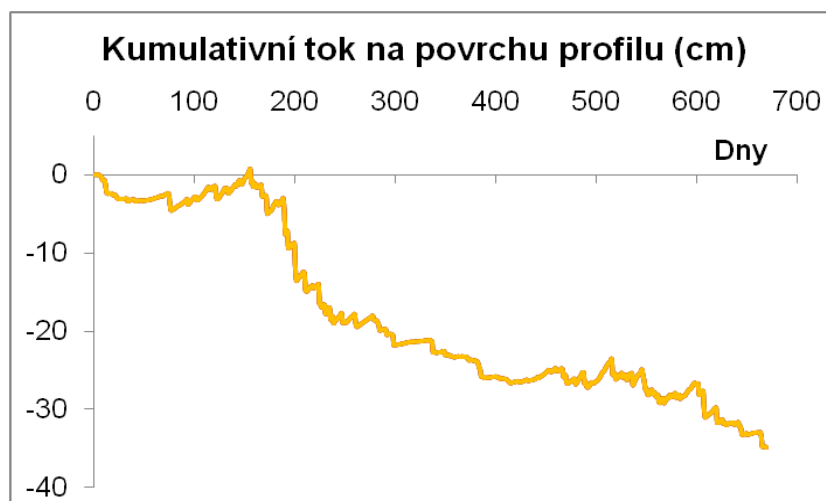
Obr. 68 Sonda 3 – objemová vlhkost za čas



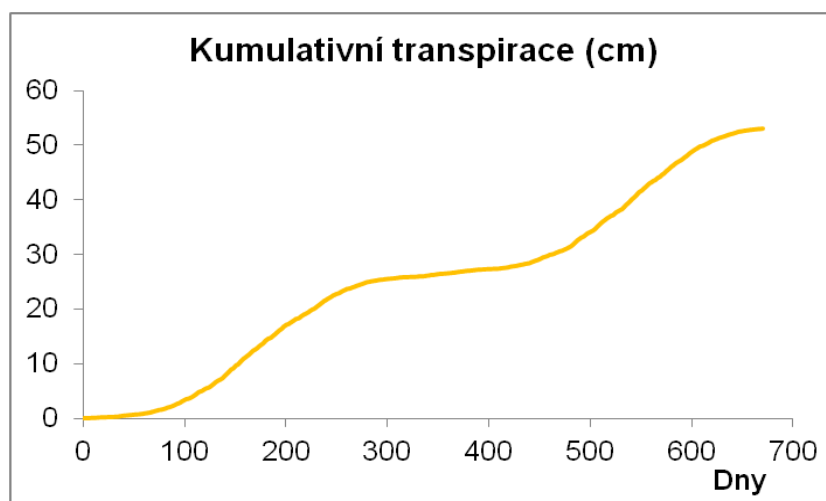
Obr. 69 Sonda 4 – objemová vlhkost za čas

- Hloubka 10 cm    — Hloubka 20 cm    — Hloubka 30 cm    — Hloubka 40 cm
- Hloubka 60 cm    — Hloubka 100 cm    — Hloubka 180 cm

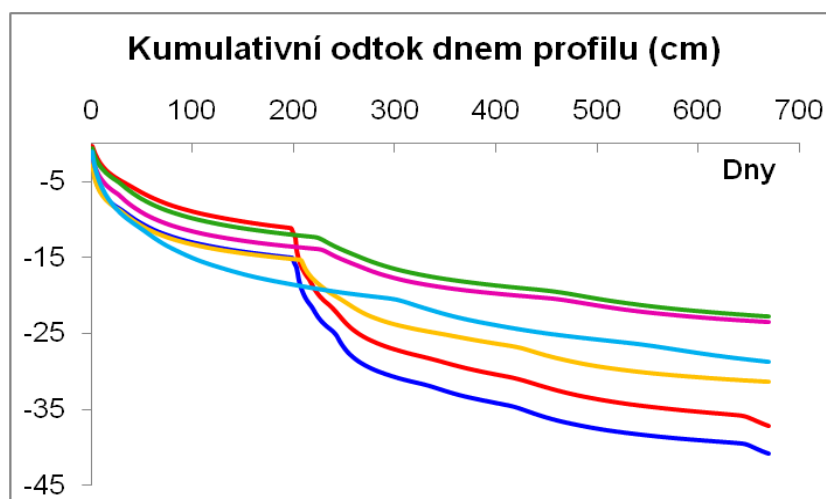




Obr. 70 Kumulativní tok na povrchu profilu - sonda 1, 3, 4



Obr. 71 Kumulativní transpirace - sonda 1, 3, 4



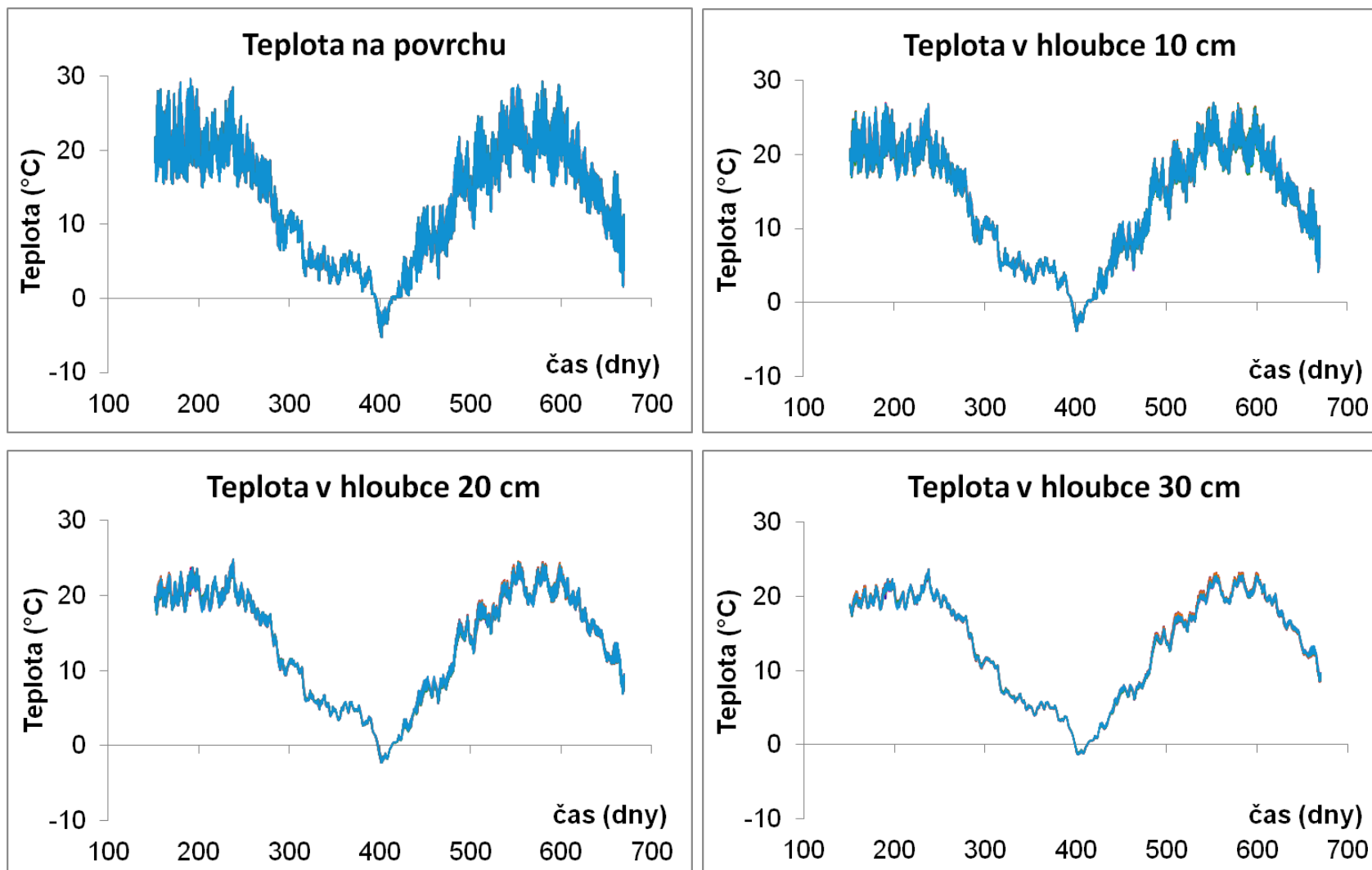
Obr. 72 Kumulativní odtok dnem profilu - sonda 1, 3, 4

— Varianta 1      — Varianta 2      — Varianta 3  
— Sonda 1      — Sonda 3      — Sonda 4

### **5.4.3. Simulace transportu tepla v půdě**

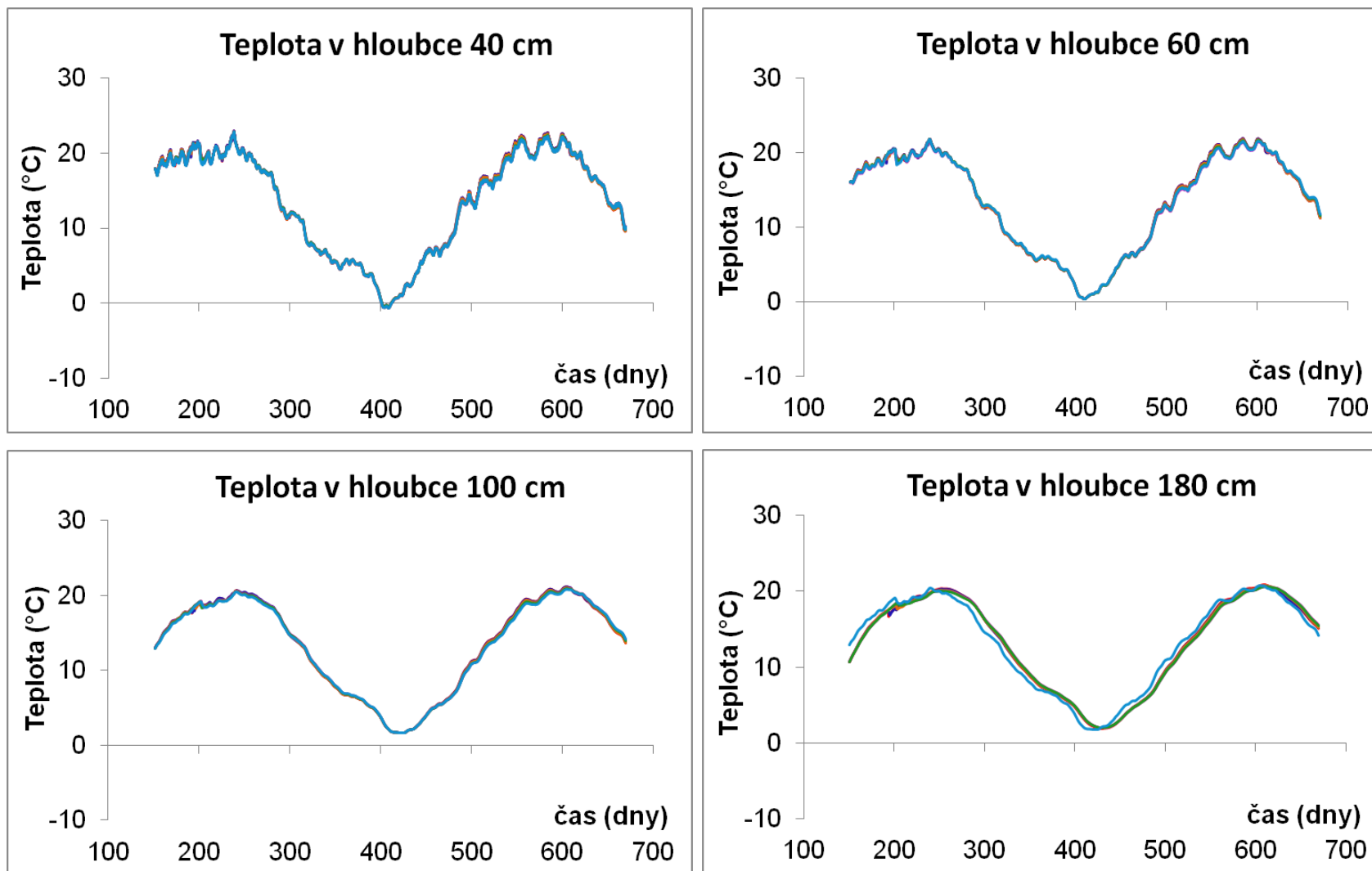
#### **5.4.3.1. Vliv hydraulických vlastností na transport tepla v půdě**

Obrázky 73 – 80 zobrazují teplotu půdy pod trávou v hloubkách 0, 10, 20, 30, 40, 60, 100 a 180 cm. Obrázky 81 – 84 znázorňují aktuální a kumulativní tepelné toky v půdním profilu pod trávou za čas. Obrázek 85 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu pod trávou 24. 6. 2011 a 24. 6. 2012. Obrázek 86 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu pod trávou 10. 9. 2011 a 10. 9. 2012. Obrázek 87 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu pod trávou 12. 10. 2011 a 12. 10. 2012. Obrázek 88 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu pod trávou 6. 2. a 5. 3. 2012.



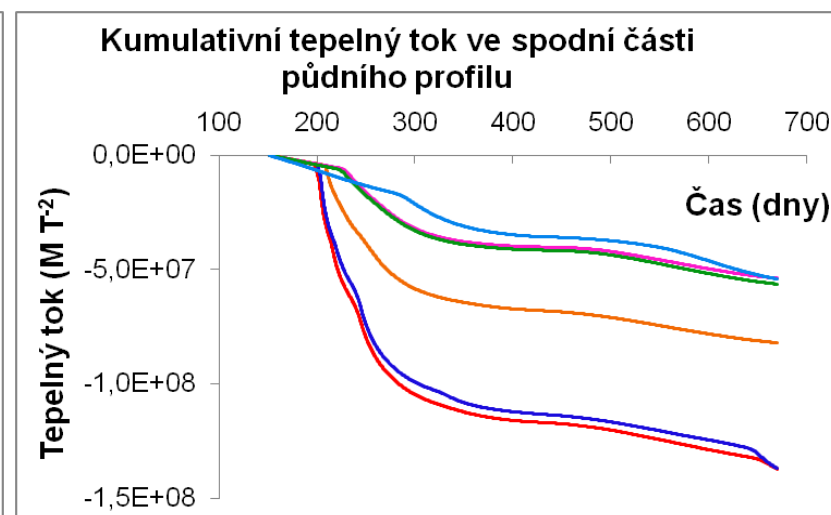
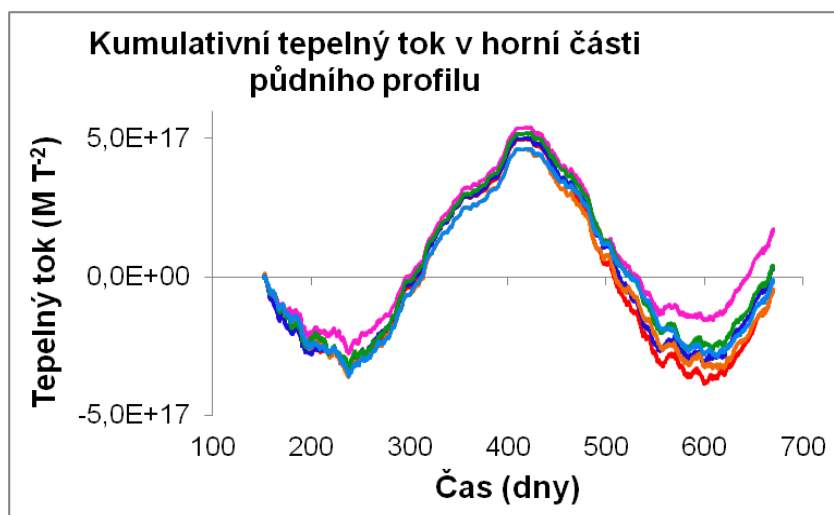
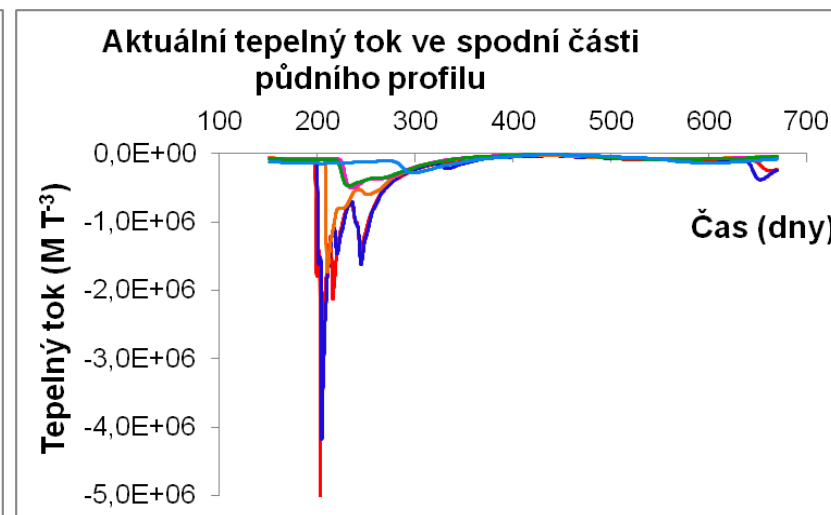
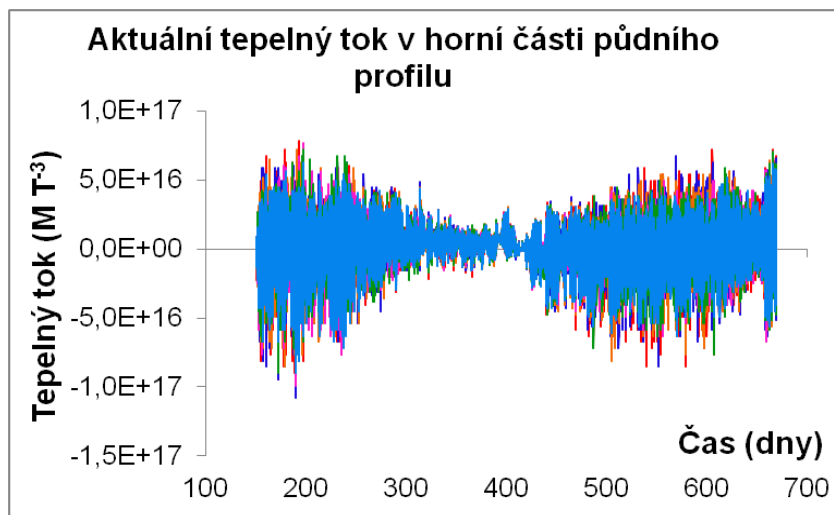
— Varianta 1      — Varianta 2      — Varianta 3  
 — Sonda 1        — Sonda 3        — Sonda 4

Obr. 73 – 76 Teplota půdy pod trávou v různých hloubkách



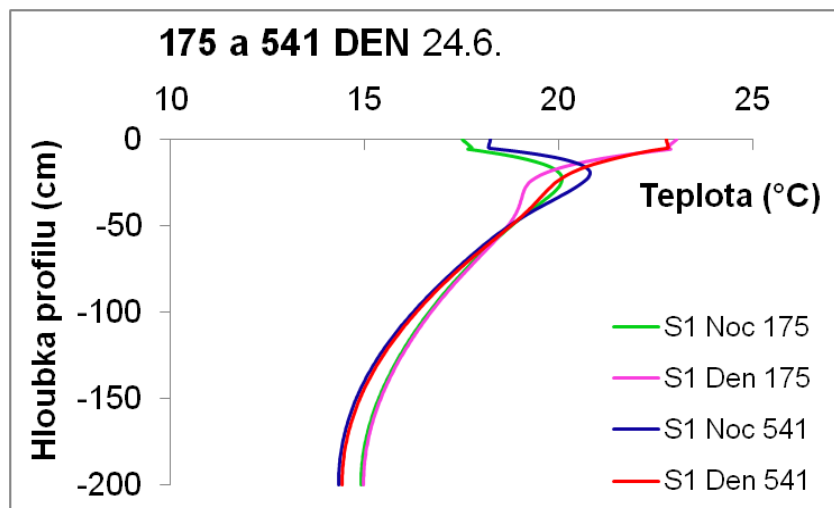
— Varianta 1      — Varianta 2      — Varianta 3  
 — Sonda 1      — Sonda 3      — Sonda 4

Obr. 77 – 80 Teplota půdy pod trávou v různých hloubkách

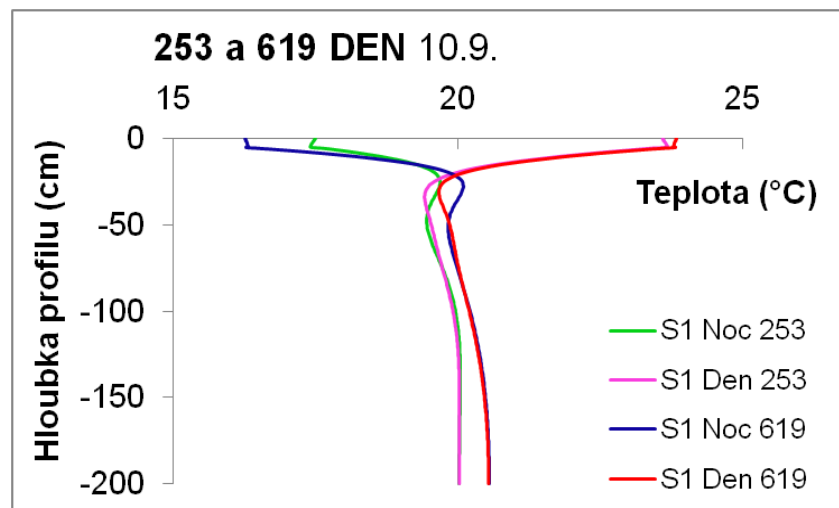


- Varianta 1
- Varianta 2
- Varianta 3
- Sonda 1
- Sonda 3
- Sonda 4

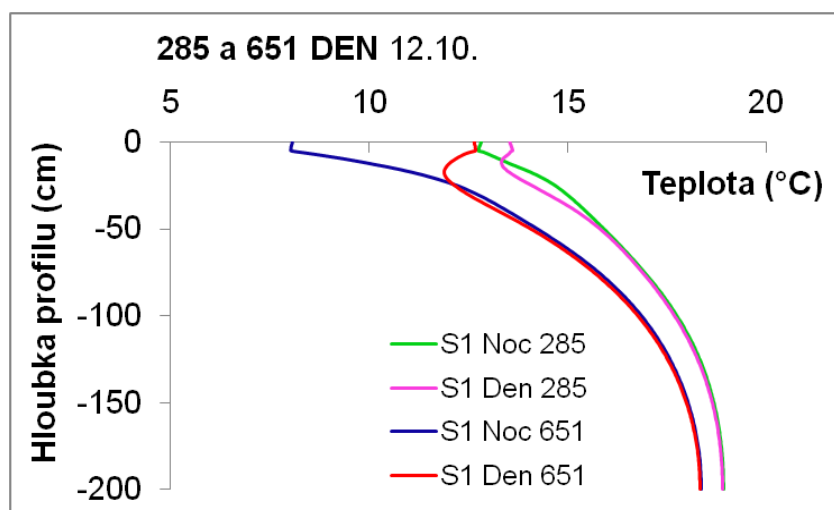
Obr. 81-84 Tepelné toky v půdním profilu pod trávou za čas



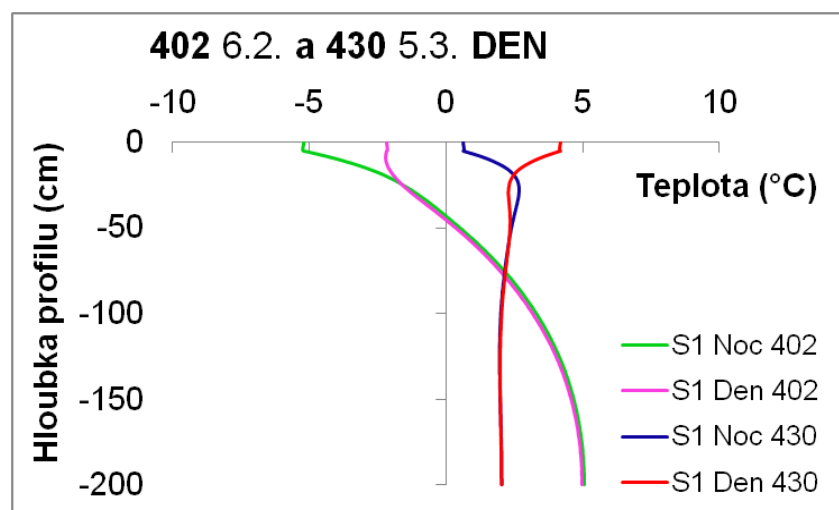
Obr. 85 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 24.6.2011 a 2012



Obr. 86 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 10.9.2011 a 2012



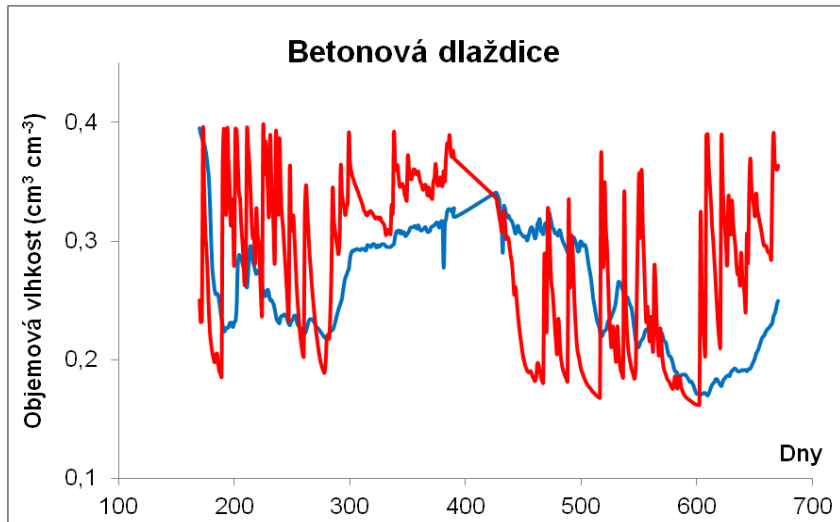
Obr. 87 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 24. 6. 2011 a 2012



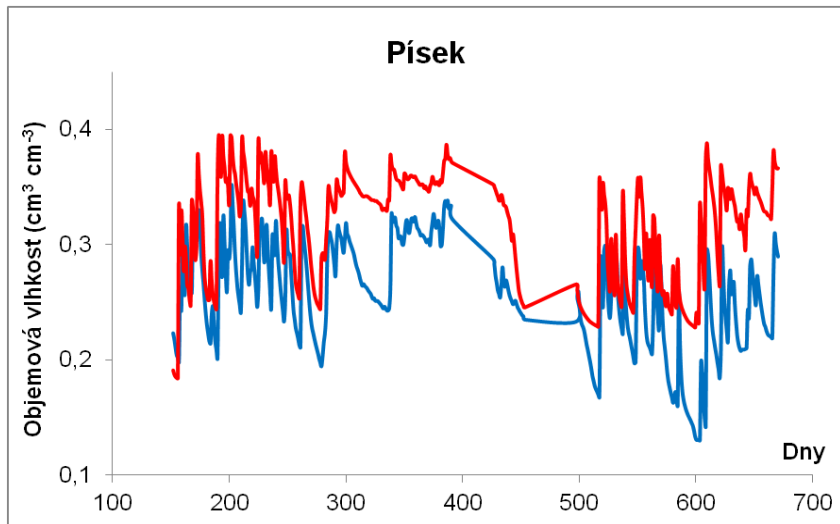
Obr. 88 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 10. 9. 2011 a 2012

### **5.4.3.2. Vliv povrchové úpravy na transport tepla v půdě**

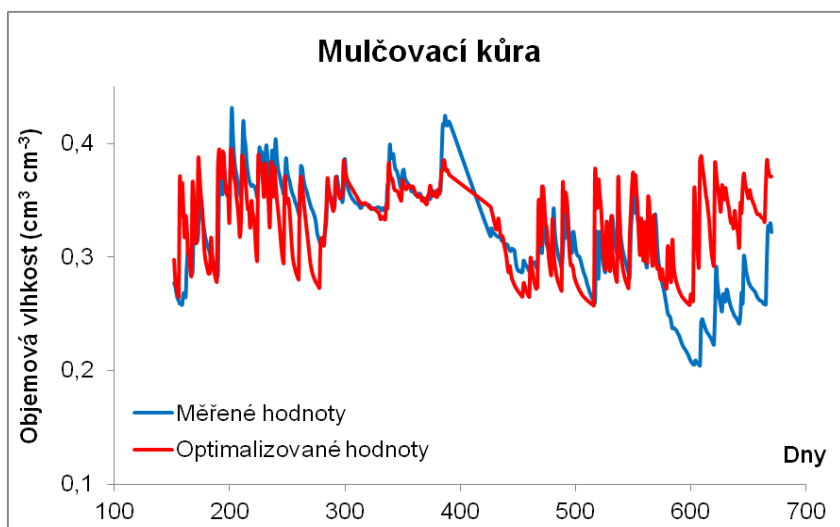
Na obrázku 89 je znázorněna vlhkost v 7 cm pod betonovou dlaždicí. Na obrázku 90 je znázorněna vlhkost v 7 cm pod pískem a na obrázku 91 je znázorněna vlhkost v 7 cm pod mulčovací kůrou. Obrázky 92 - 99 zobrazují teplotu půdy pod pěti různými povrchy (dlaždice, písek, štěrk, tráva a mulč. kůra) v hloubkách 0, 10, 20, 30, 40, 60, 100 a 180 cm. Obrázky 100 – 103 znázorňují aktuální a kumulativní tepelné toky v půdním profilu pod pěti různými povrchy za čas. Na obrázku 104 a 105 je zobrazena teplota v půdním profilu 24. 6. 2011 a 2012 pod různými povrchy. Na obrázku 106 a 107 je znázorněna teplota v půdním profilu 10. 9. 2011 a 2012 a na obrázku 108 a 109 je zobrazena teplota v půdním profilu 12. 10. 2011 a 2012 pod různými povrchy. Na obrázku 110 a 111 je zobrazena teplota v půdním profilu 6. 2. a 5. 3. 2012 pod různými povrchy.



Obr. 89 Vlhkost v 7 cm pod betonovou dlaždicí

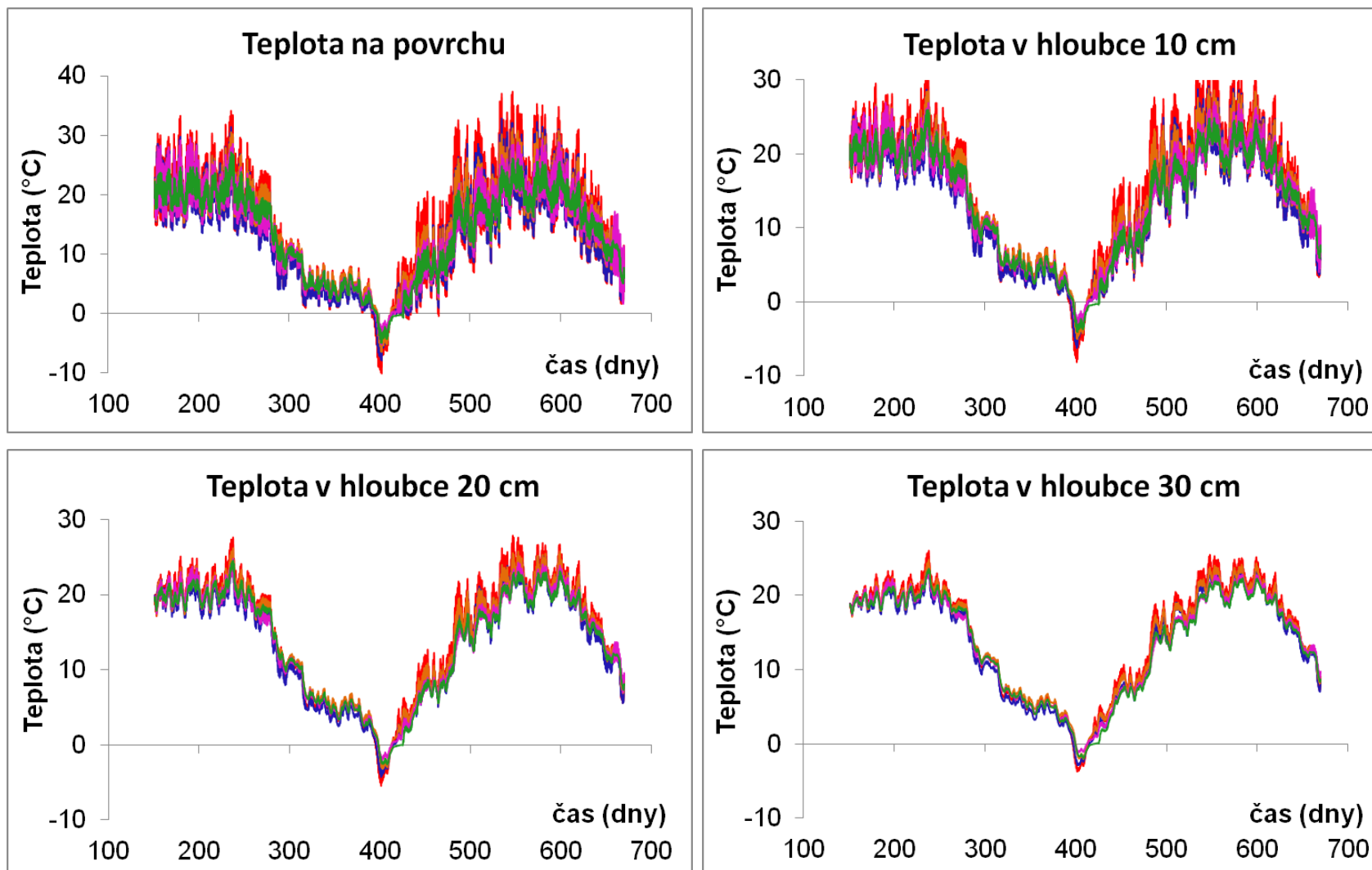


Obr. 90 Vlhkost v 7 cm pod pískem

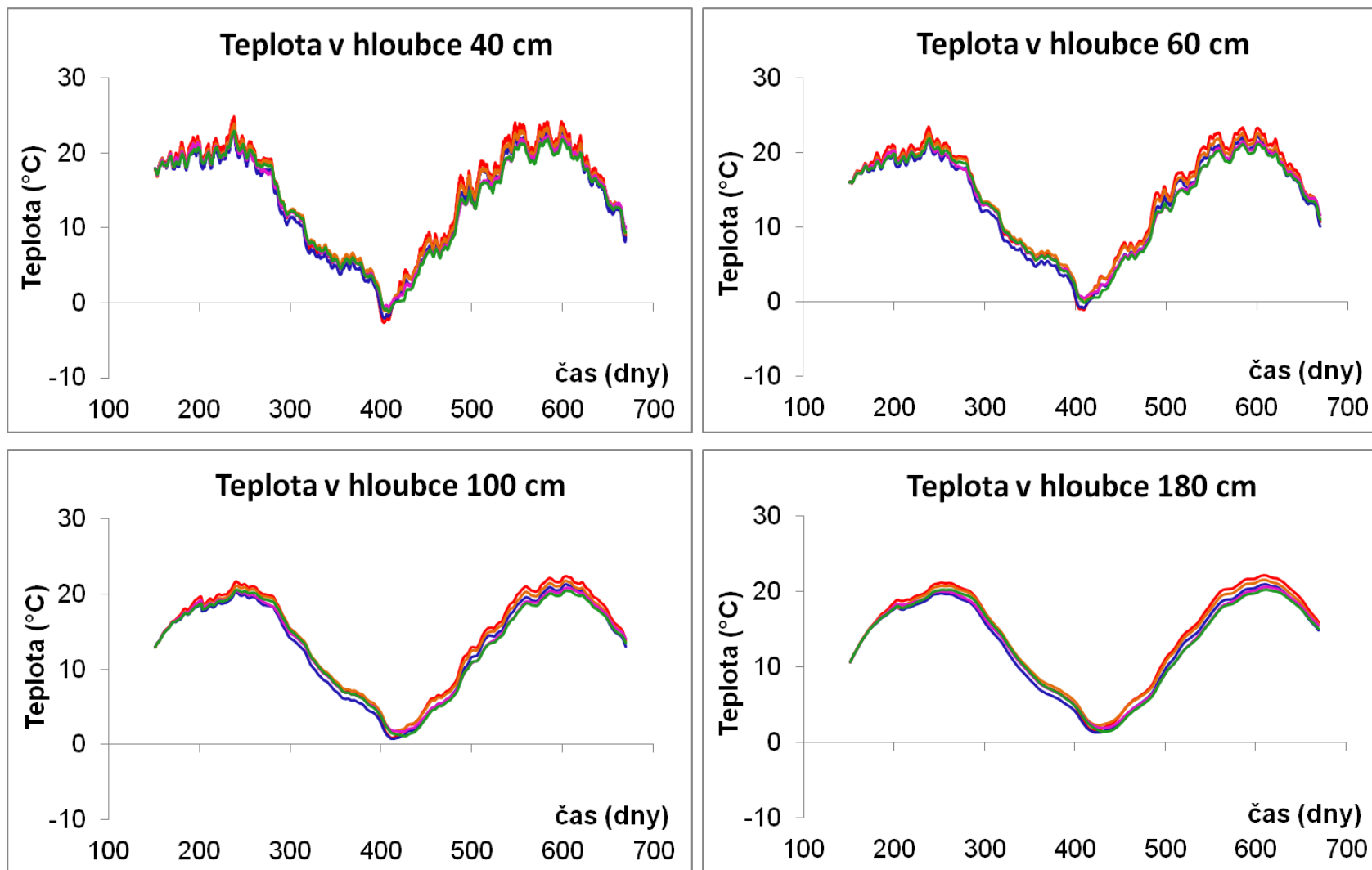


Obr. 91 Vlhkost v 7 cm pod mulčovací kůrou



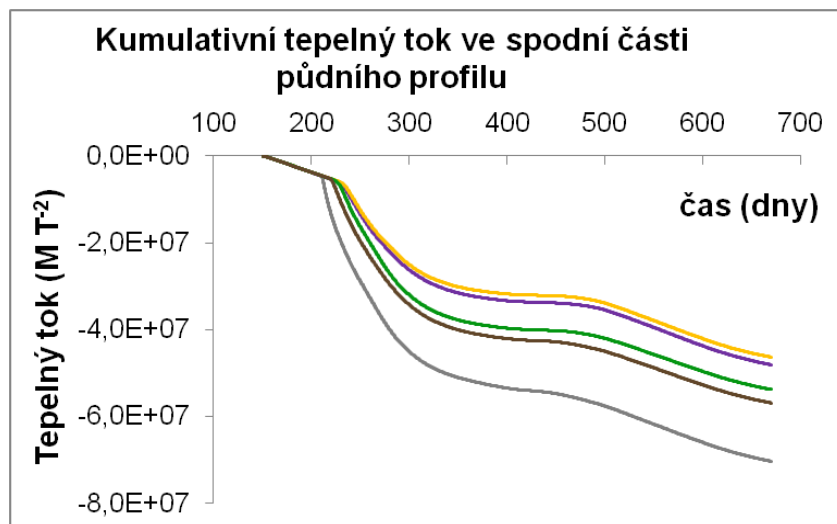
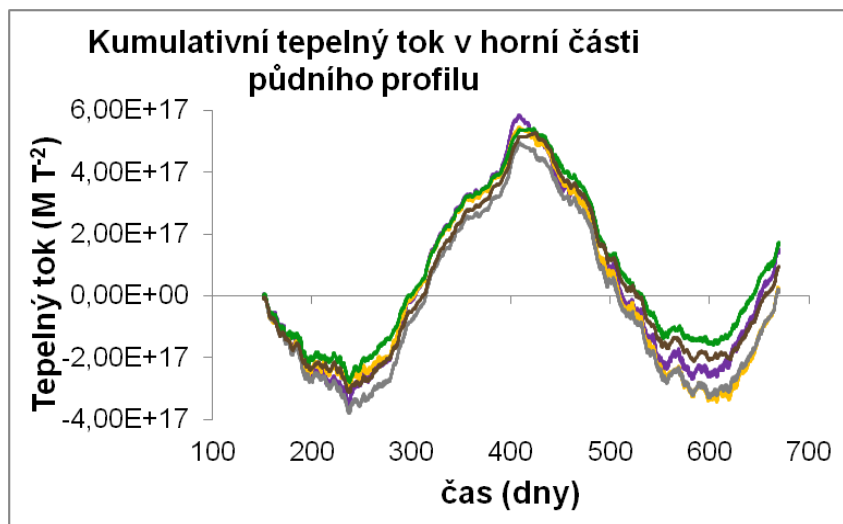
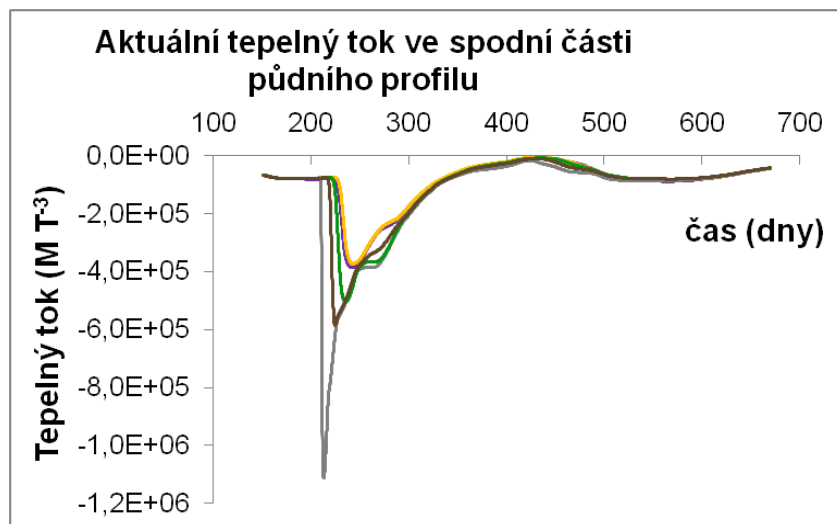
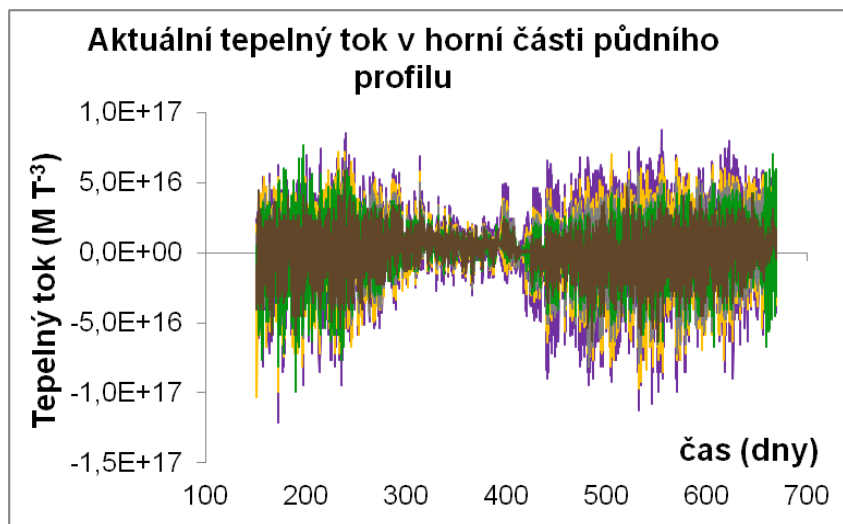


Obr. 92 - 95 Teplota půdy pod pěti povrchy v různých hloubkách



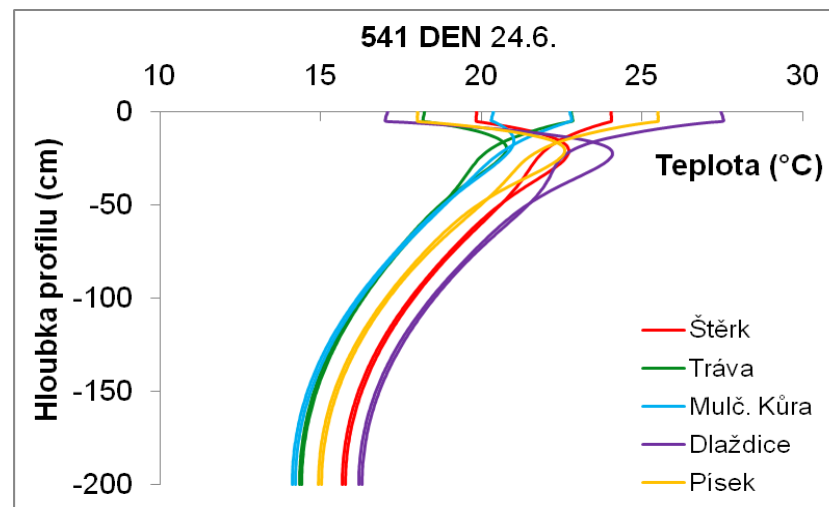
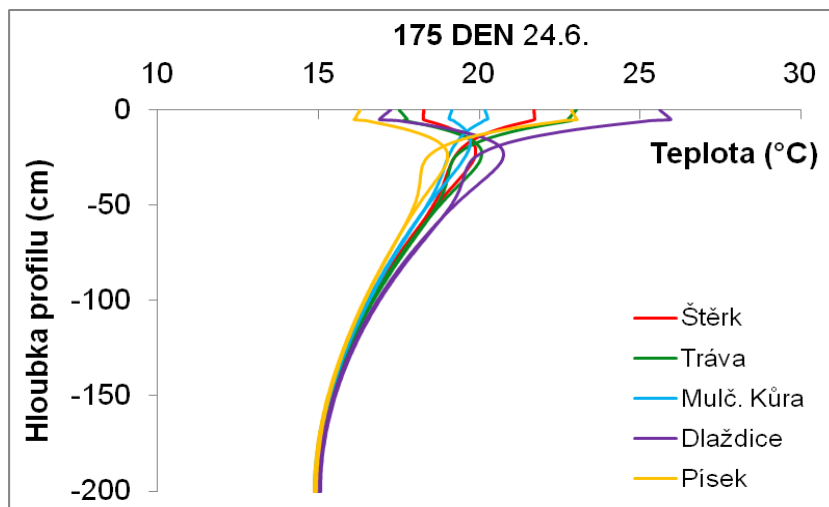
— Dlaždice — Písek — Štěrka — Tráva — Mulč. kůra

Obr. 96 - 99 Teplota půdy pod pěti povrchy v různých hloubkách

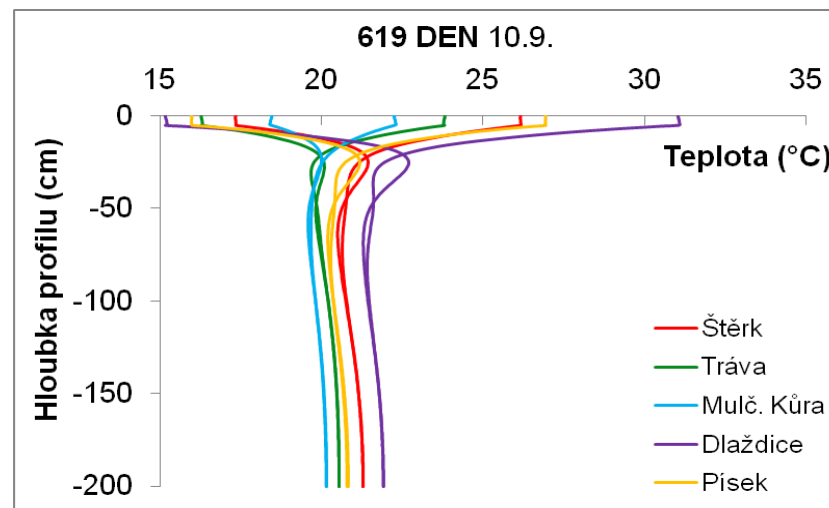
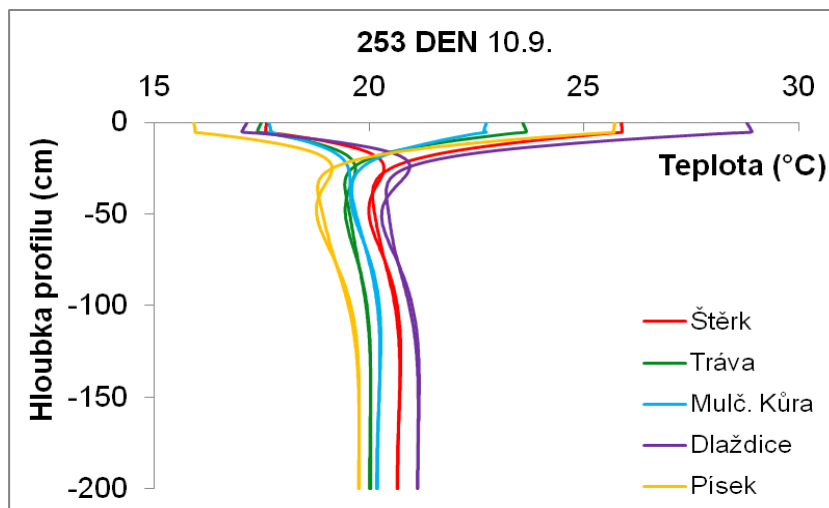


— Dlaždice — Písek — Štěrk — Tráva — Mulč. kůra

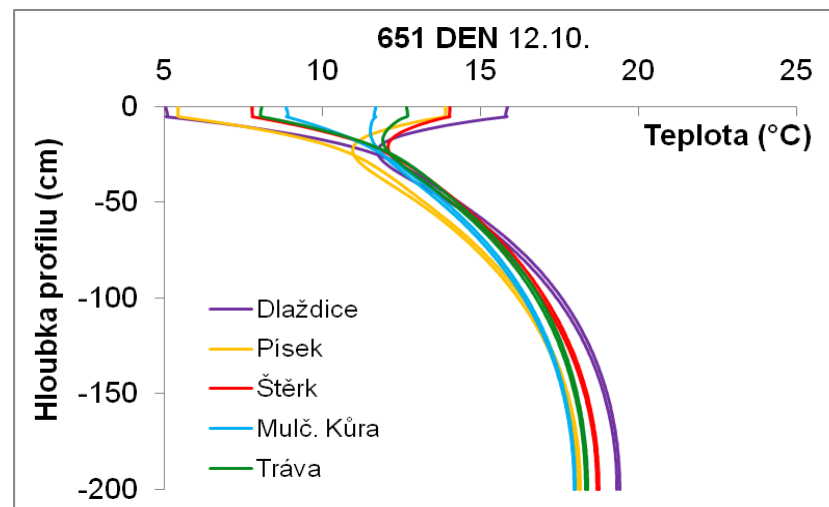
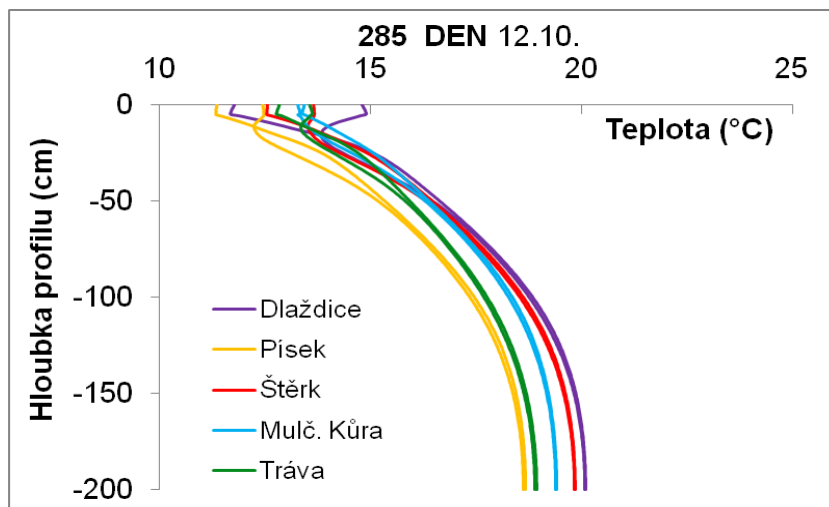
Obr. 100-103 Tepelné toky v půdním profilu pod pěti povrchy za čas



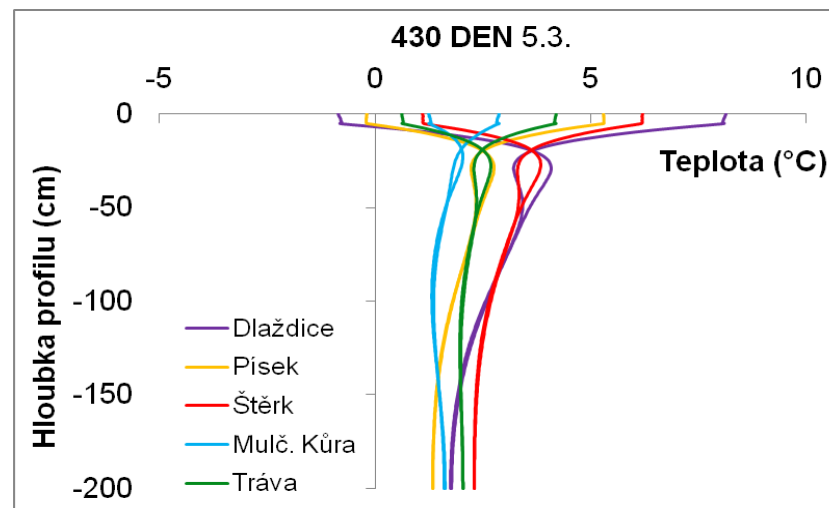
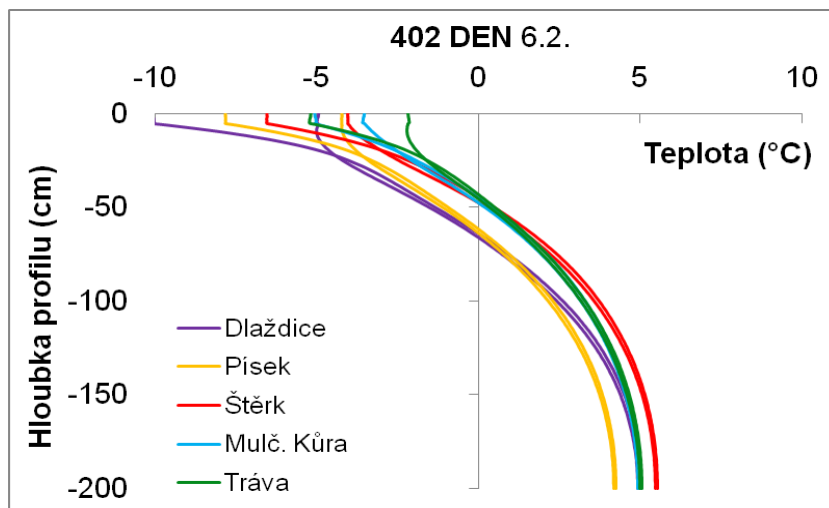
Obr. 104 a 105 Teplota v půdním profilu 24. 6. 2011 a 2012 pod různými povrchy



Obr. 106 a 107 Teplota v půdním profilu 10. 9. 2011 a 2012 pod různými povrchy



Obr. 108 a 109 Teplota v půdním profilu 12. 10. 2011 a 2012 pod různými povrchy



Obr. 110 a 111 Teplota v půdním profilu 6. 2. a 5. 3. 2012 pod různými povrchy

## 6. DISKUZE

Zkoumaná půda na pozemku firmy VESKOM, spol. s r.o. vykazovala různorodé základní půdní vlastnosti. Což nám potvrdilo správné zařazení půdy do půdního typu - antropozem. Již na obrázku (10) půdního profilu byla znatelná nepůvodní zemina (navezená zemina smíchaná se zbytky stavebního materiálu) převrstvená kvalitnější zeminou. Tato různorodost půdního profilu se dále projevovала na pozorovaných půdních vlhkostech a dále na simulaci proudění vody a transportu tepla.

### 6.1. Půdní tepelné charakteristiky

Změřené půdní tepelné vlastnosti můžeme vidět v příloze 1 – 9. V tabulkách jsou zaznamenány tepelné vodivosti a tepelné kapacity vzorků změřené senzorem TR-1 a SH-1. Senzorem SH-1 se změřila ještě tepelná difuzivita a tepelný odpor. Pro ilustraci je uvedena i spočítaná tepelná difuzivita a tepelný odpor. Tyto charakteristiky jsou závislé na objemové vlhkosti, názorně můžeme vidět závislost na obrázcích v části 5.3 (obr. 26 – 33). Na obrázku 26 a 27 je zobrazena tepelná vodivost, která stoupá s množstvím vody v půdě. Senzor SH-1 změřil tepelnou vodivost nižší než senzor TR-1, ale měření obou senzorů byla velmi podobná. Na obrázku 28 a 29 je zobrazena tepelná kapacita, která též stoupá se zvyšujícím se množstvím vody ve vzorku. U obou charakteristik je koeficient determinace vysoký, což značí vysokou spolehlivost výsledků. Na obrázku 30 a 31 je znázorněn změřený a vypočtený tepelný odpor sledovaných vzorků. Tepelný odpor byl vypočítán jako převrácená hodnota tepelné vodivosti. Jak je vidět spočítané hodnoty kopírují změřené hodnoty, a na rozdíl od tepelné vodivosti tepelný odpor s rostoucí objemovou vlhkostí klesá. Stejným způsobem je na obrázku 32 a 33 znázorněna tepelná difuzivita, která se vyjádřila jako poměr tepelné vodivosti na tepelnou kapacitu. Spočítané hodnoty kopírují změřené hodnoty a tepelná difuzivita roste s rostoucí objemovou vlhkostí.

## 6.2. Přímá simulace proudění vody v půdě

Namodelované varianty proudění vody v půdě, které jsou zobrazeny na obrázcích 34, 35 a 36 si jsou hodně podobné. Naměřené a zadané hodnoty RČPV a  $K_s$  byly odlišné, ale ve výsledku se od sebe příliš nelišily. Varianty se nepatrně odlišují postupným snižováním objemové vlhkosti od varianty 1 po variantu 3. U varianty 1 u hloubky 20 cm byly namodelovány menší oscilace vlhkostí než u varianty 2 a 3. Kumulativní toky na povrchu profilu pro tyto tři varianty jsou totožné (obr. 70), stejně jako u kumulativní transpirace (obr. 71). Na obrázku 72 je vidět kumulativní odtok vody dnem profilu. Zde se už křivky odlišují a to tak, že nejvíce vody odteče u varianty 2 a nejméně u varianty 3, což je dáno nasycenou hydraulickou vodivostí.

Připojením naměřených půdních vlhkostí na pozemku firmy VESKOM k simulovaným variantám byly zjištěny nesrovnalosti. Na obrázcích 37 - 66 jsou znázorněny všechny sondy ve všech sledovaných hloubkách. Varianty 1, 2 a 3 byly namodelovány od 1. 1. 2011 do 31. 10. 2012, ale půdní vlhkost se měřila od 2. 5. 2011 do 22. 10. 2012. Simulace hodnot půdní vlhkosti sondy 1 odpovídaly měřeným hodnotám a drobné odchylky byly zaznamenány v hloubce 20 a 60 cm. Naměřené hodnoty byly nižší než namodelované. Může to být dáno přítomností většího kusu betonu v místě měření. Simulace vlhkosti v hloubce 10 cm v průběhu prvního roku byly podobné naměřeným hodnotám, ale druhý rok se odlišovaly. Částečně to může být ovlivněno nižšími srážkami. Tato situace nastala u všech sond. U sondy 2 se neshodovaly hloubky 40 a 100 cm, kdy byly naměřené hodnoty vyšší než simulované hodnoty. V tomto případě můžeme přičíst nesrovnalosti vlivu trhlin a pórů. U sondy 3 se simulované hodnoty lišily v hloubce 20 a 100 cm. Naměřené hodnoty byly nižší než namodelované hodnoty, což může být dáno například kouskem stavebního materiálu. Sonda 4 měla nestandardní hodnoty v hloubce 30 cm, kdy část naměřených dat byla vyšší a část nižší než simulované hodnoty. Následovaly hodnoty v hloubce 40 cm a v hloubce 60 cm, které byly nižší než namodelovaná data. V sondě 5 byl zaznamenán výrazně odlišný režim půdní vody. Rozdílné hodnoty byly v hloubce 20, 30, 40 a 100 cm. Proto byla tato sonda podobně jako sonda 2 vyloučena z dalších analýz viz. dále.

### 6.3. Inverzní modelování

Pro přiblížení namodelovaných variant a změřených dat bylo využito inverzního modelování. Optimalizovaly se parametry RČPV a  $K_s$ . Pro tuto simulaci byla vybrána pouze varianta číslo 2, změny parametrů jsou uvedeny v tabulkách 5 – 9. U sondy 1 se naměřené parametry od modelovaných lišily jen málo, více se odlišovala nasycená hydraulická vodivost u 2 a 3 vrstvy. Nejlépe naoptimalizovaná varianta je zobrazena na obrázku 67. U sondy 2 nešel optimalizovat parametr  $n$ , proto bylo méně optimalizovaných variant. Parametry  $\theta_r$ ,  $\alpha_4$  a  $K_s$  se měnily jen nepatrně. Z výsledné funkce a koeficientu determinace optimalizovaných variant bylo usouzeno, že sonda 2 nejde lépe namodelovat. U sondy 3 se také nejvíce měnila nasycená hydraulická vodivost a to ve všech vrstvách. U nejlepší naoptimalizované varianty se změnila  $\theta_r$ ,  $\alpha_4$  a  $K_s$  (obr. 68), zjištěno podle koeficientu determinace. Sonda 4 měla hodně variant optimalizace. Výsledná varianta se od původní lišila hlavně nasycenou hydraulickou vodivostí a parametrem  $\alpha_4$  ve třetí vrstvě (obr. 69). Inverzní modelování u sondy 5 nebylo úspěšné. Již u přímého modelování se simulované varianty hodně odlišovaly od naměřených hodnot. Nejlépe naoptimalizované parametry tedy vyšly u sond 1, 3, a 4, které byly použity pro simulaci transportu tepla.

Na zmíněných obrázcích 67 – 69 je zobrazena objemová vlhkost v čase optimalizovaných sond. Sonda 1 a 3 se od sebe moc neliší, jen sonda 1 se v hloubce 10 a 20 cm dostává do nižších vlhkostí. V sondě 4 v hloubce 30 cm byl naměřen nestandardní průběh. V kumulativním toku na povrchu profilu (obr. 70) a kumulativní transpiraci (obr. 71) se sondy ani varianty neliší. Na obrázku 72 se sondy i varianty odlišují, větší kumulativní odtok vody dnem profilu vykazovaly varianty 1, 2, 3. Sondy 1, 3, 4 měly menší kumulativní odtok vody dnem profilu.

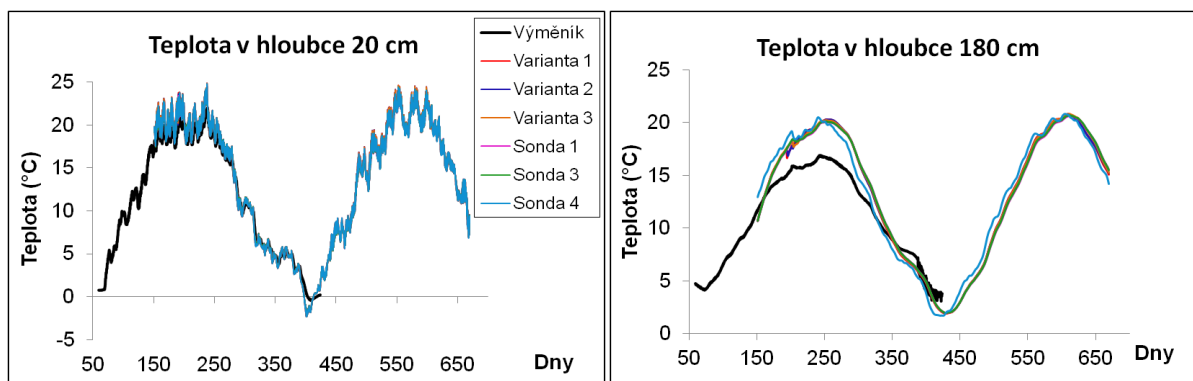
### 6.4. Simulace transportu tepla v půdě

#### 6.4.1. Vliv hydraulických vlastností na teplotu půdy

Simuloval se transport tepla v půdě pod vegetací (trávou). Bylo zvoleno 6 různých variant, u kterých se odlišovaly hydraulické vlastnosti. Jak je znázorněno na obrázcích 73 - 80, varianty se začaly nepatrně odlišovat až v hloubce 180 cm. Také se na obrázcích projevuje vliv slunečního záření. Křivky se s větší hloubkou vyhlazují

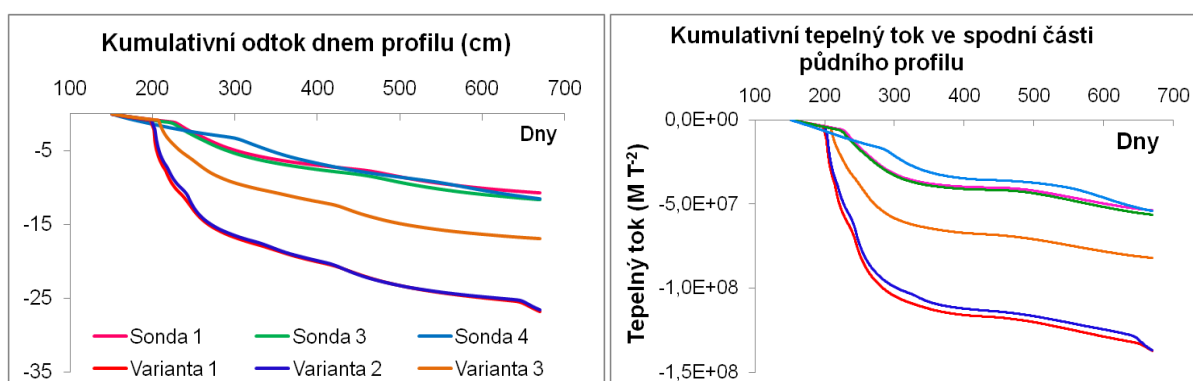


a rozdíl dne a noci zaniká a teploty se stávají stabilnější. Pro ilustraci jsou na obrázku 112 zobrazeny simulované teploty a teploty měřené v hloubce 20 a 180 cm u tepelného výměníku. Změřené teploty v hloubce 20 cm kopírují namodelované teploty v půdním profilu. Simulovaná půdní teplota v hloubce 180 cm byla vyšší než změřené hodnoty. Změřené hodnoty v hloubce 180 cm mohou být ovlivněny tepelným kolektorem, který byl uveden do provozu roku 2008.



Obr. 112 Změřené a simulované teploty v hloubce 20 a 180 cm

Na obrázcích 81 - 84 jsou vidět rozdílné tepelné toky stejných variant. Především se odlišují varianty 1, 2 a 3 od sondy 1, 3 a 4, což je zřejmé u kumulativního tepelného toku ve spodní části profilu. U varianty 1 a 2 se do půdy dostane více tepla než u ostatních variant. Srovnáním kumulativního odtoku dnem profilu s kumulativním tepelným tokem na dně profilu je vidět, jak tok tepla byl především ovlivněn tokem vody (obr. 113).



Obr. 113 Porovnání kumulativních toků vody a tepla na dně profilu

Také se pro ilustraci vybralo několik dní, pro zobrazení režimu tepla během dne a noci. Obrázek 85 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu 24. 6. 2011 a 24. 6. 2012. Obrázek 86 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu 10. 9. 2011 a 10. 9. 2012. Na těchto obrázcích je vidět téměř shodná podobnost dnů, i když se liší o rok. Křivky pro noc zobrazují v horní části profilu únik tepla z půdy a křivky pro den představují příjem tepla do půdního profilu. Teplota na horním okraji půdy (denní amplituda) ovlivňuje půdní profil přibližně do hloubky 25 cm. Dále na obrázku 87 je zobrazena teplota půdy v půdním profilu 12. 10. 2011 a 12. 10. 2012. Zde už je patrné odlišení dnů, ale tvarem křivky jsou si podobné. Obrázek 88 zobrazuje teplotu půdy v půdním profilu 6. 2. a 5. 3. 2012. Kdy 6. 2. byla nejnižší teplota za celý rok na povrchu profilu a 5. 3. byla nejnižší teplota za celý rok ve spodní části profilu. U 5.3 2012 je patrné, že teplota půdy byla v celém profilu přibližně stejná, jen na povrchu profilu se měnila vlivem teploty na horním okraji půdy.

#### **6.4.2. Vliv úpravy půdního povrchu na teplotu půdy**

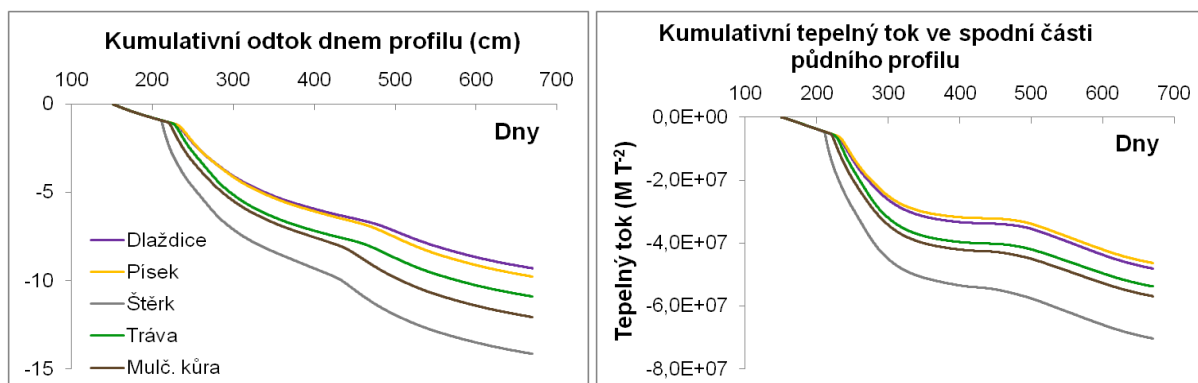
Transport tepla se simuloval v půdě pod pěti různými povrchy. Simulace proběhla pod trávou, která je zmíněna v části 6.3. Další simulace byly namodelovány pod betonovou dlaždicí, štěrkem, pískem a mulčem. Například Dahiya et al. (2007) uvedli, že zbytky plodin mohou být využity k mulčování a tím zlepšit hydrotermální režim půdy. Jak různé povrchy půdy ovlivňují vodní a tepelný režim půdy, je uvedeno v následující části.

Na obrázcích 89 - 91 jsou zobrazeny změřené a namodelované vlhkosti v 7 cm pod třemi materiály. Namodelované půdní vlhkosti pod betonovou dlaždicí se nepřiblížily naměřeným hodnotám. Simulované půdní vlhkosti pod pískem už lépe kopírovaly naměřené hodnoty, ale byly modelem trochu nadhodnocené. Nejlepší namodelované vlhkosti byly u mulče. Hodnoty byly hodně podobné, jen byly trochu nadhodnocené na konci sledovaného období.

Na obrázcích 92 – 99 je vidět vliv různé úpravy půdních povrchů na teplotu půdy v jednotlivých hloubkách. Největší oscilace teploty projevila betonová dlaždice, která takto vyjádřila rychlou odezvu na změnu teploty. Následoval štěrk, písek, tráva a mulčovací kůra. Největší dotaci tepla do profilu v letním období poskytla betonová dlaždice a následně štěrk, písek, tráva a mulč. V zimním období byl únik tepla z profilu největší u betonové dlaždice a pak u písku, štěrku, mulče a trávy. Dlaždice

měla rychlou reakci na změnu teploty, proto se nejvíce zahřívala a také se nejdříve a nejvíce ochlazovala. Reakce na změnu teploty byla pomalejší u mulče a trávy. Ty měly nejmenší oscilace teplot a pomaleji se ochlazoval i zahříval půdní profil.

Tepelné toky půdního profilu jsou vidět na obrázcích 100 - 103. Na obrázku 100 je vyobrazen aktuální tepelný tok v horní části profilu. Z obrázku je patrné, že teplota se měnila nejvíce na povrchu dlaždice a nejméně na povrchu mulčovací kůry. Kumulativní tepelný tok v horní části půdního profilu (obr. 102) zobrazuje, že v letním období byla půda nejvíce dotována teplem pod povrchem štěrku, pak pod povrchem betonové dlaždice, mulče, písku a trávy. U druhého roku byla půda dotována teplem nejvíce pod štěrkem a pískem a pak následovala betonová dlaždice, mulč a tráva. V zimních měsících uniká nejvíce tepla z profilu pod betonovou dlaždicí. Potom následuje písek, tráva, mulč a štěrk. Dlaždice a písek předávají a ztrácejí nejvíce tepla. Tráva a mulč vedou méně tepla, což může být ovlivněno tím, že zadržují více vody než ostatní materiály a mají vyšší výpar z povrchu půdy. Poté se do půdního profilu dostane méně vody, která vede méně tepla. Štěrk v letním období dotuje půdní profil teplem ještě víc, než dlaždice a písek. Může to být dáno tím, že se ve štěrku nezadrží žádná voda, dostane se všechna do profilu a voda je dobrý vodič tepla. V zimním období půdní profil pod štěrkem ztrácí nejméně tepla. Štěrk je hrubozrnný a vyšší obsah vzduchu v povrchové vrstvě štěrku zamezuje vedení tepla. Kumulativní tepelný tok ve spodní části profilu je znázorněn na obrázku 103. Zde je vidět, že nejvíce tepla se dostane do půdy, když je na povrchu půdy štěrk. Nejméně tepla se do spodní části profilu dostalo, když povrchová úprava půdy byla betonová dlaždice. Tepelný tok v půdě velmi záleží na vodním režimu půdy. Pro srovnání je na obrázku 114 vidět kumulativní odtok vody dnem profilu a kumulativní tepelný tok na dně profilu. Antonopoulos (2006) uvádí, že během zimního období je teplo předáváno z hlubších půdních vrstev na povrch, zatímco v letních měsících mění směr. U této simulace se tento jev neprojevil.



Obr. 114 Porovnání kumulativních toků vody a tepla na dně profilu pod pěti povrchy

Na obrázcích 104 a 105 je znázorněna teplota půdního profilu ze dne 24. 6. 2011 a 2012 pod pěti různými povrchy. Oba dny jsou stejné pouze ve tvaru křivek, které značí vyšší teploty na povrchu profilu a chladnější teploty ve spodní části profilu. Můžeme si všimnout, že křivky v roce 2011 se sbíhají v hloubce 200 cm v jednom bodu. Je to dáno tím, že různé materiály byly vytvořeny necelé dva měsíce před tímto měřením a vliv různých povrchů se nestačil prokázat. Za to po roce jsou vlivy různých povrchů znatelně vidět. Na obrázku 106 a 107 můžeme vidět dny (10. 9. 2011 a 2012), kdy se vyrovnává teplota v celém půdním profilu. Tvary křivek jsou si velmi podobné v obou dnech, jen jsou rozdílné v denních a nočních teplotách na povrchu profilu. Z obrázků vyplývá, že dlaždice se nejvíce zahřívá a i půdní profil je teplejší než ostatní profily. U mulče a u trávy můžeme zmínit, menší vliv denní a noční teploty, ale tím ovlivňují i půdní profil do hloubky menší teplotou. Na obrázku 108 a 109 je znázorněn den (12. 10.) s opačným jevem než u dne 24. června. Teplota na povrchu půdního profilu je nižší než ve spodní části profilu. Jak napovídá datum 12. října, tento jev nastává po letním období. O 4 měsíce později (6. 2.) teploty klesnou na povrchu profilu do minusových hodnot, ale teplota v hloubce 200 cm neklesne pod 0 °C. Po měsíci (5. 3.), nastává den s nejnižšími teplotami ve spodní části profilu a teploty na povrchu pomalu začínají stoupat.

## 7. ZÁVĚR

V předkládané práci byly vyhodnoceny základní půdní vlastnosti, které potvrdily antropogenitu půdy na pozemku firmy VESKOM, spol. s r.o. Monitoring půdních vlhkostí proběhl u pěti sond v šesti hloubkách během roku 2011 a 2012. Dále se měřila půdní vlhkost současně s teplotou půdy v hloubce 7 cm pod pěti různými povrchy (pod betonovou dlaždicí, pískem, štěrkem, mulčovací kůrou a trávou). Režim půdní vody a tepla byl simulován pomocí programu HYDRUS – 1D. K tomu účelu byly změřeny hydraulické a tepelné vlastnosti půdy.

Byla provedena kalibrace modelu HYDRUS - 1D pro simulaci vodního režimu půdy. Výsledky přímé simulace proudění vody uspokojivě odpovídaly naměřeným vlhkostem. Některé nesrovnalosti lze připsat kavernám či větším zbytkům stavebního materiálu obsažené v půdě. Dále byla provedena optimalizace parametrů hydraulických vlastností k přiblížení simulovaných vlhkostí v půdě k měřeným hodnotám. Pro transport tepla bylo využito šest scénářů. Tři varianty z přímého modelování a tři varianty vzniklé optimalizací hydraulických parametrů. Tyto varianty se odlišovaly hydraulickými vlastnostmi, ale velký vliv na transport tepla v půdě neměly. Varianty se začali zřetelně odlišovat až vlivem rozdílné úpravy povrchu půdy.

Betonová dlaždice prokázala nejrychlejší reakci na změnu teplot velkými oscilacemi. V letním období měla větší dotace tepla do půdy a v zimním období zajišťovala největší přestup tepla do vzduchu. Písek prokazoval velmi podobné tepelné toky. Štěrk v letním období dotoval půdní profil teplem nejvíce a v zimním období vedl teplo nejméně. V letních měsících totiž ochotně propouštěl vodu a v zimních měsících svou vysokou pórovitostí zamezil velkému úniku tepla do vzduchu. Úprava povrchu půdy trávou a mulčovací kůrou si byla podobná. Ve vrchní části profilu se neprojevovaly tolik rozdíly denních a nočních teplot. Dotace půdy teplem v letním období byly nižší a v zimním období přesun tepla byl také nižší. Závěrem se dá říci, že úprava povrchu půdy výrazně ovlivňuje vodní i tepelný režim půdy.

## 8. Seznam literatury

- Anonymous. 2007. ECH2O-TE/EC-TM Water Content, EC and Temperature Sensors Operator's Manual. Decagon Devices Inc. Pullman Press. Pullman. WA. USA.
- Antonopoulos, V. Z. 2006. Water Movement and Heat Transfer Simulations in a Soil under Ryegrass. *Biosystems Engineering*. 95:1. p. 127-138.
- Archiv společnosti Tepelná čerpadla IVT s.r.o.
- Beneš, M. 2011. Analýza procesů při ukládání tepla do zeminy. Juniorstav.
- Brady, N. C. 1990. The nature and properties of soils. Macmillan publishing company, New York. 10th. Ed. p. 621. ISBN 0-02-313361-9.
- Bristow, K. L. 2002. Thermal Conductivity. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 1209-1226. ISBN: 0-89118-841-X.
- Brooks, R. H., Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*. Colorado State University. Fort Collins, Colorado. p. 24.
- Čížek, P. Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody. [online]. XII. národní hydrogeologický kongres v Českých Budějovicích 19. - 22. září 2005. [cit. 2013-01-31]. Dostupné z <[http://www.geolog.cz/odborne\\_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm](http://www.geolog.cz/odborne_clanky/Cizek%20TC%20a%20voda.htm)>.
- Dahiya, R., Ingwersen, J., Streck, T. 2007. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling. *Soil & Tillage Research*. 96. p. 52-63.
- Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Tan, K.A. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. Rew.* 9. p. 184-193.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Jon Wiley and sons, New York, NY.
- Flint, A. L., Flint, L. E. 2002. Particle density. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 229-240. ISBN: 0-89118-841-X.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1990. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. *ANNEX V*. FAO Penman-Monteith Formula. Rome Italy.

- Gee, G.W., Or, D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 255–294. ISBN: 0-89118-841-X.
- Horton, R. 2002. Soil thermal diffusivity. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 1227-1232. ISBN: 0-89118-841-X.
- Chung, S.O., Horton, R. 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. In: Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th. (eds.). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. version 4.08. Department of Environmental Sciences University of California Riverside. Riverside, California. p. 71-73.
- ISO 10390:1994. International Organization of Standardization, Standard of Soil quality – Determination of pH.
- Karlík, R. 2009. Tepelné čerpadlo pro váš dům. Grada Publishing, a.s. Praha. s. 112. ISBN: 978-80-247-2720-2.
- Kleissl, J., Moreno, H., Hendrickx, J. M. H., Šimůnek, J. 2007. HYDRUS simulations of soil surface temperatures. proc. SPIE 6553, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XII. 65530W.
- Kluitenberg, G. J. 2002. Heat capacity and specific heat. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 1201-1208. ISBN: 0-89118-841-X.
- Kočárek, M. and Kodešová, R. 2012. Influence of temperature on soil water content measured by ECH2O-TE sensors. International Agrophysics. 26. p. 259-269.
- Kosugi, K., Hopmans, J. W., Dane, J. H. 2002. The soil solution phase. Water content. Parametric models. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 739-757. ISBN: 0-89118-841-X.
- Kutílek, M., Nielsen, D. R., 1994. Soil hydrology. Catena Verlag. Cremlingen – Destedt. Germany.
- Mikundová, P. 2008. Tepelná čerpadla – jedna z možností využití alternativních zdrojů energie k vytápění objektů v české republice. Juniorstav.

- Nassar, I. N., Horton, R. 2002. Coupled heat and water transfer. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 1249-1252. ISBN: 0-89118-841-X.
- Němeček, J., Mühlhanslová, M., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P. 2011. *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky*. ČZU Praha. Praha. s. 94.
- Odbor 03400. Tepelná čerpadla v roce 2010 [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 4. 5. 2011 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z <<http://www.mpo.cz/dokument87215.html>>.
- Palomares, M. T. 2008. *Thermal Comparison of Two Borehole Heat Exchangers*. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. p. 159.
- Parlange, M. B., Cahill, A. T., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., Wendroth, O. 1998. Review of heat and water movement in field soils. *Soil and Tillage Research*. 47. 1–2. p. 5–10.
- Pražská energetika, a. s. PRE fórum speciál - Tepelná čerpadla [online]. Studio FTG. 31. 7. 2002 [cit. 2012-09-03]. Dostupné z <<http://www.energetickyporadce.cz/data/sharedfiles/Dokumenty/PREforum/PREforum-special-tepelna-cerpadla.pdf>>.
- Reynolds W. D., Elrick, D. E., Youngs, E. G., Amoozegar, A., Bootink, H. W. G., Bouma, J. 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 797-878. ISBN: 0-89118-841-X.
- Rhoades, J. D. 1996. Salinity. Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, p. 417–435.
- Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed). *Seminář „Mikroklima porostů“*. Brno. 26. březen 2003. s. 172-186. ISBN 80-86690\_05-9.
- Rybach, L. 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*. 32. p. 463–470



- Saito, H., Šimůnek, J., Mohanty, B. P. 2006. Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone. *Vadose Zone J.* 5. p. 784–800
- Sauer, Thomas J. 2002. Heat flux density. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods.* Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 1233-1248. ISBN: 0-89118-841-X.
- Skjemstad, J.O., Baldock, J.A. 2008. Total and organic carbon. In: Carter, M.R., Gregorch, E.G. (Eds.). *Soil Sampling and Method of Analysis.* Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis Group. USA. p. 225–237.
- Soilmoisture Equipment Corp. 2008. Guelph Permeameter Model 2800K1. Operating instructions. Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara CA. p. 51.
- Starr, J. L., Paltineanu, I. C. 2002. The soil solution phase. Water content. Methods for measurement of soil water content. Capacitance devices. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods.* Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 463-474. ISBN: 0-89118-841-X.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. Th., 2012. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. version 4.15. Department of Environmental Sciences University of California Riverside. Riverside, California. p. 303.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.*, 7(2), 587-600.
- Topp G. C., Ferré, P. A. (Ty) 2002. The soil solution phase. Water content. General information. In: Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods.* Soil Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA. p. 417-419. ISBN: 0-89118-841-X.
- Twarakavi, N. K. C., Saito, H., Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. 2010. Inverse modeling of vadose zone flow processes using squared  $\epsilon$ -insensitivity loss fiction. *Journal of Hydrology and Hydromechanics.* 58. 3. p. 188–200.
- van Dam, J. C., Stricker, N. M., Droogers, P. 1990. From One-step to Multi-step: Determination of soil hydraulic functions by outflow experiment. Report (7) of dept. of hydrology, Soil physics and hydraulics of agriculture university in Wageningen.

- van Genuchten, M. Th. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44(5). p. 892-898.
- Zhang, Z.F.F., Groenevelt, P.H., Parkin, G.W. 1998. The well shape-factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph permeameter. *Soil Tillage Res.* 49. p. 219–221.
- Zhao, Y., Peth, S., Horn, R., Krümmelbein, J., Ketzer, B., Gao, Y., Doerner, J., Bernhofer, Ch., Peng, X. 2010. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. *Soil & Tillage Research*. 109. p. 75–86.

## 9. Seznam použitých zkratek a symbolů

$(e_a - e_d)$	sytostní doplněk	(kPa)
$ h $	absolutní hodnota tlakové výšky	(L)
$C_{ox}$	obsah oxidovatelného uhlíku	(%)
$C_p$	měrné teplo vlhkého vzduchu tj. 1,013	(kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
$C_w$	objemová tepelná kapacita vody	(ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
$ET_o$	referenční evapotranspirace	(mm.den <sup>-1</sup> )
$K_s$	nasycená hydraulická vodivost	(LT <sup>-1</sup> )
$R^2$	koeficient determinace	
$R_n$	radiace na povrchu hypotetického povrchu	(MJ m <sup>-2</sup> den <sup>-1</sup> )
$S_p$	potenciální rychlost extrakce	(LT <sup>-1</sup> )
$b_1, b_2, b_3$	empirické parametry	(MLT <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )
$d\theta/dh$	vodní kapacita $C(h)$	(L <sup>-1</sup> )
$e_a$	tlak nasycených vodních pár při teplotě T	(kPa)
$e_d$	skutečný tlak vodní páry	(kPa)
$q_T$	hustota tepelného toku	(MT <sup>-3</sup> )
$q_z$	hustota toku vody	(LT <sup>-1</sup> )
$r_a$	aerodynamický odpor	(s m <sup>-1</sup> )
$r_c$	odpor povrchové plodiny	(s m <sup>-1</sup> )
$t_m$	odpovídající teplota měřené půdní vlhkosti	(°C)
$t_{ref}$	referenční teplota 20 °C	
$\alpha_1$	převrácená hodnota vstupní hodnoty vzduchu	(L <sup>-1</sup> )
$\alpha_2$	půdní tepelná difuzivita	(L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> )
$\alpha_3$	parametr charakterizující půdní strukturu	
$\alpha_4$	parametr RČPV	(cm <sup>-1</sup> )
$\theta_e$	efektivní vlhkost půdy	(L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> )
$\theta_m$	měřená půdní vlhkost	(L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> )
$\theta_r$	reziduální vlhkost půdy	(L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> )
$\theta_s$	nasycená vlhkost půdy	(L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> )
$\lambda_0(\theta)$	tepelná vodivost neproudí-li voda	
$\rho_d$	objemová hmotnost	(g cm <sup>-3</sup> )
$\rho_w$	hustota vody	(g cm <sup>-3</sup> )
$\rho_z$	specifická hmotnost půdy	(g cm <sup>-3</sup> )
$\Delta$	sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu	(kPa °C <sup>-1</sup> )
DPHP	tepelně - pulzní dvoujehlový senzor	

$h$	tlaková výška	(L)
index $s, w$	označují pevnou část a vodu	
pH $H_2O$	aktivní pH	(-)
pH KCl	výměnné pH	(-)
RČPV	retenční čára půdní vlhkosti	
SH – 1	dvoujehlový senzor	
TR – 1	prodloužený jednojehlový senzor	
$A$	průřezová plocha zásobníku vody	(L)
$C^*$	bezrozměrný tvarový koeficient závisící na $H/r$	
$C$	objemová tepelná kapacita	( $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$ )
$G$	tok tepla v půdě	( $MJ\ m^{-2}den^{-1}$ )
$H^*$	aplikovaný tlak	(L)
$H$	celkový potenciál	(L)
$K$	hydraulická vodivost	( $LT^{-1}$ )
$K(h)$	nenasycená hydraulická vodivost	( $LT^{-1}$ )
$K(\theta)$	křivka hydraulických vodivostí	
$L$	parametr sklonu	(-)
$R$	ustálený pokles hladiny v zásobníku za časovou jednotku	
$S$	propadový člen	( $L^{-1}$ )
$T$	teplota	(K)
$a$	poloměr sondy	(L)
$n$	parametr RČPV	(-)
$n, m$	empirické tvarové koeficienty, vztah mezi parametrem $m$ a $n$ je: $m=1-1/n$	
$q$	tok vody	( $L^3T^{-1}$ )
$\rho$	tepelný odpor půdy	( $cm\ CW^{-1}$ )
$t$	čas	(T)
$w$	hmotnostní vlhkost	(-)
$z$	souřadnice	(L)
$\alpha(h)$	bezrozměrná funkce vyjadřující schopnost rostlin extrahovat vodu v závislosti na $h$	
$\gamma$	psychrometrická konstanta	( $kPa^\circ C^{-1}$ )
$\theta$	objemová vlhkost půdy	( $L^3L^{-3}$ )
$\lambda$	půdní tepelná vodivost	( $MLT^{-3}K^{-1}$ )
$\lambda^*$	výparné latentní teplo	( $MJ\ kg^{-1}$ )
$\rho$	hustota atmosféry	( $kg\ m^{-3}$ )
$\phi$	výsledná aproximace	

## 10. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Princip tepelného čerpadla .....	3
Obr. 2 Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch .....	4
Obr. 3 Tepelné čerpadlo vzduch – voda .....	5
Obr. 4 a, b Tepelná čerpadla voda – voda.....	6
Obr. 5 Tepelné čerpadlo země – voda – vertikální vrty .....	7
Obr. 6 Tepelné čerpadlo země – voda - horizontální výměník .....	8
Obr. 7 Možnosti uložení horizontálního tepelného výměníku.....	9
Obr. 8 Změna teploty za čas při měření tepelné vodivosti půdy.....	16
Obr. 9 Umístění kolektorů a pažnic .....	19
Obr. 10 Půdní profil na pozemku VESKOM.....	20
Obr. 11 Pažnice pro měření půdní vlhkosti (S1, 2, 3) .....	21
Obr. 12 Pažnice pro měření půdní vlhkosti (S4, 5) .....	21
Obr. 13 Schéma uložení senzorů ECH2O-TE .....	22
Obr. 14 Měření teplot a vlhkostí pod různými povrchy .....	22
Obr. 15 Měření infiltrace Guelphským permeametrem .....	24
Obr. 16 Maximální a minimální denní teplota, Obr. 17 Denní vlhkost .....	30
Obr. 18 Globální záření, Obr. 19 Rychlost větru .....	30
Obr. 20 Denní srážky .....	30
Obr. 21 Průměrná denní teplota půdy pod různými povrchy 2011-2012 .....	32
Obr. 22 Denní amplituda .....	33
Obr. 23 Průměrná denní vlhkost půdy pod různými povrchy 2011-2012.....	33
Obr. 24 Spočítaná evapotranspirace .....	33
Obr. 25 Nasycená hydraulická vodivost.....	35
Obr. 26 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou vodivost u sond z 10 cm.....	36
Obr. 27 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou vodivost u sond z 50 cm.....	35
Obr. 28 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou kapacitu u sond z 10 cm .....	36
Obr. 29 Vliv obj. vlhkosti na tepelnou kapacitu u sond z 50 cm .....	35
Obr. 30 Vliv obj. vlhkosti na tepelný odpor u sond 1-5 z 10 cm.....	37
Obr. 31 Vliv obj. vlhkosti na tepelný odpor u sond z 50 cm.....	35
Obr. 32 Vliv obj. vlhkosti na tep. difuzivitu u sond 1-5 z 10 cm.....	37
Obr. 33 Vliv obj. vlhkosti na tep. difuzivitu u sond z 50 cm.....	357
Obr. 34 Varianta 1 – objemová vlhkost za čas.....	39
Obr. 35 Varianta 2 – objemová vlhkost za čas.....	39
Obr. 36 Varianta 3 – objemová vlhkost za čas.....	39
Obr. 37 - 42 Objemová vlhkost v sondě 1 za čas .....	40

Obr. 43 - 48 Objemová vlhkost v sondě 2 za čas .....	41
Obr. 49 - 54 Objemová vlhkost v sondě 3 za čas .....	42
Obr. 55 - 60 Objemová vlhkost v sondě 4 za čas .....	43
Obr. 61 - 66 Objemová vlhkost v sondě 5 za čas .....	44
Obr. 67 Sonda 1 – objemová vlhkost za čas.....	49
Obr. 68 Sonda 3 – objemová vlhkost za čas.....	49
Obr. 69 Sonda 4 – objemová vlhkost za čas.....	49
Obr. 70 Kumulativní tok na povrchu profilu .....	50
Obr. 71 Kumulativní transpirace .....	50
Obr. 72 Kumulativní odtok dnem profilu.....	50
Obr. 73 - 76 Teplota půdy pod trávou v různých hloubkách.....	52
Obr. 77 - 80 Teplota půdy pod trávou v různých hloubkách.....	53
Obr. 81 - 84 Tepelné toky v půdním profilu pod trávou za čas.....	54
Obr. 85 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 24.6.2011 a 2012 .....	55
Obr. 86 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 10.9.2011 a 2012 .....	54
Obr. 87 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 24.6.2011 a 2012 .....	55
Obr. 88 Teplota půdy v půd. profilu pod travou 10.9.2011 a 2012 .....	54
Obr. 89 Vlhkost v 7 cm pod betonovou dlaždicí.....	50
Obr. 90 Vlhkost v 7 cm pod pískem.....	50
Obr. 91 Vlhkost v 7 cm pod mulčovací kůrou.....	50
Obr. 92 - 95 Teplota půdy pod pěti povrchy v různých hloubkách.....	58
Obr. 96 - 99 Teplota půdy pod pěti povrchy v různých hloubkách.....	59
Obr. 100 - 103 Tepelné toky v půdním profilu pod pěti povrchy za čas.....	60
Obr. 104 a 105 Teplota v půdním profilu 24.6. 2011 a 2012 pod různými povrchy .....	61
Obr. 106 a 107 Teplota v půdním profilu 10.9. 2011 a 2012 pod různými povrchy .....	61
Obr. 108 a 109 Teplota v půdním profilu 12.10. 2011 a 2012 pod různými povrchy.....	62
Obr. 110 a 111 Teplota v půdním profilu 6.2. a 5.3.2012 pod různými povrchy .....	62
Obr. 112 Změřené a simulované teploty v hloubce 20 a 180 cm .....	61
Obr. 113 Porovnání kumulativních toků vody a tepla na dně profilu .....	62
Obr. 114 Porovnání kumulativních toků vody a tepla na dně profilu pod pěti povrchy.....	62

Tab. 1 Tepelná vodivost materiálů.....	9
Tab. 2 Hodnoty parametrů zadaných retenčních čar půdní vlhkosti.....	29
Tab. 3 Hodnoty parametrů zadaných retenčních čar půdní vlhkosti různých povrchů.....	32
Tab. 4 Půdní vlastnosti.....	34
Tab. 5 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 1.....	45
Tab. 6 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 2.....	46
Tab. 7 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 3.....	46
Tab. 8 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 4.....	47
Tab. 9 Inverzní modelování – optimalizace parametrů 2 varianty pro sondu 5.....	48

## 11. Seznam příloh

Příloha 1 Tepelné vlastnosti vzorku S1.....	81
Příloha 2 Tepelné vlastnosti vzorku S2.....	81
Příloha 3 Tepelné vlastnosti vzorku S3.....	81
Příloha 4 Tepelné vlastnosti vzorku S4.....	82
Příloha 5 Tepelné vlastnosti vzorku S5.....	82
Příloha 6 Tepelné vlastnosti vzorku S20-40 cm.....	82
Příloha 7 Tepelné vlastnosti vzorku S1-3 I. 50 cm.....	83
Příloha 8 Tepelné vlastnosti vzorku S1-3 II. 50 cm.....	83
Příloha 9 Tepelné vlastnosti vzorku S5 50 cm.....	83

## 12. Přílohy

Příloha 1 Tepelné vlastnosti vzorku S1

Vzorek S1										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$	$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	C $MJm^{-3}K^{-1}$	$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$		$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$
1.krok	0	0,370	270,7	0,292	1,511	0,193	342,8	0	0,183	381,2
2.krok	0,095	0,563	177,9	0,481	1,800	0,268	208,0	0,1	0,327	162,3
3.krok	0,153	0,879	113,8	0,741	1,963	0,378	135,2	0,2	0,398	107,2
4.krok	0,218	1,368	73,2	1,004	2,265	0,445	97,7	0,3	0,444	80,4
5.krok	0,281	1,206	84,3	1,447	3,184	0,455	69,3	0,4	0,476	64,5
6.krok	0,348	1,387	72,2	1,397	3,005	0,466	72,2			
7.krok	0,406	1,305	76,8	1,420	3,133	0,452	71,8			

Příloha 2 Tepelné vlastnosti vzorku S2

Vzorek S2										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$	$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	C $MJm^{-3}K^{-1}$	$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$		$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$
1.krok	0	0,334	299,4	0,277	1,336	0,207	361,4	0	0,196	394,5
2.krok	0,069	0,546	183,2	0,431	1,531	0,285	233,1	0,1	0,359	154,3
3.krok	0,132	0,913	109,7	0,786	1,951	0,403	127,5	0,2	0,420	102,4
4.krok	0,201	1,305	76,7	1,105	2,503	0,444	90,6	0,3	0,455	77,3
5.krok	0,263	1,769	56,6	1,136	2,576	0,442	88,4	0,4	0,478	62,3
6.krok	0,337	1,684	59,4	1,441	3,104	0,464	70,0			
7.krok	0,364	1,721	58,1	1,437	3,094	0,465	69,9			

Příloha 3 Tepelné vlastnosti vzorku S3

Vzorek S3										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$	$\lambda$ $Wm^{-1}K^{-1}$	C $MJm^{-3}K^{-1}$	$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$		$\alpha_2$ $mm^{-2}s^{-1}$	rho $cm^{\circ}CW^{-1}$
1.krok	0	0,343	291,6	0,262	1,406	0,187	382,1	0	0,160	457,9
2.krok	0,075	0,579	172,9	0,428	1,631	0,265	233,8	0,1	0,362	148,5
3.krok	0,134	0,838	119,4	0,736	1,843	0,400	136,0	0,2	0,406	104,4
4.krok	0,208	1,242	80,6	1,153	2,676	0,431	86,8	0,3	0,425	82,4
5.krok	0,279	1,446	69,4	1,287	2,857	0,452	78,0	0,4	0,433	68,7
6.krok	0,348	1,443	69,4	1,343	3,187	0,421	74,5			
7.krok	0,385	1,466	68,2	1,271	3,066	0,414	79,4			



Příloha 4 Tepelné vlastnosti vzorku S4

Vzorek S4										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,351	285,3	0,287	1,435	0,200	348,9	0	0,190	387,7
2.krok	0,091	0,516	194,3	0,418	1,573	0,266	239,8	0,1	0,334	168,4
3.krok	0,143	0,843	118,9	0,714	1,874	0,381	140,5	0,2	0,394	115,2
4.krok	0,213	1,109	90,3	1,057	2,519	0,420	94,6	0,3	0,430	88,4
5.krok	0,284	1,323	75,6	1,145	2,506	0,457	87,7	0,4	0,455	71,9
6.krok	0,352	1,311	76,3	1,255	2,869	0,437	80,2			
7.krok	0,404	1,356	73,8	1,325	3,028	0,438	75,5			

Příloha 5 Tepelné vlastnosti vzorku S5

Vzorek S5										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,389	257,7	0,305	1,450	0,210	328,0	0	0,218	348,2
2.krok	0,126	0,572	175,0	0,491	1,718	0,286	203,8	0,1	0,321	180,2
3.krok	0,191	0,956	104,8	0,829	1,941	0,427	120,9	0,2	0,381	122,5
4.krok	0,257	1,261	79,3	1,070	2,481	0,431	93,5	0,3	0,422	92,9
5.krok	0,332	1,449	69,0	1,206	2,635	0,458	83,1	0,4	0,451	74,8
6.krok	0,402	1,440	69,5	1,358	3,104	0,438	73,7	0,5		62,7
7.krok	0,442	1,453	68,9	1,360	3,102	0,438	73,6			

Příloha 6 Tepelné vlastnosti vzorku S20-40 cm

Vzorek S20-40cm										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,347	286,8	0,271	1,387	0,196	369,2	0	0,171	417,2
2.krok	0,080	0,595	168,2	0,494	1,682	0,294	203,1	0,1	0,391	140,4
3.krok	0,136	0,984	101,7	0,831	1,852	0,449	120,5	0,2	0,457	97,7
4.krok	0,202	1,295	77,2	1,189	2,632	0,454	84,1	0,3	0,493	76,4
5.krok	0,275	1,466	68,2	1,263	2,364	0,537	80,8	0,4	0,514	63,3
6.krok	0,343	1,476	67,8	1,461	2,907	0,503	68,5			
7.krok	0,386	1,536	65,1	1,444	2,937	0,492	69,3			

Příloha 7 Tepelné vlastnosti vzorku S1-3 I. 50 cm

Vzorek S1-3 I. 50cm										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,323	310,0	0,252	1,385	0,182	398,1	0	0,128	527,4
2.krok	0,046	0,668	149,9	0,501	1,595	0,314	200,0	0,1	0,477	103,7
3.krok	0,113	1,053	95,0	1,021	2,129	0,480	98,0	0,2	0,524	74,5
4.krok	0,182	1,546	64,7	1,456	2,909	0,501	68,8	0,3	0,534	60,4
5.krok	0,253	1,748	57,2	1,638	2,853	0,574	61,2	0,4	0,532	51,7
6.krok	0,317	1,573	65,0	1,653	3,115	0,531	29,1			
7.krok	0,321	1,700	58,8	1,595	3,032	0,526	62,8			

Příloha 8 Tepelné vlastnosti vzorku S1-3 II. 50 cm

Vzorek S1-3 II. 50cm										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,339	295,1	0,264	1,432	0,184	379,1	0	0,174	411,7
2.krok	0,089	0,536	186,7	0,496	1,650	0,301	202,2	0,1	0,360	154,0
3.krok	0,147	0,949	105,4	0,832	1,985	0,421	120,3	0,2	0,439	102,9
4.krok	0,216	1,353	74,0	1,104	2,423	0,456	90,6	0,3	0,489	78,1
5.krok	0,284	1,502	66,6	1,283	2,557	0,502	78,3	0,4	0,523	63,2
6.krok	0,347	1,342	75,1	1,431	2,700	0,520	71,3			
7.krok	0,392	1,527	65,5	1,488	3,045	0,489	67,3			

Příloha 9 Tepelné vlastnosti vzorku S5 50 cm

Vzorek S5 50cm										
	$\theta$	TR-1 průměr		SH-1 průměr				$\theta$	Spočítané pro SH-1	
		$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>	$\lambda$ Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	C MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>		$\alpha_2$ mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	rho cm <sup>o</sup> CW <sup>-1</sup>
1.krok	0	0,343	283,1	0,272	1,431	0,190	367,9	0	0,177	393,9
2.krok	0,067	0,614	163,0	0,496	1,682	0,296	201,5	0,1	0,368	149,6
3.krok	0,152	0,908	110,4	0,804	1,959	0,411	124,4	0,2	0,441	103,5
4.krok	0,219	1,213	82,5	1,156	2,430	0,476	86,8	0,3	0,484	80,4
5.krok	0,284	1,344	74,4	1,181	2,416	0,489	85,1	0,4	0,513	66,1
6.krok	0,355	1,421	70,4	1,391	2,805	0,496	71,9			
7.krok	0,371	1,430	70,0	1,396	2,813	0,497	71,7			