VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

ZÁVLAHA VYČIŠTĚNÝMI ODPADNÍMI VODAMI
TREATED WASTE WATER IRRIGATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Rafael Kohut**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVIŠTĚ	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	**Bc. Rafael Kohut**
NÁZEV	**Závlaha vyčištěnými odpadními vodami**
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Michal Kriška, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKANÁT -29-

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1) Legislativa v oblasti vypouštění čištěných odpadních vod do podloží
2) Legislativa a normové podklady k řešení závlahy
3) Vědecké články z databáze sciencedirect.com
4) Diplomové práce ústavu VHK, věnující se simulacím a modelování v Hydrus 2D

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Práce se bude věnovat sestavení filtračních kolon, umístěných ve vybraném areálu kořenové čistírny odpadních vod. V rámci filtračních kolon bude sestavena a spuštěna automatická závlaha. Úkolem bude zpracovávání pravidelných odběrů filtrátů po průtoku půdními horizonty. Prováděny budou rozbory a analýzy vody, výsledky následně použity pro kalibraci simulačního numerického modelu Hydrus 2D. Hlavním cílem a výstupem práce bude nakalibrovaný model a návrh obecného řešení, jak postupovat při realizacích závlahových detailů v případě využití znečištěné vody pro účely závlahy.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Michal Kriška, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou modelování závlahy vyčištěnou odpadní vodou pomocí softwaru HYDRUS 2D. Úvodní část práce je teoretickou rešerší odborných informací a poznatků, které mají za cíl seznámit s problematikou využití vyčištěných odpadních vod pro účely závlahy. Dalším bodem je poskytnutí teoretických základních informací ohledně numerického modelování pohybu a transportu rozpuštěných látek v půdě. Poslední kapitola teoretické části popisuje kalibraci modelu v softwaru HYDRUS 2D.Druhá část je věnována sestavení filtračních kolon, umístěných ve vybraném areálu kořenové čistírny odpadních vod. V rámci filtračních kolon byla sestavena a spuštěna automatická závlaha. Po dobu 81 dnů probíhalo měření vlhkosti ve filtračních kolonách a byly odebírány vzorky vody po průtoku půdními horizonty. Na základě výsledku měření byla provedena kalibrace simulačního numerického modelu v softwaru HYDRUS 2D. V poslední části práce byly provedeny aplikace rozšířením a změnou modelovaného prostředí. Hlavním cílem a výstupem práce je kalibrace modelu a návrh obecného řešení, jak postupovat při realizacích závlahových detailů v případě využití vyčištěné odpadní vody pro účely závlahy.

KLÍČOVÁ SLOVA

závlaha, vyčištěná odpadní voda, hydraulické charakteristiky půdy, spodní voda, kalibrace numerického modelu, HYDRUS 2D, NH_4^+-N

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of simulation of treated wastewater irrigation by the HYDRUS 2D software. The first part of the thesis is designed as a theoretical research of academic information and knowledge. It aims at introducing the issue of treated wastewater utilization for the purpose of the irrigation. Furthermore it provides basic theoretical information on numeric simulation of the dissolved materials motion and transport in the soil. The last chapter of the theoretical part describes the calibration of the simulation by the HYDRUS 2D software. The second part of the thesis is devoted to the formation of filtration columns placed in the chosen site of the root zone wastewater plant. Within the filtration columns the automatic irrigation was formed and set off. Measuring of humidity in filtration columns was taking place for 81 days as well as the water sampling after the flow through the soil horizons. On the grounds of the measuring results the calibration of numeric simulation was carried out by the HYDRUS 2D software. The last part of the thesis presents the applications through the extending and alternation of the modelled setting. The main aim of the thesis is to calibrate the model and propose a general solution to advancement at realization of irrigation details when using the treated wastewater for the purpose of irrigation.

KEY WORDS

irrigation, treated wastewater, soil hydraulic characteritics, groundwater, calibration of numerical model, HYDRUS 2D, NH_4^+-N

Bibliografická citace VŠKP:

KOHUT, R.: Závlaha vyčištěnými odpadními vodami. Brno, 2017. 125 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13.1.2017

.....

podpis autora

Rafael Kohut

Poděkování:

Děkuji touto cestou panu Ing. Michalovi Kriškovi, Ph.D. za trpělivost a ochotu vždy pomoci.

Výzkumná část a stejně samotný návrh technického řešení je podpořen projektem FAST-S-15-2850 s názvem Vliv vsakujících vod na kvalitu podzemních vod.

OBSAH

1 ÚVOD 12

2 POTENCIÁL ODPADNÍ VODY 14

3 VÝHODY A RIZIKA VYUŽITÍ VYČIŠTĚNÉ ODPADNÍ VODY PRO ZÁVLAHU 16

4 ZÁVLAHA V ČESKÉ REPUBLICE 20

4.1 LEGISLATIVA 21

4.1.1 ODPADNÍ VODA JAKO ZÁVLAHOVÁ VODA 22

5 HYDROPEDOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY PŮD 25

5.1 ZRNITOST 25

5.2 PÓROVITOST 25

5.3 OBJEMOVÁ VLHKOST 25

5.4 RETENČNÍ ČÁRA PŮDNÍ VLHKOSTI 26

5.5 ANALYTICKÉ FUNKCE PRO VYJÁDŘENÍ HYDRAULICKÝCH CHARAKTERISTIK PŮDY 27

5.6 HYDRAULICKÁ VODIVOST 28

6 MAPOVÉ A JINÉ PODKLADY SOUVISEJÍCÍ Z DANOU PROBLEMATIKOU 30

6.1 DATA POTŘEBNÁ PRO STANOVENÍ BILANČNÍ ROVNICE URČITÉHO POVODÍ 30

6.2 MAPOVÉ PODKLADY 32

7 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ 40

7.1 HYDRUS 40

7.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ 41

7.2.1 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ 41

7.2.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ 41

7.3 HYDRAULIKA PROUDĚNÍ VODY V PORÉZNÍM PROSTŘEDÍ 42

7.3.1 ZÁKON ZACHOVÁNÍ HMOTNOSTI 42

7.3.2 ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI 43

7.3.3 STAVOVÉ ROVNICE 43

7.3.4 NASYCENÁ ZÓNA 43

7.3.5 NENASYCENÁ ZÓNA 44
7.3.6 OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY 45
7.4 TRANSPORTNÍ PROCESY ROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK 46
7.4.1 POHYB ROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK 46
7.4.2 REAKČNÍ PROCESY ROZPUŠTĚNÝCH LÁTEK 47
8 PRAKTICKÁ ČÁST 49
8.1 EMISNÍ STANDARDY UKAZATELŮ PŘÍPUSTNÉHO ZNEČIŠTĚNÍ MĚSTSKÝCH ODPADNÍCH VOD DLE NAŘÍZENÍ VLÁDY Č. 401/2015 SB. 51
9 METODIKA MĚŘENÍ 53
9.1 FILTRAČNÍ KOLONY 53
9.2 ODBĚR VODY PRO KALIBRACI 55
9.3 SLEDOVANÉ PARAMETRY (VSTUPNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKA) 57
9.3.1 AMONIAKÁLNÍ DUSÍK 57
9.3.2 PŮDNÍ VLHKOST 58
9.3.3 MNOŽSTVÍ ZÁVLAHOVÉ VODY 58
9.3.4 SRÁŽKY 59
9.3.5 EVAPOTRANSPIRACE 59
10 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ V SOFTWARU HYDRUS 2D/3D 61
10.1 DEFINICE CÍLŮ 61
10.2 VSTUPNÍ DATA 61
10.2.1 OBJEMOVÁ VLHKOST PŮDY 61
10.2.2 KONCENTRACE NH_4^+-N 63
10.2.3 ATMOSFÉRICKÉ SRÁŽKY 65
10.2.4 ZÁVLAHA 66
10.2.5 CELKOVÉ MNOŽSTVÍ VODY 67
10.2.6 EVAPOTRANSPIRACE 68
10.3 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY 69
10.4 TVORBA MODELU 69
10.4.1 GEOMETRIE MODELU 69
10.4.2 VÝBĚR SIMULAČNÍCH PROCESŮ 69

10.4.3 Časově proměnné okrajové podmínky 70
10.4.4 Data pro inverzní řešení 70
10.4.5 Časové charakteristiky 70
10.4.6 Modelování půdního prostředí 70
10.4.7 Výběr hydraulického modelu 70
10.4.8 Transport rozpuštěných látek 71
10.4.9 Počáteční podmínky 72
10.4.10 Okrajové podmínky 74
10.5 Kalibrace modelu 75
10.6 Výsledky kalibrace 76
10.7 Výstupy z HYDRUSU 77
10.7.1 Písek 77
10.7.2 Hlína 79
10.7.3 Hlinitý písek I 82
10.7.4 Hlinitý písek II 84
11 APLIKACE VÝSLEDKU 88
11.1 Varianta 1 90
11.2 Varianta 2 92
11.3 Varianta 3 95
11.4 Porovnávání variant 97
11.5 Odtok do hlubokých vrstev 102
11.6 Množství dusičnanů z vyčištěné odpadní vody 105
11.7 Návrh na postup pro stanovení přibližné maximální závlahové dávky 107
12 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU 110
13 ZÁVĚR 111

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 113

SEZNAM OBRÁZKŮ 119

SEZNAM TABULEK 120

SEZNAM GRAFŮ 122

1 ÚVOD

Přestože vodní plocha pokrývá přibližně 70 % zemské kůry, je jen malá část vody kompatibilní s pozemními formami života (Shiklomanov, 1993). Malá část sladké vody, tj. vody s nízkou koncentrací soli, je především ve formě ledu a věčného sněhu uložena na povrchu Antarktidy a v arktických oblastech (68,7%) (Shiklomanov, 1993). Jedním z prvních důvodů pro pozorování nedostatku vody pro lidskou spotřebu z řek a potoků, rybníků, nádrží a volné podzemní vody, je nerovnoměrné rozložení po celém světě. V důsledku toho 40 % z celkové rozlohy země je suché a zahrnuje klimatická pásma klasifikovaná jako vyprahlé, polosuché a suché oblasti (FAO, 2008). Současně je důsledkem demografického růstu pozorovatelná rostoucí potřeba vodních zdrojů pro hospodářský rozvoj a zlepšení životní úrovně (FAO, 2012). Odhaduje se, že alespoň v některých oblastech světa roste spotřeba vody více než dvakrát rychleji, než je růst lidské populace. Příkladem může být roční spotřeba vody, resp. její 6,3 násobné zvýšení, vycházející z méně než 600 $km^3.rok^{-1}$ na počátku dvacátého století a více než 3800 $km^3.rok^{-1}$ na začátku jednadvacátého století. Z této hodnoty jen zavlažovací systémy spotřebovávají až 70 % dostupné vody (FAO, 2013). Použití sladké vody bylo dlouhodobě vyšší, než minimální hodnota dotace, což vede logicky k vysychání vodních toků a vyčerpání podzemních vod (UNDP, 2006). Nedostatek vody a sucha se objevují jako hlavní problémy po celém světě, a to nejen v suchých zemích, ale také v oblastech světa, kde se vyskytují četné zdroje sladkých vod (Bixio et al., 2006, EU, 2007 a FAO, 2012). Například polovina evropských zemí čelí nedostatku vody (Bixio et al., 2006), nedostatek vody je pozorován v celé Evropě (EU, 2007). Odhaduje se, že více než 40 % světové populace bude čelit nedostatku vody během příštích 50 let (WHO, 2006a).

Z výše popsaných důvodu představuje v této souvislosti opětovné použití čištěných odpadních vod správnou volbu (Niemczynowicz, 1999 a WHO, 2006a). Kromě omezení používání a odběrů sladkých vod přispěje opětovné použití odpadní vody také ke snížení množství vypouštěných odpadních vod do sladkovodních ekosystémů (Bixio et al., 2006 a Tozé, 2006). Zavlažování čištěnými odpadními vodami je již realizováno zejména pro zemědělství a krajinářství v zemích, jako je Francie, Itálie, Španělsko, Kypr, Malta, Izrael, Jordánsko nebo USA (Aquarec Project, 2006, Kalavrouziotis a kol., 2013, Ndour et al., 2008 a Pedrero et al., 2010). Nicméně, i přes výše uvedené výhody zahrnuje opětovné použití odpadních vod i zdravotní a environmentální rizika.

Závlahou odpadními vodami se na Ústavu vodního hospodářství věnoval v minulosti prof. Ing. Jan Šálek, CSc., dlouholeté odmlčení ústavu od tohoto tématu se ale začíná z pohledu budoucího uplatnění jevit jako velice aktuální. Je potřeba přihlédnout k výkyvům počasí v posledních

několika letech, k prognózám očekávaných delších období sucha, srážkové deficity spojené se snižováním úrovně hladiny podzemní vody, apod. Často opomíjeným zdrojem vody, kterou by bylo možné zlepšit hydrologickou bilanci (zlepšení mikroklimatu prostřednictvím evapotranspirace rostlin, nadlepšení podzemní vody, zadržení vody v krajině), zůstává předčištěná nebo vícestupňovým čistírenským zařízením vyčištěná odpadní voda.

Podle současné legislativy České republiky (novela zákona o vodách č. 273/2010 Sb. a nařízení vlády č. 416/2010 Sb.) je infiltrace vyčištěných odpadních vod do podloží možná za dodržení specifických podmínek. Vypouštění vyčištěných vod infiltrací do podzemní vychází ze znalosti čisticích procesů v půdním prostředí a z vyloučení rizik, které by mohly vést ke kontaminaci podzemních vod. Zodpovědný návrh detailního řešení vypouštěcího objektu a provozování vsakování vyžaduje kvalifikovanou znalost fyzikálních a biochemických procesů v kombinaci se znalostí hydraulických a pedologických vlastností půdního prostředí. Nutné je také povědomí o očekávaném množství a složení odpadních vod určených k infiltraci.

2 POTENCIÁL ODPADNÍ VODY

Vyčištěná odpadní voda v sobě nese veliký potenciál. Tento potenciál se dá rozdělit na dvě hlavní složky, a to samotnou vodu a cenné složky pro půdu, kterými jsou především fosfor, dusík, celkový organický uhlík a bakterie.

Recyklace odpadní vody je pro státy jako Izrael, Čína, Mexiko apod., jediná možnost pro zachování udržitelného rozvoje a dostatku potravin. Pro Českou republiku lze hodnotu maximální teoreticky možné recyklované vody spočítat na základě celkového množství vyčištěné odpadní vody. V roce 2005 činila vyčištěná odpadní voda vypuštěna do recipientu přibližně 514 mil.m^3. Podle hodnot, které uvádí norma ČSN 75 0434 Potřeba vody pro doplňkovou závlahu lze snadno spočítat, jak velkou plochu by bylo možné zavlažovat s vyčištěnými 500 mil.m^3.rok^{-1}. Například potřeba vody pro závlahu brambor je kolem 2000 m^3.ha^{-1}, kdyby se teoreticky všechna vyčištěná odpadní voda použila pro závlahu brambor mohly by být takto pěstovány na ploše 250 tis.ha , což představuje zhruba 8% z celkového množství momentálně zemědělsky obhospodařované plochy v ČR (old.pglbc.cz) (czso.cz).

Potenciál fosforu obsaženého ve vyčištěné odpadní vodě lze taktéž jednoduše spočítat, a to proto, že známe limity koncentrace fosforu na odtoku s ČOV. Pro zjednodušení předpokládejme, že hodnota celkového fosforu na odtoku z ČOV je celoročně v ČR 4 mg.l^{-1}. To by znamenalo, že v 514 mil.m^3 vypuštěné vody z ČOV v roce 2005, je obsaženo přibližně 2050 tun celkového fosforu. Při zachování stejné dávky fosforu přibližně 50kg.ha^{-1}, která se v současnosti během hnojení aplikuje, by zmíněných 2050 tun stačilo na hnojení půdy o rozloze přibližně 41 tisíc ha.

V současnosti se pro hnojení používá z 15 % tradiční hnůj a zbytek je obstarán průmyslovými hnojivy. Fosfor je do průmyslových hnojiv dodáván z horniny fosfátů, která se těží v mnoha státech světa. Zásoby veškerého fosfátů na Zemi se při dnešní spotřebě odhaduje přibližně na sto let, tedy otázkou jeho nahrazení se budou muset zabývat až příští generace. Je ale potřeba mít na paměti, že momentální příznivá cena fosfátů je způsobena poměrně lehce dostupnými ložisky této suroviny. Při dnešní ceně fosforu přibližně 200 dolarů za tunu je hodnota fosforu obsaženého v 500 mil.m3 vyčištěné odpadní vody, tedy 2050 tun je přibližně 10,5 mil.Kč. Na základě této kalkulace se dá předpokládat, že fosfor obsažený ve vyčištěné odpadní vodě nebude tou hlavní motivací pro recyklaci této vody (uroda.cz) (zsch.cz) (cts.cuni.cz).

V ČR zatím není situace taková, aby náklady spojené s přechodem na systém využití vyčištěné odpadní vody byly obhajitelné, a to z důvodu chybějící akutní potřeby. Problémem je nejen technická stránka, ale také názor široké veřejnosti na znovu využívání vyčištěné vody. Přesto

existují oblasti, kde je tato problematika nejen zajímavá, ale z hlediska možného zavedení i reálná.

Tabulka 1: Přehled možného použití vyčištěných odpadních vod v podmínkách ČR (Šrámková, 2010)

Urbanizovaná území	• Zalévání parků, hřišť, mytí ulic a dvorů, zalévání golfových hřišť, hřbitovů a zelených pásů v rezidenčních čtvrtích • Požární ochrana, použití vody pro mimořádné případy • Stavební práce apod.
Zemědělství	• Závlahy plodin pro krmení hospodářských zvířat, pastvin, květin, plodin pro průmyslové využití (výroba biopaliv apod.) • Závlahy plodin pro humánní výživu (ve zvláštním režimu)
Rekreační aktivity	• Doplňování vody v jezerech a rybnících s rekreačním využitím (převážně tzv. nekontaktní aktivity) • Výroba ledu a sněhu pro rekreační využití
Zkvalitňování životního prostředí	• Tvorba umělých mokřadů • Nadlepšování hydraulických poměrů v přirozených mokřadech • Zlepšování průtoků v povrchových tocích, zejména v letním období
Doplňování zdrojů podzemních vod	• Hydraulické bariery proti znečištění aquiferu • Doplňování kapacity zdroje podzemní vody, ochrana před poklesem hladiny • Obnovení látkových bilancí minerálních složek ve vyčištěné odpadní vodě
Průmyslové využití	• Procesní voda • Voda do chladicích systémů • Úprava kotelních napájecích vod • Sociální zařízení a průmyslové prádelny • Oplachové vody • Klimatizace a požární ochrana objektů
Použití v rezidenčních objektech	• Čištění objektů • Prádelny • Splachování toalet • Klimatizace a požární ochrana objektů
Zásobování pitnou vodou	• Směšování se zdroji městské pitné vody

3 VÝHODY A RIZIKA VYUŽITÍ VYČIŠTĚNÉ ODPADNÍ VODY PRO ZÁVLAHU

Tato kapitola je nesmírně složitá a rozsahově náročná pro úplné zhodnocení. Proto je zde zmíněno jenom několik vybraných faktických poznatků. Zájemci o rozsáhlejší a ucelenější informace na toto téma by mohli ocenit doporučení těchto publikací:

- Beneficial and negative impacts on soil by the reuse of treated/untreated municipal wastewater for agricultural irrigation – a review of the current knowledge and future perspectives
- Irrigation of treated wastewater in braunschweig, Germany: an option to remove pharmaceuticals and musk fragrances
- Wastewater use in agriculture: review of impacts and methodological issues in valuing impacts
- Kritéria využití městských odpadních vod k závlaze zemědělských plodin

Tabulka 2: Koncentrace [µg.l^{-1}] xenobiotik na přítoku a odtoku z ČOV, a ve studnách v oblasti 40-leté závlahy se stanovenou 95% spolehlivostí odběrů vzorků. LOQ je nezměřitelná koncentrace (sciencedirect.com).

	Influent	effluent	Removal	well 1	Well 2
Antibiotics					
Trimethoprim	1.1±0.26	0.34±0.08	69	< LOQ	< LOQ
Sulfamethoxazole	0.82±0.23	0.62±0.09	24	**0.11±0.07**	< LOQ
Clarithromycin	0.46±0.10	0.21±0.04	54	< LOQ	< LOQ
Erythromycin	0.83±0.27	0.62±0.44	25	< LOQ	< LOQ
Roxithromycin	0.81±0.42	0.54±0.07	33	< LOQ	< LOQ
Antiepileptic					
Carbamazepine	2.0±1.3	2.1±0.7	**0**	**0.57±0.14**	**(0.030; 0.035)**
Antiphlogistics					
Ibuprofen	3.4±1.7	0.13±0.06	96	< LOQ	< LOQ
Diclofenac	2.0±1.5	1.3±0.9	33	< LOQ	< LOQ
Lipid regulators					
Clofibric acid	0.25±0.09	0.12±0.04	52	< LOQ	< LOQ
Fenofibric acid	--	0.13±0.07		< LOQ	< LOQ
Bezafibrate	4.9±4.1	0.13±0.07	97	< LOQ	< LOQ
Betablockers					
Atenolol	2.3±2.0	0.36±0.02	84	< LOQ	< LOQ
Sotalol	2.5±1.3	1.3±0.2	48	< LOQ	< LOQ
Celiprolol	0.44±0.34	0.28±0.02	36	< LOQ	< LOQ
Propranolol	0.51±0.35	0.18±0.02	65	< LOQ	< LOQ
Metoprolol	4.9±3.4	1.7±0.07	65	< LOQ	< LOQ
Musk fragrances					
AHTN (Tonalide)	0.33±0.20	0.10±0.05	70	< LOQ	< LOQ
HHCB (Galaxolide)	1.3±0.7	0.73±0.24	44	< LOQ	< LOQ
Contrast media					
Diatrizoate	3.3±1.8	3.3±1.7	**0**	**5.7±1.8**	**5.1±2.5**
Iopromide	18±6	3.0±1.7	83	< LOQ	< LOQ
Iomeprol	10±4	1.1±0.9	89	< LOQ	< LOQ
Iohexol	9.0±2.0	1.0±0.3	89	< LOQ	< LOQ
Iopamidol	2.3±1.6	1.9±0.5	**17**	**(0.011; 0.012)**	< LOQ
Caffeine	82±36	0.22±0.06	99.7	< LOQ	< LOQ

Tabulka 3: Doba přežití některých patogenů v půdě a plodinách zavlažované vyčištěnou odpadní vodou (intechopen.com).

Pathogen	Survival time (days)	
	Soil	Crops
Ascaris lumbricoides eggs	180	30
Salmonella spp.	80	25
Fecal coliforms	<70, but usually <20	<30, but usually <15
Vibrio cholera	<20, but usually <10	<5, but usually <2
Entamoeba histolytica	<20	<10
Trichuris trichiura eggs	>180	<60, but usually <30
Taenia saginata eggs	>180	<60, but usually <30
Enterovirus	<40	<20

Tabulka 4: Procesy v půdě, které zlepšují kvalitu odpadních vod, vzhledem k vybraným parametrům (intechopen.com).

Variable	Effect
Organic matter	Biodegradable material is reduced by more than 90%, while less readily biodegradable material is adsorbed and later biodegraded or volatilized.
Nitrogen	Nitrogen is removed from water at a level similar to tertiary treatment systems by transformation in soil as well as by assimilation by soil microorganisms and plants.
Phosphorus	Phosphorous is reduced to levels of 1 mg/L or less by assimilation by plants.
Microorganisms	Helminth eggs and protozoa are easily removed by straining in the soil surface; bacteria and viruses can also be adsorbed onto the soil particles and then desiccated or killed by indigenous soil microorganisms. The performance of these processes depends on the texture, physical structure and organic matter content of soil.
Heavy Metals	Heavy metals can be removed by the formation of complexes with soil organic matter, precipitation or methylation at efficiencies of 70–95%.
Toxic organic compounds	Most are retained in soil and then biodegraded at different rates.

Tabulka 5: Shrnutí negativních vlivů na půdní organismy v důsledku výskytu znečišťujících látek ve stopových koncentracích, u kterých se objevují obavy (intechopen.com).

Compound	Effect in soil organisms
Estrone, 17β estradiol (hormones)	Negative impacts on the vegetative cycle of alfalfa (*Medicago sativa*).
Sex hormones	Shift in sex ratio of free life nematode communities in soil.
Triclosan (antibacterial agent)	Inhibition in plant growth (rice and cucumber). Effect concentrations 50 (EC50, i.e. 50% of exposed population was affected) were 57 and 108 mg/kg for rice and cucumber respectively. Inhibition of soil respiration and phosphatase activity at concentration levels higher than 10 mg/kg.
	Reduction in soil respiration 4 days after supplying the compound. The observed effects were dependent on the adsorption of the compound onto the soil.
Bisphenol A (plasticizer)	Shift in sex ratio to female individuals in isopod (soil arthropod) communities.
Abamectin (anthelminthic)	Negative impacts on reproduction of *Folsomia fimetaria* and *Folsomia candida* (soil arthropods) at concentrations of 0.25 and 0.5 mg/kg of soil (dry mass), respectively. Negative impacts on reproduction of soil earthworms at concentration levels of 0.06 mg/kg of soil (dry mass).
Fenbendazole and cypermethrin (antiparasitic)	Negative impacts on degrading microorganisms of dung.
Sulfonamide and tetracycline antibiotics	Inhibition of the soil microbial activity by 10% (ED10) at concentrations of 0.003–7.35 μg/g of soil (dry mass). Shifts in fungi:bacteria ratio.
Sulfadiazine (antibiotic)	Decrease in denitrification rates when the input of antibiotic was 100 mg/kg of soil (dry mass).
	Significant decrease in the bacteria:fungi ratio
Chlortetracycline, tetracycline, tylosin, sulfamethoxazole, sulfamethazine and trimethoprim (antibiotics)	Decrease in crop growth (sweet oat, rice and cucumber). Inhibition of the microbial activity of soil (soil respiration and phosphatase enzyme activity).
Human and veterinary pharmaceutically active substances	Decrease in growth and development of *Phaseolus vulgaris L., Glycine max, Medicago sativa, Zea mays,* and several other crops.

Tabulka 6: Srovnání výnosů plodin, kde se využívá pro závlahu nevyčištěná odpadní voda a spodní voda (intechopen.com).

Crop	Crop yield (tons/ha)		Increment (%)
	Untreated wastewater	Groundwater	
Corn	5.0	2.0	150
Barley	4.0	2.0	100
Tomato	35.0	18.0	94
Oats for forage	22.0	12.0	83
Alfalfa	120.0	70.0	71
Chili	12.0	7.0	70
Wheat	3.0	1.8	67

Obrázek 1: Srovnání dvou zemědělských polí ve stejné lokalitě v centrálním Mexiku, kde na levém obrázku se závlaha nepoužívá a na pravém se zavlažuje nevyčištěnou odpadní vodou (intechopen.com).

Podle závěru jedné rozsáhle studie, která byla provedena v Německu, je zřejmé, že:

- U více než 80% sledovaných xenobiotik došlo v půdě k degradaci nebo adsorpci
- Ze sledovaných 52 látek byly v kontrolních studních měřitelné pouze 4 látky
- Půda, kde probíhalo měření má vysokou účinnost k odstranění sledovaných xenobiotik, přestože má vrstvu ornice pouze 0,55m a hlouběji je písek zrnitosti jemné (125-250µm) a střední (0,25-0,5mm)
- Studie signalizuje, že xenobiotika jsou odstraněny hlavně při přechodu přes ornici
- Tvorbu toxických transformačních produktů nelze nikdy vyloučit a musí být ověřena další studií
- Studie uznává, že může dojít ke kontaminaci spodních vod některými farmaceutikami (carbamazepine a sulfamethoxazole) (*sciencedirect.com*).

4 ZÁVLAHA V ČESKÉ REPUBLICE

V České republice se využívají závlahové systémy pouze na celkové rozloze 0,6 % orné půdy. Tato informace vyplývá z výsledků strukturálního šetření zemědělství „Agrocenzus 2010“, které představil na výstavě Země živitelka Český statistický úřad (dále jen ČSÚ).

V porovnání s předchozími údaji z roku 2005 se podle ČSÚ zavlažovaná plocha mírně zvýšila ze 17 113 ha na 19 196 ha (o 12,2%). Počet stabilních zavlažovacích zařízení se zvýšil z 573 na 669 zařízení (o 16,7%), naopak počet pojízdných a přenosných zařízení klesl o více než polovinu, z původních 2 794 zařízení na 1 336 zařízení.

Celková odhadovaná spotřeba vody na zavlažování plodin v České republice od října 2009 do září 2010 činila podle ČSÚ 11,1 milionu kubíků.

Nejvíce jsou přitom uměle zavlažované plochy zeleniny a jahod (49,8%), chmelnic a zahrad (22,7%), ovocných sadů (12,3%), brambor (11,1%), vinic (2,2%) a cukrovky (1,9%) (czso.cz).

Závlaha v oblasti povodí řeky Dyje

Podle podkladů ČSÚ dosahují všechny zavlažované plochy v dílčím povodí Dyje plošné výměry 6 352 ha. Uvedená výměra je průměrná zavlažovaná plocha, na které se skutečně prováděla závlaha v letech 2008–2010. Šetření ČSÚ dále vyčísluje i takzvaně zavlažovatelnou půdu, což je plocha v dosahu závlahového zařízení. V dílčím povodí Dyje bylo k roku 2010 10 400 ha zavlažovatelných pozemků, což je necelé 1 % plochy celého dílčího povodí.

Z archivní evidence závlahových staveb bývalé ZVHS z roku 1993 vyplývá, že všechny evidované zavlažovatelné plochy dosahovaly výměry 60 409 ha, to je 5,4 % plochy povodí. Porovnáním uvedené plochy závlah k r. 1993 s údaji ČSÚ o rozsahu zemědělských závlah k r. 2010 je možné zjistit, že plocha pozemků pod závlahou se zmenšila na cca 17 % původní výměry. Z tohoto podstatně menšího čísla se pak zavlažování skutečně provozuje jen asi na 60% této plochy.

Z údajů vodohospodářské bilance vyplývá, že pro účely závlah byly v referenčním roce 2012 nárokovány odběry vody pro 30 uživatelů z oblasti zemědělství v úhrnné výši 1 836 tis. $m^3.rok^{-1}$. Je tedy možné konstatovat, že rozsah funkčních závlah v povodí Dyje je jen zlomkem jejich evidovaného rozsahu. Z uvedených 30 uživatelů bylo 24 odběratelů povrchové vody (1771,5 tis. $m^3.rok^{-1}$) a 6 odběratelů podzemní vody (64,5 tis. $m^3.rok^{-1}$) (pmo.cz).

Potřeba závlah do budoucna

Z důvodu predikované klimatické změny se má také pomalu měnit podnebí v České republice, a projevovat zvýšením jeho suchosti. Z těchto důvodů byla zpracována následující prognóza potřeby rozšíření závlah do roku 2030. Prognóza počítá se dvěma alternativami. V první alternativě se předpokládá zvýšení závlahových ploch o 40 000 ha orné půdy a s tím také související potřebný akumulační objem, který je odhadován na 57 mil. m^3. V druhé alternativě by bylo potřeba zvýšit plochu závlah na 1 085 000 ha, to by zahrnovalo 31% momentální celkové obhospodařované zemědělské půdy. Potřebný akumulační prostor se pro druhou alternativu odhaduje na 1 750 mil. m^3 vody. Výsledky v této studií signalizují, že změna klimatu je závažná a vyžaduje zvýšenou pozornost i v České republice. Jedním ze zásadních výsledků je doporučení pravidelně zvyšovat plochu závlah a kapacitu potřebných vodních zdrojů (cbks.cz).

4.1 Legislativa

Plánované opětovné využívání vyčištěných odpadních vod bylo stanoveno jako priorita v několika nedávných publikacích na úrovni Evropské komise. V roce 2015 byl zahájen vývoj minimálních požadavků na kvalitu vyčištěných odpadních vod pro dva druhy využívání: zemědělské závlahy a obnovování kapacit zvodně v Evropě. Až do konce ledna 2017 taktéž probíhají veřejné konzultace Evropské komise k zvažovaným politickým opatřením ke stanovení minimálních požadavků na kvalitu opětovně využívané vody v Evropské unii. SOVAK ČR uvádí, že již v roce 2017 se bude podílet na přípravě technické normy stanovující požadavky na kvalitu vyčištěných odpadních vod určených k opětovnému využití (sovak.cz). V současné době však česká legislativa tuto problematiku řeší níže uvedeným způsobem.

Následující část této kapitoly je částečně převzatá z práce „Závlahy a jejich perspektiva“, jejíž spoluautorem je Michal Krátký, který je vedoucí útvaru povrchových a podzemních vod generálního ředitelství Povodí Vltavy (Rožnovský, J., Litschmann, T., 2015). V této práci byl popsán legislativní rámec dané problematiky tak, aby předmětná metodika mohla být bezproblémově využívána při navrhování, projektování, povolování, výstavbě i provozování závlah městskými odpadními vodami v podmínkách České republiky.

Evropská unie zareagovala na potřebu opětovného využití odpadních vod ve svém článku 12 Směrnice Rady 91/271/EHS z 21. ledna 1991 ve znění Směrnice Rady 98/15/ES z 27. ledna 1998 o čištění městských odpadních vod. V dokumentu je napsáno, že „… kdykoliv je to vhodné, měly by být tyto odpadní vody znovu použity“.

Česká legislativa, zareagovala až zákonem č. 150/2010 Sb., kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů ohledně problematiky sucha.

Hlavní závlahová zařízení a podrobná závlahová zařízení dopravou a rozvodem závlahové vody slouží:

a) k umělému vyrovnání vláhového deficitu zemědělských plodin (§ 101 odst. 4 vodního zákona a zatravněných pozemků)
b) k aplikaci hnojivých a jiných roztoků na zemědělské plodiny a zatravněné pozemky
c) k tepelné regulaci – protiúrazové ochraně nebo ochlazování zemědělských plodin a zatravněných pozemků

Druhy používané závlahové vody jsou:

a) povrchové vody (§ 2 odst. 1 vodního zákona)
b) podzemní vody (§ 2 odst. 2 vodního zákona)
c) odebrané vody povrchové (§ 8 odst. 1 písm. a) bod 1 vodního zákona)
d) odebrané podzemní vody (§ 8 odst. 1 písm. b) bod 1 vodního zákona)
e) odpadní vody (§ 38 odst. 1 vodního zákona)

Užívání odpadních vod (§ 38 odst. 1 vodního zákona) jako závlahové vody je dáno nedostatkem povrchové nebo podzemní vody (suchem) s cílem jejich hospodárného a účelného užívání (§ 5 odst. 1 vodního zákona).

4.1.1 Odpadní voda jako závlahová voda

Hlavní závlahové zařízení – vodní dílo (otevřený kanál, přivaděč otevřený, potrubí apod.)

Podrobné závlahové zařízení – vodní dílo (otevřený příkop, brázda apod.) Nevyžaduje žádné povolení k nakládání s vodou jako závlahovou vodou, protože tato závlahová voda není ani povrchovou ani podzemní vodou, ale je vodou odpadní.

Výpustný objekt – vodní dílo (v místě postřiku, podmoku – brázdovém, drenážním, přeronu, výtopy nebo jiného způsobu závlahy pozemku kapkovým, bodovým nebo podpovrchovým způsobem) Nevyžaduje povolení k nakládání s povrchovou vodou, ale ani podzemní vodou jako závlahovou vodou podle ustanovení § 8 odst. 1 písm. c) vodního zákona, tj. „k vypouštění odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních“, protože se nejedná o účel vypouštění odpadních vod do vod povrchových ani podzemních, ale o účel závlahy pozemků odpadní vodou.

Při užití odpadních vod k závlaze zemědělských plodin a zatravněných pozemků především musí být splněna základní povinnost ochrany povrchových a podzemních vod, která je dána ustanovením § 5 odst. 1 vodního zákona, tj. mimo jiné „každý, kdo zachází s povrchovými a podzemními vodami, je povinen dbát o jejich ochranu“.

Zneškodňování odpadních vod vodní zákon řeší následovně:

- vypouštěním odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních vod na základě povolení k nakládání s povrchovými a podzemními vodami podle ustanovení § 8 odst. 1 písm. c) vodního zákona
- jiným zneškodňováním odpadních vod (než jejich vypouštění do vod povrchových nebo podzemních) bez povolení podle ustanovení § 5 odst. 3 vodního zákona. Právě tzv. jiné zneškodňování odpadních vod bez povolení podle ustanovení § 5 odst. 3 vodního zákona je jejich užití za účelem závlahy zemědělských plodin a zatravněných pozemků.

Při závlaze zemědělských plodin a zatravněných pozemků odpadními vodami musí být s ohledem na ochranu povrchových a podzemních vod splněny následující podmínky:

- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody nesmí ohrozit ani znečistit jakost povrchových a podzemních vod tím, že nesmí vniknout do nich
- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody musí být do půdy dodány jen v takovém množství, při kterém nedojde k překročení obsahu závlahové vody v půdě, respektive půdní vrstvě nad polní vodní kapacitu, a tím se zajistí, aby odpadní voda nevnikla do podzemní vody. **Pozn.:** Podle ustanovení § 2 odst. 2 vodního zákona je podzemní voda vodou přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásmu nasycení v přímém styku s horninami (půdou). V kapilárách půdy a kořenech zemědělských plodin a zatravněných pozemků, které se dotují závlahovými dávkami odpadní vody, není podzemní voda, a proto se také nemůže jednat o vypouštění těchto závlahových dávek odpadní vody do vod podzemních.
- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody musí být aplikovány pouze ve vegetačním období, a to ještě mimo srážkové období tak, aby nebyly odpadní vody aplikovány přímo do povrchové vody
- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody nesmí být aplikovány mimo vegetační období.
- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody nesmí být aplikovány do sněhové pokrývky nebo ledové pokrývky na pozemcích. Pozn.: Podle ustanovení § 2 odst. 1 vodního zákona je povrchová voda vodou přirozeně se vyskytující na zemském povrchu, tj. pozemcích, a to ve skupenství nejen kapalném, ale i tuhém, jako je sníh nebo led.
- jednotlivé závlahové dávky odpadní vody co do množství a jakosti musí vycházet podle jednotlivých druhů zemědělských plodin a zatravněných pozemků
  - z ČSN 750434, Meliorace - potřeba vody pro doplňkovou závlahu

– Metodiky „Kritéria využití městských odpadních vod k závlaze zemědělských plodin“, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., r. 2008

– z ČSN 757143, Jakost vod – jakost vody pro závlahy

5 HYDROPEDOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY PŮD

K popisu porézního prostředí vzhledem k proudění vody jsou definovány hydropedologické charakteristiky, jako zrnitostní složení, pórovitost, permeabilita a z ní vycházející hydraulická vodivost. Tyto vlastnosti slouží pro modelování jako nepostradatelné vstupní údaje a na jejich správném určení značně závisí výsledky simulací (Císlerová & Vogel, 1998).

5.1 Zrnitost

Zrnitost určuje velikost poloměru zrn a jejich podíl ve zkoumaném vzorku půdy. Zrnitost je popsána zrnitostní křivkou, která je jejím základním ukazatelem. Zrnitostní složení je pro tvar a velikost pórů jedním z nejdůležitějších faktorů. Pomocí trojúhelníkového klasifikátoru se půdy rozdělují na prach, prachovou hlínu, hlínu, jílovitou hlínu, prachový jíl, jíl, písčitý jíl, písčitou jílovitou hlínu, písčitou hlínu, hlinitý písek a písek (Císlerová & Vogel, 1998).

5.2 Pórovitost

Pórovitost vyjadřuje podíl pórů, tedy prostorů zaplněných plynnou a kapalnou fází v celkovém objemu. Je formulována vzorcem (5.01) (Kutílek, 1984).

$$p = \frac{V_p}{V_t} \qquad (5.01)$$

Kde p je pórovitost, V_p je objem pórů a V_t je objem neporušeného vzorku půdy.

Efektivní pórovitost

Pro proudění vody a transport látek jsou důležité pouze propojené póry, které se účastní prodění. Pro definici toho je zavedena efektivní pórovitost, která zahrnuje pouze objem pórů, které se účastní proudění. Se stoupající velikostí zrna pórovitost obvykle klesá a efektivní pórovitost stoupá. To, že voda v pórech neproudí, bývá někdy způsobeno také zaslepenými konci, kde je voda nehybná, nebo se pohybuje jenom velmi malým průřezem póru (Tourková, 1996).

5.3 Objemová vlhkost

Množství vody v půdě, tedy vlhkost lze definovat jako hmotnostní, nebo objemovou. Objemové vyjádření, uvedené v rovnici (5.02), je pro bilancování půdní vody a různé nasycenosti prostředí vhodnější (Kutílek, 1984).

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \qquad (5.02)$$

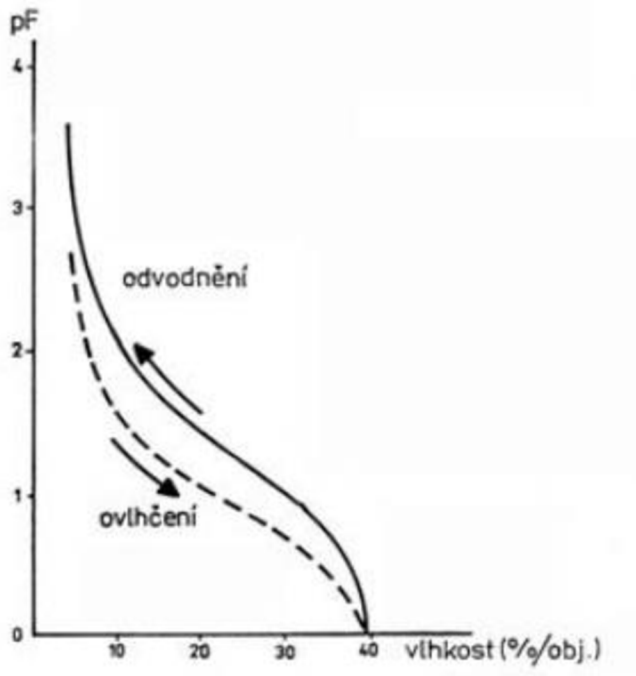
Kde θ je objemová vlhkost, V_w je objem vody a V_t je objem neporušeného vzorku půdy.

5.4 Retenční čára půdní vlhkosti

Retenční křivka je grafickým znázorněním vztahu objemové půdní vlhkosti a sacím tlakem neboli tlakovou výškou. Udává retenční schopnost materiálu, tedy schopnost zadržovat vodu proti působení vnější síly. Tvar křivky závisí především na geometrických vlastnostech pórového systému. Jednotlivé body retenční čáry lze stanovit měřením vlhkostí odpovídajících tlakovým výškám v jednotlivých krocích. Určení retenční křivky je však složité a nejednoznačné. Průběh křivky je pro každou půdu odlišný, proto je potřeba jí vždy stanovit zvlášť (Kutílek, 1984).

Hystereze retenční křivky

Při plnění a prázdnění pórů vodou má retenční křivka odlišný tvar, jak je vidět na Obrázku 2, a to proto, že zde dochází k hysterezi. Tento jev je způsoben především vzduchem uzavíraným ve slepých pórech a rozdílnou hodnotou smáčecího úhlu na suchém a smáčeném povrchu (Kutílek, 1984). U hrubozrnných materiálů může být hystereze významná, ale její matematický popis je značně složitý, takže ve většině případů se hystereze zanedbává (Císlerová & Vogel, 1998).



Obrázek 2: Hystereze retenční křivky, rozdíl mezi drenážní a zvlhčovací větví (pedologie.czu.cz).

Retenční vodní kapacita

Z retenční křivky lze také odvodit vodní kapacitu, která popisuje sklon retenční křivky. Retenční vodní kapacitu nebo jinak zvanou absolutní vodní kapacitu popisuje rovnice (5.03) (Kutílek (1984).

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} \qquad (5.03)$$

Kde *C(h)* je vodní retenční kapacita, θ je objemová vlhkost a *h* je tlaková výška.

Plná vodní kapacita

Plná vodní kapacita = nasycená vlhkost = saturační vodní kapacita je přibližně rovna pórovitosti. Jedná se o vlhkost půdy v okamžiku úplného zaplnění všech pórů vodou.

Polní vodní kapacita

Nebo také retenční (reziduální) vodní kapacita, definuje objem vody, který se neúčastní proudění vody. Jinými slovy vyjadřuje maximální množství kapilárně zavěšené vody, které půda po nadměrném zavlažení (srážkami nebo závlahou) zadrží svými kapilárními silami v téměř rovnovážném stavu. Je to maximální množství vody, které je půda schopna trvaleji zadržet.

5.5 Analytické funkce pro vyjádření hydraulických charakteristik půdy

Pro popis retenčních čar existují analytické funkce, kterými je možné přibližně odhadnout hledanou závislost vlhkosti a tlakové výšky. Pro výpočet se obvykle používá efektivní vlhkost vyjádřena rovnicí (5.04) vyjadřující stupeň nasycení půdy (Kodešová, 2012).

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad (5.04)$$

Kde θ_e je efektivní vlhkost, θ_s je nasycená (saturační) vlhkost, θ_r je reziduální vlhkost.

Nejčastěji používané rovnice pro analytické vyjádření retenční čáry půdní vlhkosti jsou rovnice van Genuchtena, a rovnice Brookse a Coreyho.

Rovnice Brookse a Coreyho

$$\theta = \theta_s \qquad \text{pro } h \geq h_v$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * (\frac{h_v}{h})^{\lambda} \quad \text{pro } h \geq h_v \qquad (5.05)$$

Kde θ *[cm^3.cm^3]* je vlhkost závislá na tlakové výšce, θ_s *[cm^3.cm^3]* je nasycená vlhkost, θ_r *[cm^3.cm^3]* je reziduální vlhkost, h_v *[cm]* je vstupní hodnota vzduchu, *h [cm]* je tlaková výška a λ *[-]* je index rozdělení velikosti porů.

Vstupní hodnota vzduchu je potenciál, při kterém s plně nasycený porézní systém začne odvodňovat a voda v pórech je nahrazována vzduchem. Parametr h_v se vztahuje k maximální velikosti pórů, utvářejících souvislou síť tokových kanálků v půdě. Pro písčité půdy je nízký, a naopak pro jílovité půdy vyšší (Gavlasová, 2014).

van Genuchten

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1+(\alpha|h|^n))^m} \qquad (5.06)$$

Kde $|h|$*[cm]* je absolutní hodnota tlakové výšky, θ [cm^3.cm^3] je vlhkost závislá na tlakové výšce, θ^s [cm^3.cm^3] je nasycená vlhkost, θ^r [cm^3.cm^3] je reziduální vlhkost, α [cm^{-1}] je převrácená hodnota vstupní hodnoty vzduchu a *n*, *m* jsou empirické tvarové koeficienty.

Rovnice van Genuchtena patří k nepoužívanějším a poskytuje zpravidla nejlepší proložení experimentálních dat.

5.6 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost Ks, někdy také nazývána jako propustnost (permeabilita), je hydraulická vlastnost půdy přímo závislá na pórovitosti. Tato vlastnost umožňuje kapalinám (vodě) a plynům pohybovat se, tento pohyb zásadně ovlivňuje objem pórů a rozhoduje o něm vrstva půdy s nejnižší propustností. U vzduchu tento pohyb ovlivňuje hloubka a rostoucí vlhkost půdy. Propustnost půdy zásadně ovlivňuje povrchový odtok vody a tím i následnou erozi půdy. Hydraulickou vodivost můžeme dále rozdělit na nasycenou hydraulickou vodivost a nenasycenou hydraulickou vodivost (Encyklopedie vševěd).

Aproximační funkce hydraulické vodivosti

Pro určení hodnot hydraulické vodivosti různě nasyceného prostředí se nejčastěji používají vztahy odvozené Burdinem a Mualemem, ze kterých lze v kombinaci s tradičními funkcemi pro

retenční čáry, tedy funkcemi Brookse a Coreyho, a van Genuchtena, odvodit analytické vyjádření relativní hydraulické vodivosti. Tvar rovnice van Genuchten – Muael je uveden v rovnici (5.07)

$$K(\theta) = K_s \theta_e^b \left[1 - (1 - \theta_e^{1/m})^m\right]^a \qquad (5.07)$$

Kde *m, n* jsou parametry rovnice van Genuchtena a *a,b,c* jsou parametry pro model Mualema.

6 MAPOVÉ A JINÉ PODKLADY SOUVISEJÍCÍ Z DANOU PROBLEMATIKOU

Tato kapitola je věnována představení podkladů, které jsou důležité pro komplexní řešení problematiky závlahy vyčištěnými odpadními vodami. S velkou pravděpodobností zde nebudou zmíněná všechna fakta, ale většina z těch nejdůležitějších zřejmě ano. Všechna vstupní potřebná data jsou získávána měřením a matematickým modelováním, a následně pro specifické výstupy zpracovávána v geografických informačních systémech.

Na území České republiky se nachází povodí Labe, Dunaje a Odry a Dunaje. Dalším rozdělením povodí je podle největších řek a to Labe, Vltavy, Berounky, Sázavy, Otavy, Lužnice, Ohře, Dunaje, Moravy a Dyje. Všechny údaje spjaté s vodním hospodářstvím jednotlivých povodí, jsou zveřejněny na webových stránkách povodí. Níže uvedená data jsou převzata s webových stránek povodí řeky Dyje, a to z toho důvodů, že se jedná o povodí Jižní Moravy, kde nastávají častá období sucha. Na webových stránkách je zveřejněno velké množství praktických informací a desítky map, které poukazují na to, čím vším se povodí zabývá.

6.1 Data potřebná pro stanovení bilanční rovnice určitého povodí

Sestavení vodohospodářské bilance vyplývá ze zákona č. 254/2001 Sb., o vodách, a vyhlášky č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci. Metodický pokyn MZe ČR pro sestavení vodohospodářské bilance oblasti povodí, stanovuje postupy sestavení bilance, minimální rozsah výstupů a způsob zpřístupnění veřejnosti. Rozlišuje se bilance minulého kalendářního roku, současného stavu a výhledového stavu. Bilance minulého kalendářního roku se sestavuje každoročně a je základním podkladem pro vyjadřovací činnost správce povodí. Zpracovat bilance pro malé povodí v určité oblasti velkého povodí, je také možné. Bilance současného a výhledového stavu se sestavují jednou za šest let, vždy v období přípravy nových plánů povodí (pmo.cz).

Hydrologická bilance zahrnuje porovnání srážek, přítoků a odtoků vody a změn vodních zásob v povodí, území nebo vodním útvaru za daný časový interval. Hydrologická bilance hodnotí změny zásob povrchové a podzemní vody způsobené časovou a prostorovou proměnlivostí přirozených vlivů, zejména klimatických činitelů a vytváří podklad pro hodnocení změn zásob vody, které jsou způsobeny užíváním vody nebo jinými antropogenními zásahy.

Obtížnost sestavení hydrologické bilance spočívá v tom, že ne všechny bilanční veličiny lze vyčíslit z měření. Některé bilanční veličiny můžeme odhadovat podle jejich vztahu k jiným, měřeným, veličinám a některé bilanční veličiny lze odhadnout jen modelováním hydrologického procesu. Navíc je nutné pracovat s dalšími fyzikálními veličinami, které nejsou vstupy ani výstupy bilance, ale jsou potřebné pro výpočet bilančních veličin nebo jsou vnitřními veličinami bilančního výpočtu.

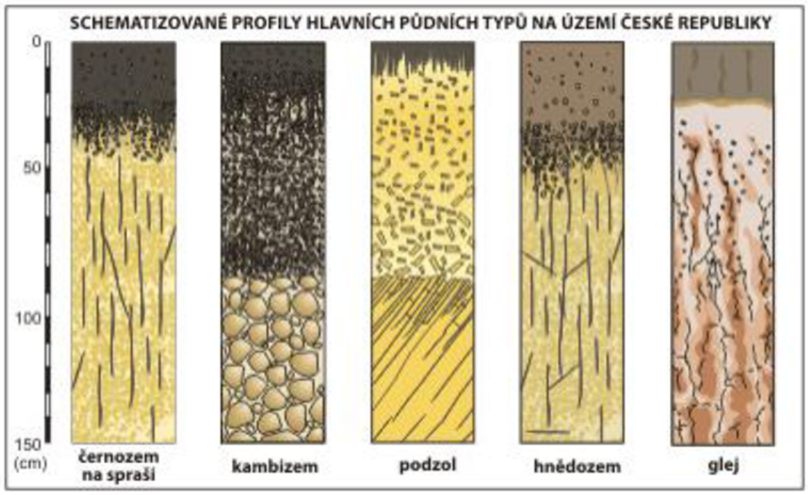
Tabulka 7: Přehled veličin hydrologické bilance (voda.chmi.cz)

Veličina	***Jednotky***	***Použitý způsob stanovení***	***Zdroj dat***
Srážky	mm	Orografickou interpolací z bodových pozorování ve srážkoměrných stanicích	databáze ČHMÚ
Celkový odtok	$m^3.s^{-1}$	Pozorování vodních stavů a hydrometrická měření v závěrovém profilu povodí	databáze ČHMÚ
	mm	Modelovým výpočtem hydrologické bilance ze srážek a meteorologických veličin	model SimBa, databáze ČHMÚ
Základní odtok	$m^3.s^{-1}$	Vyčlenění z průběhu celkového odtoku podle průběhu hladin podzemních vod nebo vydatností pramenů	ČHMÚ
	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Zásoba vody ve sněhové pokrývce	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa, databáze ČHMÚ
Změny zásob podzemní vody	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Přirozený průtok	mm $m^3.s^{-1}$	Pozorování vodní stavů, korekce podle údajů o umělých regulacích	ČHMÚ, VÚV podniky Povodí
Přímý odtok 1	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Přímý odtok 2	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Zásoba vody v půdě	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa

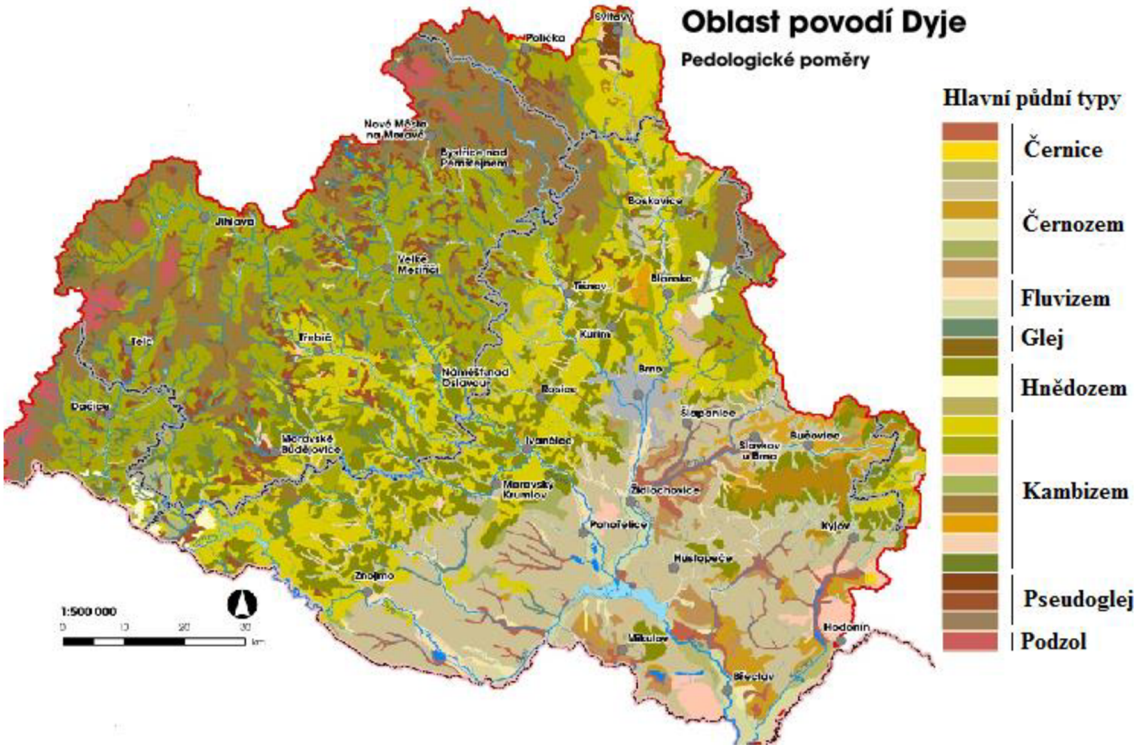
Potenciální evapotranspirace	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Územní výpar	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Relativní vlhkost vzduchu	%	Orografickou interpolací z bodových pozorování klimatologických stanic	databáze ČHMÚ
Teplota vzduchu	°C	Orografickou interpolací z bodových pozorování klimatologických stanic	databáze ČHMÚ
Dotace zásob podzemní vody	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Perkolace	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa

6.2 Mapové podklady

Geologické a pedologické podklady jsou především důležité pro stanovení hydraulických a transportních parametrů půd, díky kterým je možná kalibrace softwaru pro možnou modelaci závlahy vyčištěnou odpadní vodou a její dopady na spodní vodu.

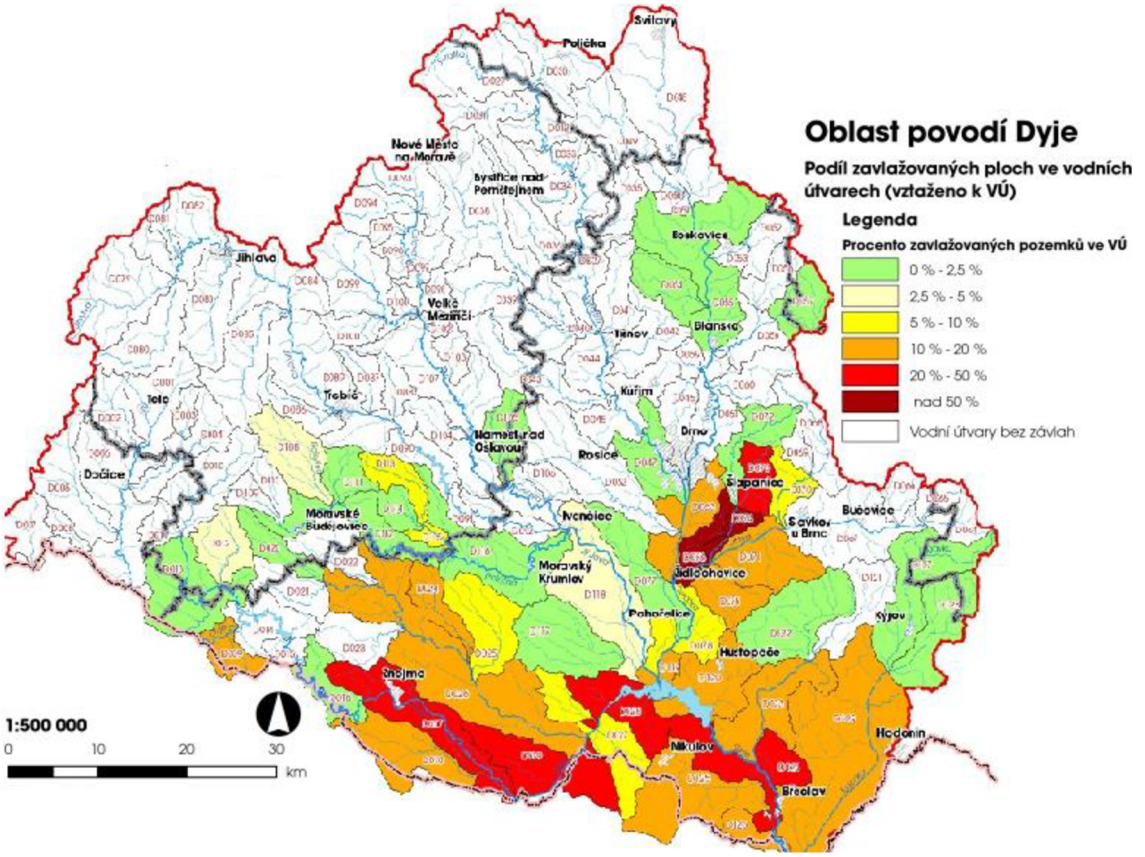


Obrázek 3: Schematizované profily hlavních půdních typů na území České republiky (vítejtenazemi.cz).



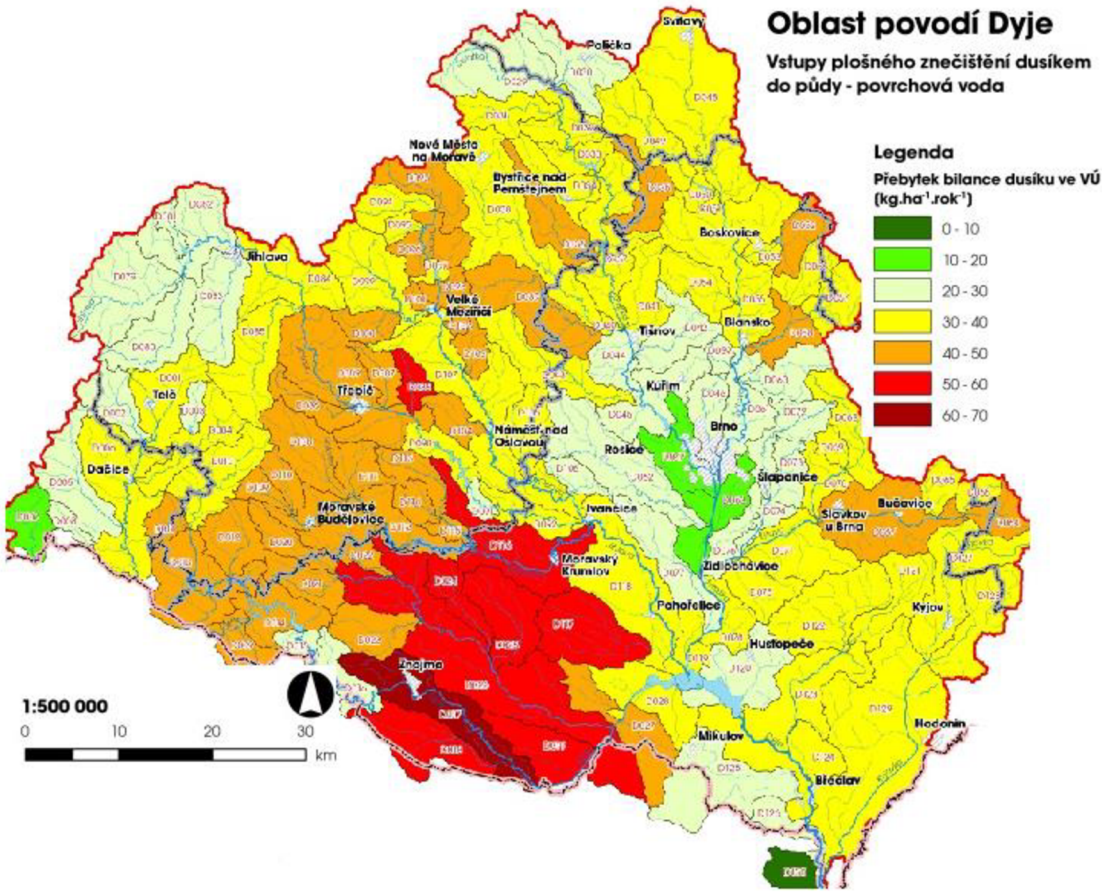
Obrázek 4: Mapa pedologických poměrů oblasti povodí řeky Dyje (pmo.cz).

Mapa zobrazená na Obrázku 4., je velice praktická pro vyhodnocení potenciálně vhodných lokalit pro řešený typ závlahy, a to s ohledem na pedologické poměry. Pro možnou aplikaci závlahy vyčištěnou odpadní vodou na nejvíce zavlahovaných lokalitách, by podle této mapy a mapy na Obrázku 5, bylo potřeba kalibrovat model pro různé půdní typy černozemě.



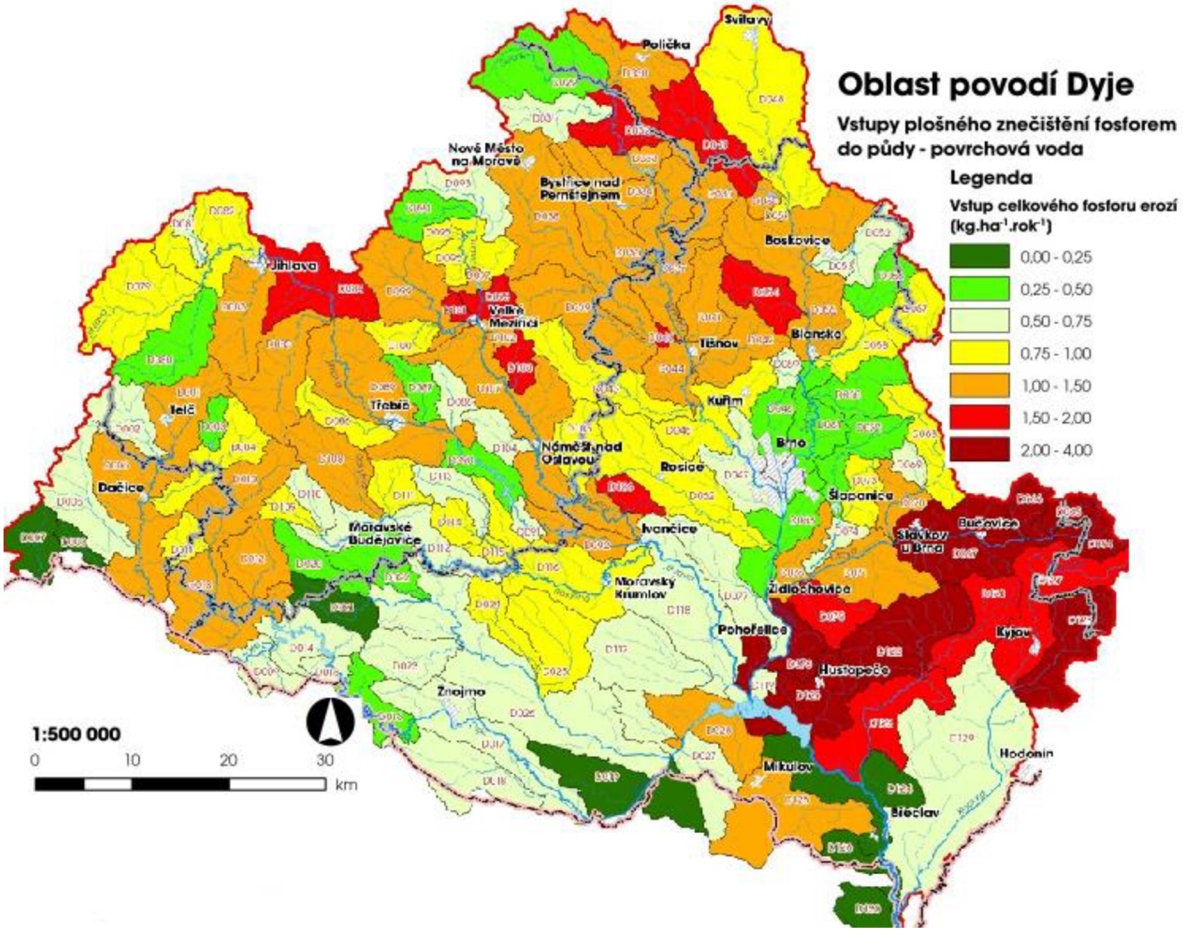
Obrázek 5: Mapa zavlažovaných ploch v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz).

Mapa zavlažovaných ploch v oblasti povodí řeky Dyje znázorňuje podíl zavlažovaných ploch v jednotlivých vodních útvarech. Tyto informace jsou užitečné pro přehled lokalit, kde již nějaké závlahové systémy jsou vybudovány, a tudíž jsou z ekonomických důvodů brány jako první v potaz pro možnou budoucí závlahu vyčištěnými odpadními vodami. Momentálně nejvíce zavlažována oblast je na Jihu kousek od Brna a to mezi městy Šlapanice a Židlochovice, kde je podíl zavlahované plochy větší než 50 %. Proto během popisu následujících map bude pozornost zaměřena především na tuto oblast.



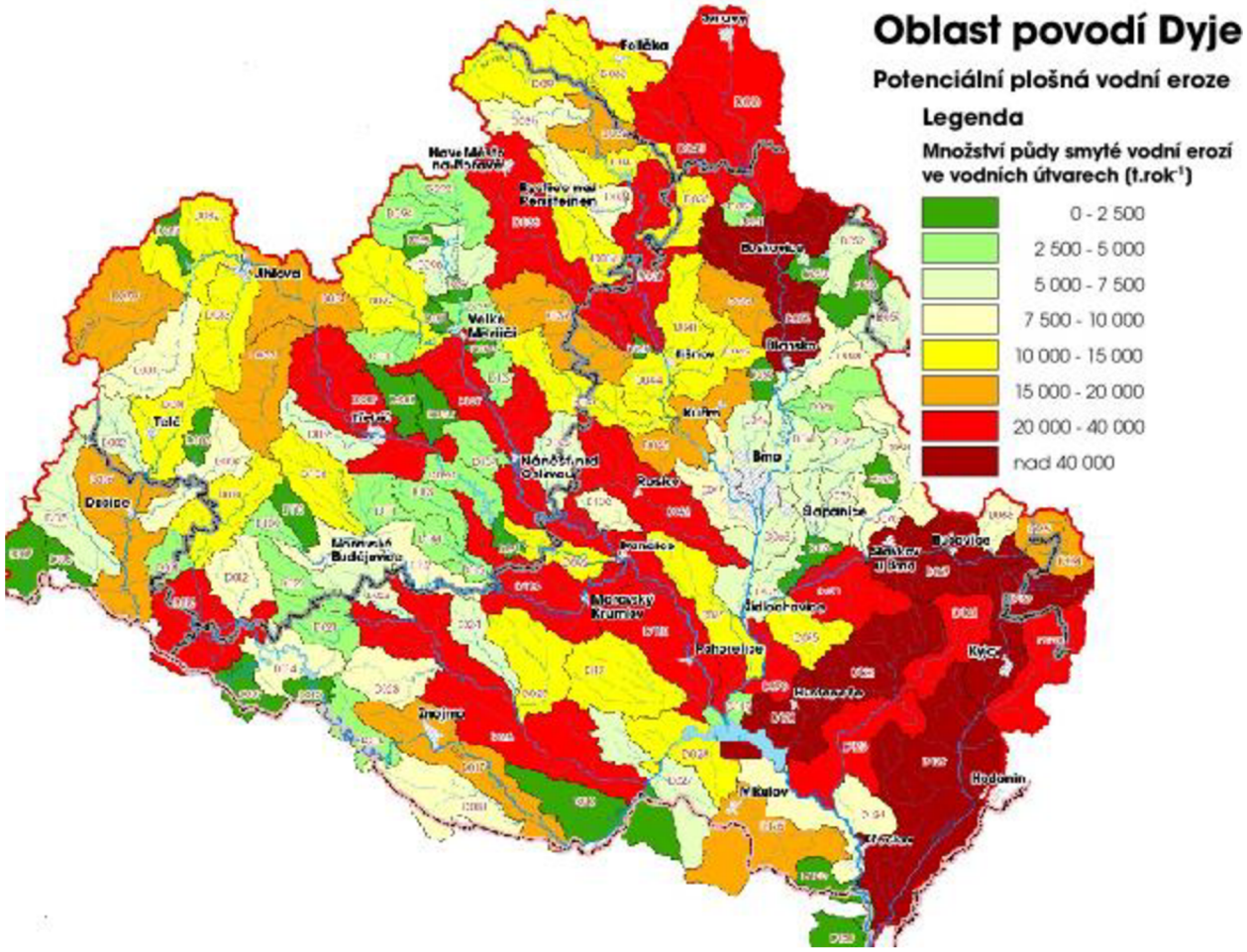
Obrázek 6: Mapa vstupů plošného znečištění dusíkem do půdy v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz).

Mapa vstupů plošného znečištění dusíkem do půdy znázorňuje oblasti s bilančním přebytkem dusíku v rozmezí 0-70 $kg.ha^{-1}.rok^{-1}$. Největší hodnoty přebytku dusíku dosahují v oblasti kolem Znojma a dále na jihovýchod kolem řeky Dyje. Tato oblast skoro přesně kopíruje lokalitu z předchozí mapy kde podíl zavlahovaných ploch je mezi 20-50 %. Přicházela by v potaz možnost, že je to způsobeno přehnojením právě touto závlahou, ale následující mapa na Obrázku 7 tuto teorii pravděpodobně vyvrací, protože vstup celkového znečištění fosforem je 0,5-0,75 $kg.ha^{-1}.rok^{-1}$, přestože je celková eroze v této lokalitě 15-20 tis. $tun.rok^{-1}$. V nejvíce zavlahované lokalitě je bilance dusíku poměrně příznivá, když se pohybuje v rozmezí 10-40 $kg.ha^{-1}.rok^{-1}$.



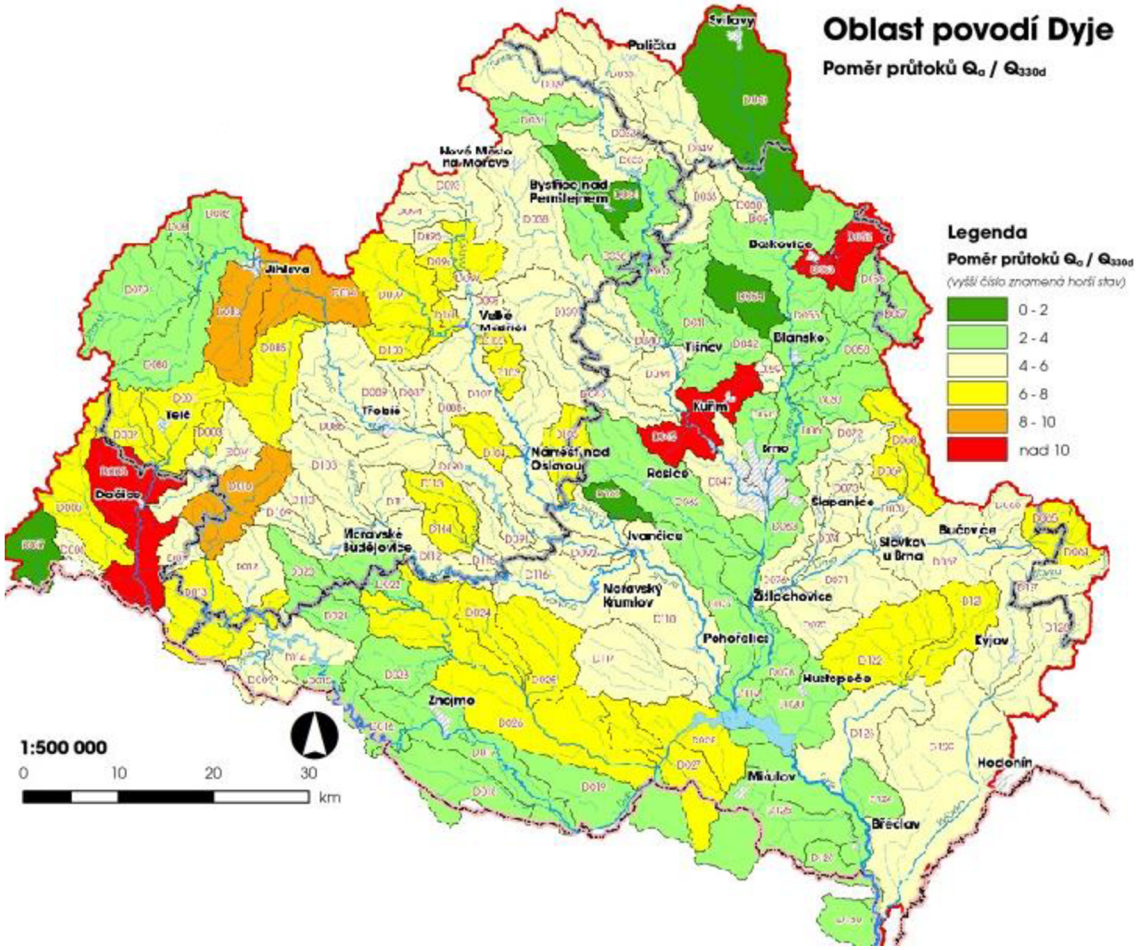
Obrázek 7: Mapa vstupů plošného znečištění fosforem do půdy v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz).

Mapa vstupů plošného znečištění fosforem do půdy znázorňuje množství celkového fosforu, které se erozí dostává do povrchových vod. V již zmiňované lokalitě na jihu od Brna se množství fosforu pohybuje v rozmezí 0,5-1,5 $kg.ha^{-1}.rok^{-1}$. Dalo by se předpokládat, že tato mapa bude korespondovat s mapou s potenciální plošnou erozí na Obrázku 8, ale není tomu úplně tak. To pravděpodobně poukazuje na to, ve kterých oblastech dochází ke hnojení. Největší riziko pro kontaminací hlavně povrchových vod fosforem je v lokalitách, kde dochází ke hnojení a kde je velký potenciál pro plošnou erozi.



Obrázek 8: Mapa potenciální plošné vodní eroze ve vodních útvarech v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz).

Mapa potenciální plošné vodní eroze znázorňuje pro jednotlivé vodní útvary množství půdy smyté vodní erozí. V lokalitě na jihu Brna, která byla již několikrát zmíněna, se hodnoty potenciální plošné vodní eroze pohybují ve velkém rozmezí 0-40 000 t.rok^{-1}. Nejlepší hodnoty jsou ve střední a západní části této lokality kde se pohybují přibližně v rozmezí 0-7500 t.rok^{-1}.



Obrázek 9: Mapa poměru průtoků Q_a/Q_{330d} vyjadřuje v agregované podobě přirozené akumulační schopnosti v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz).

Zobrazená mapa na Obrázku 9, informuje o tom, jaký je poměr průtoků $Q_a/Q_{330d,}$ v jednotlivých vodních útvarech, který vyjadřuje v celkové podobě veškeré přirozené akumulační schopnosti území. Čím je hodnota ukazatele vyšší, tím horší je akumulační schopnost daného území. Ve sledované oblasti mezi městy Šlapanice a Židlochovice na jihu od Brna se hodnoty tohoto poměru pohybují v rozmezí 4-6, takže schopnost přirozené akumulace je v porovnání s jinými oblastmi v povodí Dyje průměrná.

V lokalitách kde je schopnost krajiny akumulovat vodu, a tak jí infiltrovat do podzemí bude nízký ředící potenciál s vodou ze závlahy, s kterou by se infiltrovaná dešťová voda mohla smísit, a tak snížit koncentraci dusičnanů.

Sledovaná lokalita se podle těchto několik podkladů jeví jako teoretický možná pro budoucí aplikaci vyčištěné odpadní vody, ale samozřejmě za předpokladu, že splní i jiná kritéria, která, ale prozatím nebyla stanovena.

Ukazatelé znečištění a jejích množství, které byly pro danou lokalitu na jihu od Brna sledovány a popsány, stejně tak hodnoty z bilanční rovnice pro tuto lokalitu, by určitě vstupovaly do rovnice pro návrh jakési maximální závlahové dávky vyčištěnou odpadní vodou.

7 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Proces migrace kontaminantu je složitý a závislý na mnoha faktorech. V dnešní době tento problém značně zjednodušuje použití různých typů modelů, které simulují podzemní tok rozpuštěné látky a jeho migraci v rámci nasycené i nenasycené zóny. Mezi takové modely patří například: MODFLOW/MT3D, Feflow, HydroGeoSphere. Častým jevem je i kombinace více druhů modelů, což umožňuje komplexní znázornění problému a jeho řešení. Příkladem muže být kombinace WNGM Agriflux numerického modelu s výše zmíněným HydroGeoSphere modelem. WNGM Agriflux pomáhá odhadnout vyluhování N z kořenové zóny a HydroGeoSphere je model simulující proudění podzemních vod a transport dusičnanů v podkořenové zóně (Bonton, 2011).

Jeden z široce používaných softwaru je také HYDRUS 2/3D, ve kterém probíhalo modelování pro tuto diplomovou práci. Tato kapitola popisuje software HYDRUSUS 2D/3D a obecné principy a zákonitosti matematického modelování, které tvoří teoretický základ pro práci v tomto softwaru.

7.1 HYDRUS

Software Hydrus od společnosti PC-PROGRESS s.r.o. se sídlem v Praze, je tvořen sadou modelovacích softwaru pro operační systém Windows. Autory Hydrusu jsou Dr. Rien Van Genuchten, Drs. M. Šejna a J. Šimůnek. Hydrus lze použít pro analýzu proudění vody, tepla a transportu rozpuštěných látek v proměnlivě nasycených porézních médiích (například půdy). Program numericky řeší Richardsovu rovnici a používá k jejímu výpočtu metodu konečných prvků, kdy simuluje dvou a tří dimenzionální pohyb vody, tepla a rozpuštěných látek v proměnlivém nasyceném nebo nenasyceném prostředí. Model zahrnuje optimalizační parametr algoritmu pro inverzní odhad různých hydraulických vlastností půd a transport rozpuštěných látek (pc-progress.com).

Hydrus dokáže popsat proudění omezené nepravidelnými hranicemi. Průtočná oblast může být složena z nehomogenních půd, které mají libovolný stupeň anizotropie. Průtok a transport lze realizovat ve vertikální, vodorovné rovině, trojrozměrné oblasti vykazující radiální symetrii kolem svislé osy, nebo trojrozměrné oblasti (Šimůnek a kol., 1999).

Hydraulické vlastnosti nenasycených půd jsou popsány pomocí analytických funkcí van Genuchtena, Brooks a Corey, Durner a upraveného typu van Genuchtenov-Mualem. HYDRUS také zahrnuje hysterezi pomocí empirického modelu zavedeného (Scott et al., 1983) a (Kool and Parker, 1987). Program zavádí postup měřítka, kterým se aproximuje hydraulická variabilita v

daném půdním profilu, pomocí sady lineárních měřítek transformací, které se vztahují na jednotlivé půdní hydraulické vlastnosti těchto referenčních půd. Pohyb vody v proměnlivě nasyceném porézním prostředí je řešen Richadrsovou rovnici a transport látek advekčně-disperzní rovnici (Šimůnek a kol., 1999).

Řídící rovnice jsou řešeny numericky pomocí Galerkinovy lineární metody konečných prvků aplikované na trojúhelníkovou síť. Integrace v čase je dosažena použitím metody konečných diferencí pro nasycené i nenasycené podmínky. Výsledné rovnice jsou řešeny iterací, linearizací a následnou Gaussovou eliminací matic, metodou sdružených gradientů pro symetrické matice, nebo metodou ORTHOMIN pro asymetrické matice (Šimůnek a kol., 1999). Obsah vody je hodnocen pomocí metody „mass-conservative“ (Celia, 1990).

Volně dostupný HYDRUS-1D simuluje proudění vody, transportu rozpuštěných látek a přenos tepla v jedné dimenzi. Pro komerční účely je software HYDRUS 2D/3D, který rozšiřuje simulační schopnosti do druhého a třetího rozměru. První verze HYDRUS 2D/3D z roku 1999 byla zásadně vylepšená na verzi 2.0 v roce 2011. Software je neustále vylepšován a doplňován o různé nové modely a funkce. Všechny dostupné verze a informace k nim jsou uvedeny na stránkách vydavatele. Pro zpracování výsledků měření pro tuto práci byla použita verze HYDRUS 2D/3D 1.10 (pc-progress.com).

7.2 Numerické řešení

Matematické modely se řeší pomocí numerických metod, mezi které patří například metoda konečných prvků (MKP), metoda konečných diferencí (MKD) nebo metoda konečných objemů. Programové prostředky pro numerické řešení využívají různá numerická řešení, kde každé z nich má svoje východy i nevýhody (Duchan a kol., 2014).

7.2.1 Metoda konečných diferencí

Metoda konečných diferencí je pravděpodobně nejstarší numerickou metodou, která našla své využití ještě před zavedením výkonné počítačové techniky. Princip MKD spočívá v nahrazení parciálních derivací, vyskytujících se v základních řídících rovnicích, algebraickými výrazy vyjadřujícími podíl konečných diferencí závislé a nezávislé proměnné (Říha, 1997).

7.2.2 Metoda konečných prvků

Ve srovnání s metodou konečných diferencí představuje metoda konečných prvků novější numerickou metodu, která pro svou výhodnost doznala velkého rozšíření v modelování proudění podzemní vody.

Jestliže se při řešení metody konečných diferencí hledá řešení pouze v izolovaných bodech (uzlech sítě), pak v metodě konečných prvků je hledaným řešením spojitý, nebo po částech spojitý, průběh neznámé veličiny v celé řešené oblasti, která je předem rozdělena na konečné prvky (Valentová, 1998).

Oproti MKD a jiným starším numerickým metodám má MKP řadu výhod. Na rozdíl od MKD není třeba při sestavení sítě konečných prvků dodržovat žádnou pravidelnou strukturu, sít je tak možné přizpůsobit tvaru oblasti řešení. Algoritmus výpočtu totiž není závislý na tvaru řešené oblasti, ale závisí pouze na typu elementu. V místě, kde je to potřebné je možné sít zahustit. Konečný prvek pak může mít obecné různé fyzikální vlastnosti. Okrajové a počáteční podmínky lze v MKP oproti MKD snadněji realizovat (Říha, 1997).

7.3 Hydraulika proudění vody v porézním prostředí

Při tvorbě matematických modelů proudění podzemní vody se vychází ze základních zákonů mechaniky kapalin, resp. mechaniky tekutin. Mezi základní zákony, kterými lze popsat matematické modely proudění kapalin patří tyto (Říha, 1997):

- Zákon zachování hmotnosti
- Zákon zachování hybnosti
- Zákon zachování energie
- Stavové rovnice

Na základě těchto základních rovnic pak lze odvodit vztahy pro proudění v nasyceném a nenasyceném filtračním prostředí.

7.3.1 Zákon zachování hmotnosti

Ze zákona zachování hmotnosti proudící kapaliny vyplývá, že rozdíl mezi hmotností kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za časový interval *dt* se musí rovnat časové změně hmotnosti kapaliny obsažené v tomto elementu. Zákon zachování hmotnosti je v hydraulice uváděný jako rovnice kontinuity (Mase, 1970):

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \qquad (7.01)$$

Kde ρ *(p(x,y,z,t), T(x,y,z,t)* je hustota kapaliny, v_i *(x,y,z,t)* je vektor rychlosti a $x_i(t)$ je prostorová souřadnice, která je funkcí času t.

7.3.2 Zákon zachování hybnosti

Zákon zachování hybnosti říká, že celková hybnost izolované soustavy je neměnná. Rovnice hybnosti má tvar (Mase, 1970):

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{Dv_i}{D_t} \qquad (7.02)$$

Kde σ_{ij}je tenzor napětí, ρ je hustota kapaliny, $f_i(x,y,z,t)$ jsou složky vektoru objemového zatížení f vztaženého na jednotku hmotnosti a $v_i(x,y,z,t)$ jsou složky vektoru rychlosti v.

7.3.3 Stavové rovnice

Stavové rovnice neboli konstitutivní vztahy navzájem propojují první a druhý pohybový zákon. Konstitutivní vztah vyjadřuje závislost mezi tenzorem napětí σ_{ij} a tenzorem rychlosti přetvoření (deformační rychlosti) ε_{ij}. Tenzor napětí σ_{ij} je zde vyjádřen jako lineární funkce rychlosti přetvoření ε_{ij} a tlaku p (Mase, 1970):

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\rho,T)\varepsilon_v + 2\mu(\rho,T)\varepsilon_v \qquad (7.03)$$

Kde σ_{ij} je tenzor napětí, $\rho(x,y,z,t)$ je tlak, $\lambda(\rho,T)$ je koeficient objemového přetvoření, $\mu(\rho,T)$ je koeficient dynamické viskozity, ε_v je tenzor rychlosti objemového přetvoření a δ_{ij} je Kroneckerovo delta.

Důležitým vztahem, který můžeme na základě znalosti rovnice kontinuity a konstitutivních vztahů odvodit, je diferenciální Navier-Stokesovy rovnice. Jsou to nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné tekutiny (Říha, 1997):

$$f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu \partial^2 v_i}{\rho x_j^2} = \frac{\partial v_j}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \qquad (7.04)$$

Kde $f_i(x,y,z,t)$ jsou složky vektoru objemového zatížení $f$vztaženého na jednotku hmotnosti, $p(x,y,z,t)$ je tlak, $x_i(x,y,z,t)$ jsou prostorové souřadnice a v_i(x,y,z,t) jsou složky vektoru rychlosti v.

7.3.4 Nasycená zóna

Základní diferenciální rovnice popisující pohyb podzemní vody vychází ze zákona zachování hmotnosti kapaliny. Pro obecný příklad předpokladu stlačitelnosti vody i porézního prostředí má rovnice spojitosti, která je disktrétním vyjádření zákona zachování hmotnosti tento tvar (Říha, 1997):

$$\frac{\partial(\rho_w \times q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w \times q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w \times q_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho_w \times n)}{\partial t} = 0 \qquad (7.05)$$

Kde q_x, q_y, q_z jsou složky vektoru specifického průtoku (průsaku) $q(x,y,z,t)$, $\rho_w(x,y,z,t)$ je hustota kapaliny a $n(x,y,z,t)$ je pórovitost.

7.3.5 Nenasycená zóna

Modelování proudění vody v nenasycené zóně se může lišit podle použitého koncepčního přístupu. Můžeme uvažovat proudění vody a vzduchu v pórech, proudění vody v pórech nebo proudění v půdní matrici a v preferenčních cestách. Proudění v nenasyceném prostředí popisuje Richardsova rovnice (Duchan a kol., 2014).

Richardsova rovnice

Richardsova rovnice je použitelná za zjednodušujících předpokladů: geometrie pórového prostředí může být ztvárněna kapilárním modelem nehybných a nedeformovatelných pórů, tlak vzduchu v pórech je atmosférický a neměnný, proudění vzduchu nemá žádný vliv na proudění vody a proudící voda je nestlačitelná (Císlerová & Vogel, 1998).

Řídící rovnice (7.06) pro řešení nestacionárního proudění formuluje základní vztah mezi objemovou vlhkostí a průtokem v čase a prostoru spojením Darcy-Buckinghamova nebo Darcyho zákona a rovnice kontinuity (Kutílek & kol., 2004).

$$\nabla\big(K(\theta)(\nabla h + \nabla z)\big) = \frac{\partial\theta}{\partial t} \qquad (7.06)$$

Kapacitní tvar Richardsovy rovnice

Jednou z forem Richardsovy rovnice je kapacitní tvar (7.07) vyjadřující hodnoty v závislosti na tlakové výšce h. Tento tvar také zahrnuje retenční vodní kapacitu C definovanou v rovnici (7.07). (Císlerová & Vogel, 1998).

$$\nabla(K(h)\nabla h) + \frac{\partial K_{zz}(h)}{\partial z} = C(h)\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (7.07)$$

Difúzní tvar Richardsovy rovnice

Pokud je neznámou funkcí v rovnici objemová vlhkost, jedná se o difúzní formu Richardsovy rovnice (7.08). V tomto tvaru se objevuje difuzivita půdní vody, kterou lze vyjádřit výrazem (7.09) (Kutílek & kol., 2004).

$$\nabla(D(\theta)\nabla\theta) + \frac{\partial K_{zz}(\theta)}{\partial z} = \frac{\partial\theta}{\partial t} \qquad (7.08)$$

$$D(\theta) = K(\theta)\frac{dh}{d\theta} = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \qquad (7.09)$$

7.3.6 Okrajové a počáteční podmínky

Matematické modelování vyžaduje mnoho zjednodušení, vytvořený model nazýváme modelem konceptuálním. Aproximace se týkají například režimu proudění nebo materiálových charakteristik. Kromě charakteristik popsaných v předchozích kapitolách je pro řešení problému nezbytné vymezit počáteční a okrajové podmínky (Lóžiová, 2013).

Počáteční podmínky

Počáteční podmínkou je určena výchozí hodnota neznámé funkce. Podmínka (7.10) předepisuje hodnotu proměnné h pro všechny body modelované oblasti Ω v počátečním čase t_0, nebo je možné určit počáteční vlhkost podmínkou (7.11) (Bear & Cheng, 2010).

$$h(x, t_0) = h_0(x) \;\; pro \; \forall(x) \in \Omega \qquad (7.10)$$

$$\theta(x, t_0) = \theta_0(x) \;\; pro \; \forall(x) \in \Omega \qquad (7.11)$$

Okrajové podmínky

Na všech hranicích oblasti je nutné určit okrajové podmínky, je třeba definovat průběh hodnot pro celou dobu trvání simulace. U rovnice proudění vody se používají dva typy okrajových podmínek, a to Dirichletova a Neumannova (Císlerová, 1989).

Dirichletova okrajová podmínka

Tato podmínka je často nazývána podmínkou stabilní, z fyzikálního hlediska je to tlaková okrajová podmínka. U tohoto typu je známá hodnota neznámé funkce na určité části hranice řešené oblasti proudění Ω. V případě známé tlakové výšky h_Γ na části hranice Γ se podmínka definuje předpisem (7.12), podmínku lze definovat také pomocí objemové vlhkosti jako výraz (7.13) (Císlerová & Vogel, 1998).

$$h(x, t) = h_\Gamma \quad pro \; \forall(x.t) \in \Gamma \times [0, T) \qquad (7.12)$$

$$\theta(x, t) = \theta_\Gamma \quad pro \; \forall(x.t) \in \Gamma \times [0, T) \qquad (7.13)$$

Tlaková okrajová podmínka se používá pro charakterizaci výtopové infiltrace s konstantní hladinou na horním okraji půdního profilu, k určení hladiny podzemní vody uvnitř půdního profilu (Kodešová, 2012).

Neumannova okrajová podmínka

Nestabilní neboli toková okrajová podmínka je použita, známe-li rychlost proudění v kolmém směru přes hranici oblasti Γ_N. Voda může do systému přitékat, nebo z něj odtékat. Neumannova

okrajová podmínka se definuje předpisem (7.14) vztaženým k vnější normále hranice $\vec{n}$, tok musí být vyjádřen pomocí rovnice proudění s proměnnou h nebo θ (Císlerová & Vogel, 1998).

$$-\mathrm{K}\left(\frac{\partial \mathrm{h}(\mathrm{x},\mathrm{t})}{\partial \vec{\mathrm{n}}} + \mathrm{n}_3\right) = \mathrm{q}_\Gamma \quad \text{pro } \forall(\mathrm{x},\mathrm{t}) \in \Gamma \times [0,\mathrm{T}) \qquad (7.14)$$

Neumannova podmínka může vyjadřovat srážky nebo výpar na okraji oblasti vyjadřujícím terén, nebo měřený odtok ve dně (Kodešová, 2012).

V inženýrské praxi se toková okrajová podmínka používá také v homogenní podobě jako nulový tok „no flow“ (7.15), kdy je výraz roven nule. Tato podmínka může reprezentovat například nepropustné geologické podloží (Mucha & Šestakov, 1987).

$$-K\left(\frac{\partial h(x,t)}{\partial \vec{n}} + n_3\right) = 0 \quad pro\ \forall(x,t) \in \Gamma \times [0,T) \qquad (7.15)$$

Další používanou variantou je také volná drenáž „free drainage“ (7.16), kde je derivace tlakové výšky vůči hranici nulová, voda tak odtéká pouze vlivem geodetického gradientu. Tok touto hranicí je tedy roven hodnotě nenasycené hydraulické vodivosti (Kuráž, 2011).

$$\frac{\partial h}{\partial \vec{n}}(x,t) = 0 \qquad pro\ \forall(x,t) \in \Gamma \times [0,T) \qquad (7.16)$$

Dále se používá podmínka výronová plocha „seepage face“, ta je vhodná například pro výtok podzemní vody do nádrže nebo toku. Tato podmínka je nulovým tokem až do chvíle, kdy dojde k nasycení a voda pak touto hranicí proudí volně na povrch. Fyzikálně se tedy v nenasyceném stavu chová jako Neumannova okrajová podmínka „no flow“ a při nasycení se změní na Dirichletovu ve formě nulové tlakové výšky, v průběhu simulace se mezi nimi přepíná, pro matematické vyjádření viz výrazy (7.17) (Kuráž, 2011).

$$\begin{gathered} \frac{\partial h}{\partial \vec{n}}(x,t) + n_3(x) = 0 \ \ pro\ \forall h(x,t) < 0 \ \ \ pro\ \forall(x,t) \in \Gamma \times [0,T) \\ h(x,t) = 0 \ \ pro\ \forall \frac{\partial h}{\partial \vec{n}}(x,t) + n_3(x) < 0 \ \ \ pro\ \forall(x,t) \in \Gamma \times [0,T) \end{gathered} \qquad (7.17)$$

7.4 Transportní procesy rozpuštěných látek

7.4.1 Pohyb rozpuštěných látek

Hydrodynamická disperze

Hydrodynamická disperze je proces působící na všechny rozpuštěné látky migrující v podzemní vodě. Jejím důsledkem je v podstatě rozšiřování látek nesouhlasně s procesem samotné advekce. Důsledkem hydrodynamické disperze je tak rozptyl látek i do těch částí pórového prostředí, kam

by se látky pohybující se pouze advekcí nedostaly. Hydrodynamická disperze tak způsobuje, že se geometrický půdorysný tvar zdroje kontaminace jakoby rozmazává. Velice důležité je to, že proces hydrodynamické disperze nemůže způsobit reálný úbytek migrující látky z prostředí (is.muni.cz).

Hydrodynamická disperze je tvořena dvěma procesy, a to difúzi a disperzi. Difúze je pohyb rozpuštěných látek ve směru koncentračního gradientu. Difúze definuje všesměrný pohyb, ke kterému dochází tak dlouho, dokud existuje koncentrační gradient. Zatímco difúze se uplatňuje i v případech, kdy podzemní voda neproudí, mechanická disperze se uplatňuje pouze v případě proudění podzemní vody. Disperze je transport na základě rozdílů v hodnotách hydraulické vodivosti (nehomogenity prostředí) a tím i odlišné rychlosti proudění (is.muni.cz). Přesnější informace o matematickém modelování těchto procesu jsou uvedeny v technickém manuálu Hydrusu.

7.4.2 Reakční procesy rozpuštěných látek

Adsorpce a retardace

Adsorpce je děj na pomezí transportních a chemických procesů. Proces, při kterém dochází k zachycení kontaminantu na povrch pevné fáze, se nazývá adsorpce. Při poklesu koncentrace kontaminantu dochází k jeho uvolnění neboli desorpci. Adsorbovaný kontaminant je v porovnání s advekcí zpomalen. Koeficient retardace R vyjadřuje toto zpomalení a jeho hodnota je bezrozměrné číslo ukazující poměr mezi rychlostí proudění vody a advekční rychlostí transportu kontaminantu (Šráček et al., 2002). Adsorpce se stanovuje pomoci tzv. rozdělovacího (distribučního koeficientu) $K_d = k_s$.

Interakce mezi roztokem *c* a izotermickou adsorpcí *s* v půdě je zobecněná nelineární rovnici ve tvaru:

$$s_k = \frac{k_{s,k} c_k^{\beta_k}}{1+\eta_k c_k^{\beta_k}} \qquad (7.18)$$

$$\frac{\partial s_k}{\partial t} = \frac{k_{s,k}\beta_k c_k^{\beta_k - 1}}{(1+\eta_k c_k^{\beta_k})^2}\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{c_k^{\beta_k}}{1+\eta_k c_k^{\beta_k}}\frac{\partial k_{s,k}}{\partial t} - \frac{k_{s,k} c_k^{2\beta_k}}{\left(1+\eta_k c_k^{\beta_k}\right)^2}\frac{\partial \eta_k}{\partial t} + \frac{k_{s,k} c_k^{\beta_k} \ln c_k}{(1+\eta_k c_k^{\beta_k})^2}\frac{\partial \beta_k}{\partial t}$$

Kde $ks[L^3.M^{-1}]$, $\beta k[-]$ a $\eta_k[L^3.M^{-1}]$ jsou empirické koeficienty. Freundlichova adsorpce, Langmuirova adsorpce a lineární rovnice adsorpce jsou možné případy rovnice (7.18). Jestliže bude $\beta_k=1$ tak rovnice (7.18) bude popisovat Langmuirovou adsorpci. Jestliže bude $\eta_k=0$ tak rovnice (7.18) bude rovnici Frendlichove adsorpce. A v třetím případě, jestliže bude platit obojí,

to znamená β_k=1 a η_k=0 tak dochází k lineární izotermické adsorpci (Hydrus, 2006). V Kapitole 10.4 Tvorba modelu bude platit třetí případ, této rovnice.

Rozpad

Rozpad je děj na pomezí transportních a chemických procesů. Při migraci kontaminantu dochází i k jeho přeměně za vzniku dceřiných produktů. Rozpad je termín spojený s organickými látkami, u nichž je proměna nevratná. Často se jedná o aerobní nebo anaerobní respiraci bakteriemi, při které vzniká meziprodukt nebo finální produkt rozkladu. U anorganických látek jde spíše o dočasnou transformaci (webcache). Může tedy dojít ke zpětné přeměně za změněných podmínek. Proces rozpadu není zahrnut v kapitole 10.4 Tvorba modelu.

8 PRAKTICKÁ ČÁST

Práce nad praktickou části této diplomové práce probíhala následujícím způsobem:

1) Sestavení čtyř experimentálních kolon s instalací závlahového systému a instalace snímače objemové vlhkosti
2) Odebíraní vzorků vody a následné vyhodnocování v průběhu 81 dnů
3) Zpracování všech potřebných dat pro sestavení modelu
4) Vytvoření numerického hydraulického modelu v prostředí Hydrus
5) Kalibrace hydraulických parametrů filtračního prostředí
6) Doplnění modelu o modul „šíření rozpuštěné látky“
7) Kalibrace komplexního modelu
8) Aplikace rozšířením a změnou modelovaného prostředí

V této práci jsme se věnovali pouze transportu jedné rozpuštěné látky půdou a to amoniakálního dusíku. Ze všech běžně sledovaných ukazatelů znečištění, kterými jsou BSK, CHSK, NL, NH_4-N, N_{celk} a P_{celk} byl vybrán amoniakální dusík z toho důvodu, že jeho zbytková koncentrace na výtoku z čistírny odpadních vod má po procesu nitrifikace v půdě největší potenciál pro znehodnocení spodních vod.

Modelace a následné vyhodnoceni transportu všech rozpuštěných látek, které mohou znehodnotit kvalitu spodní vody, by bylo mnohem náročnější a přesahující časový rozsah diplomové práce. V práci tedy přistupujeme ke značnému zjednodušení této problematiky, protože předmět této práce je představení možného postupu a přístupu k řešení problematiky.

Je potřeba sledovat koncentraci dusičnanů, ačkoli je podle emisních standardů nemusíme na odtoku z ČOV vyhodnocovat. Pro využití vyčištěné odpadní vody pro závlahu je to nicméně důležité s ohledem na možnost infiltrace dusičnanu do spodní vody. Klasické čistírny odpadních vod mají ve svém technologickém procesu část nitrifikační a denitrifikační, takže většina dusičnanu, které vzniknou během nitrifikace, se odstraní a tím poklesne koncentrace dusičnanu na výtoku z čistírny odpadních vod. Je potřeba myslet na to, že některé typy čistíren odpadních vod nemají ve svém technologickém procesu část denitrifikační. Toto je důležité pro možnou aplikaci, protože se na samotném počátku, ještě před procesem odstranění zbytkového amoniakálního dusíku v půdě, zvyšuje koncentrace dusičnanů, a tím se snižuje potenciál této vody pro možnou závlahu.

Pro další postup v této práci není potřeba provádět přesný rozbor aplikované vody, protože použitá voda je použita pro účel následné kalibrace softwaru, který poté hydraulickými a

transportními parametry nadefinuje chování zadané rozpuštěné látky, v našem případě tedy amoniakálního dusíku. Faktem je, že vyčištěné odpadní vody mají na výtoku emisní standardy viz. Kapitola 8.1, takže bychom měli znát kolem jaké hodnoty se dané ukazatelé znečištění pohybují. Všechny hodnoty závlah, srážek a evapotranspirace byly přepočítávány podle potřeby dle pravidla 1 mm = 1 l.m^2.

Experimentální část práce byla provedena na kořenové čistírně odpadních vod (dále KČOV) v obci Dražovice u Vyškova. Obec Dražovice u Vyškova se nachází v okrese Vyškov, v kraji Jihomoravském. KČOV Dražovice patří co do počtu EO k větším realizovaným KČOV v České republice. Vyčištěná odpadní voda je vyústěná do Dražovického potoka.

Obrázek 10: Pohled na kořenová pole KČOV v Dražovicích v roce 2014.

8.1 Emisní standardy ukazatelů přípustného znečištění městských odpadních vod dle nařízení vlády č. 401/2015 Sb.

Tabulka 8: Emisní standardy: přípustné hodnoty (p), maximální hodnoty (m) a hodnoty průměru koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod (zákonyprolidi.cz).

Kategorie	CHSK		BSK		NL		N-NH4+		Ncelk 2), 8), 9)		Pcelk 9)	
ČOV 1) 7)	p 3)	m 4)	p 3)	m 4)	p 3)	m 4)	pr. 5)	m 4), 6)	pr. 5)	m 4), 6)	pr. 5)	m 4)
EO tis.	mg.l-1		mg.l-1		mg.l-1		mg.l-1		mg.l-1		mg.l-1	
< 500	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
0,5 - 2	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2 - 10	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3 10 9)	8 10 9)
10 - 100	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

1) Rozumí se kategorie čistírny odpadních vod vyjádřená v počtu ekvivalentních obyvatel. Ekvivalentní obyvatel (EO) je definovaný produkcí znečištění 60 g BSK_5 za den. Počet ekvivalentních obyvatel se pro účel zařazení čistírny odpadních vod do velikostní kategorie vypočítává z maximálního průměrného týdenního zatížení na přítoku do čistírny odpadních vod během roku s výjimkou neobvyklých situací, přívalových dešťů a povodní. U kategorií ČOV pod 2000 EO lze použít pro účel zařazení čistírny do velikostní kategorie (v tabulce 1a nebo 1b v příloze č. 1 a v tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení) výpočet z bilance v ukazateli BSK_5 v kg za kalendářní rok na přítoku do čistírny vydělený koeficientem 18,7. U nových ČOV se pro zařazení do velikostní kategorie v prvním roce po výstavbě (zkušební provoz) použije návrhový parametr v zatížení BSK5. Po prvotním provedení kategorizace je v případě změny zatížení další kategorizace prováděna až s ukončením platnosti povolení k vypouštění odpadních vod.
2) Celkový dusík je ukazatel, který zahrnuje všechny formy dusíku.
3) Uváděné přípustné koncentrace „p“ nejsou aritmetické průměry za kalendářní rok a mohou být překročeny v povolené míře podle hodnot uvedených v příloze č. 5 k tomuto nařízení. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 3) k tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení.
4) Uváděné maximální koncentrace „m“ jsou nepřekročitelné. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku uvedený v tabulce 1 přílohy č. 4 k tomuto nařízení v souladu se stanovením hodnoty „p“.
5) Uváděné hodnoty jsou aritmetické průměry koncentrací za kalendářní rok a nesmí být překročeny. Počet vzorků odpovídá ročnímu počtu vzorků stanovenému vodoprávním úřadem. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 3) k tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení.

6) Hodnota platí pro období, ve kterém je teplota odpadní vody na odtoku z biologického stupně vyšší než 12°C. Teplota odpadní vody se pro tento účel považuje za vyšší než 12°C, pokud z pěti měření provedených v průběhu dne byla tři měření vyšší než 12°C.
7) Rozbory odtoků z biologických dočišťovacích nádrží, u nichž kolaudační rozhodnutí nabylo právní moci do dne účinnosti tohoto nařízení, se provádějí ve filtrovaných vzorcích, koncentrace celkových nerozpuštěných látek však nesmí přesáhnout hodnotu 100 mg/l.
8) Požadavky na dusík je možno kontrolovat pomocí denních průměrů, jestliže se prokáže, že je takto zajištěna stejná úroveň ochrany vod. V tomto případě denní průměr nesmí přesáhnout 20 mg/l celkového dusíku pro všechny vzorky, jestliže teplota na odtoku biologického stupně čistírny odpadních vod je vyšší nebo rovná 12 st. C. Zohlednění požadavků na funkci biologického odstranění dusíku a plnění limitů při teplotách na odtoku nižších než 12 st. C může být nahrazeno zohledněním pro časově určené zimní období podle oblastních klimatických podmínek, které stanoví vodoprávní úřad u tohoto ukazatele znečištění.
9) Tento emisní limit stanoví vodoprávní úřad pro čistírnu odpadních vod vybavenou technologickým stupněm pro odstraňování fosforu. U ostatních čistíren odpadních vod stanoví tento limit v případě, že to tak vyplyne ze stanovení emisních limitů kombinovaným přístupem.

9 METODIKA MĚŘENÍ

Pro účel zpracování metodiky měření byl zvolen postup srovnávající vývoj kvality předčištěné odpadní vody ve čtyřech filtračních kolonách:

- Kolona naplněná pískem – simulující vrstvu písčité zeminy
- Kolona naplněná hlínou – simulující vrstvu hlinité zeminy
- Kolona naplněná hlinitým pískem – simulující vrstvu zeminy tvořenou hlinitým pískem v poměru H:P = 1:3
- Kolona naplněná hlinitým pískem – plnící funkci jakési kontroly předchozí kolony

Metodika měření byla zvolena na základě požadovaných výstupu. Cílem měření bylo stanovit množství znečišťujících látek z předčištěné odpadní vody, která byla dále použita jako voda závlahová a následně stanovit kvalitu této vody na výstupu z filtračních kolon. V průběhu experimentální části byla také měřená závlahová dávka a půdní vlhkost v kolonách. Měření probíhalo od 23. 6. 2016 do 15. 9. 2016. Celkově odebraných vzorků bylo 6 a naměřených hodnot 250.

9.1 Filtrační kolony

Pro experiment byly vytvořeny 4 filtrační kolony. Pro zhotovení filtračních kolon bylo použito kanalizační hladké potrubí PVC DN300 o délce 2 metrů. Kolony byly svisle uloženy do asi 5 cm vysokých plechový nádobek, a to proto, aby se v nich alespoň částečně kumulovala voda pro snadnější odběr vzorků. Pro zabránění sufoze filtrační náplně bylo zapotřebí dát přibližně 10 cm vrstvu hrubého štěrku a na to 10 cm vrstvu jemného stěrku. Filtrační náplň byla postupně přidávána a zhutňována pomocí ručního ocelového zhutňovače. Filtrační náplň u všech kolon tvoří vrstvu o tloušťce 1670 mm. Tepelná izolace kolony je částečně dosažená samotnou stěnou potrubí a přibližně 2 cm vrstvou textilní plachty s PVC povrchem.

Obrázek 11: Spodní část kolon a místo pro odběr vzorků vody.

Obrázek 12: Pohled na závlahový systém a rostliny v horní části kolon.

Pro zvětšení imitace simulace reálného stavu byly zasazeny rostliny, ovlivňují evapotranspiraci a transpiraci. Transpirace a evapotranspirace sníží množství vody, které se infiltruje do filtrační kolony. Evapotranspirace určuje druh zeleně na povrchu půdy, a velikost transpirace je dána věrnostními, teplotními a geologickými podmínkami.

Obrázek 13: Pohled na experimentální filtrační kolony.

9.2 Odběr vody pro kalibraci

S ohledem na výše uvedené a obecně známé a uváděné běžné znečištění v komunální odpadní vodě (CHSK, BSK, P, NL, apod.) je pracováno také s budoucím modelem. Je potřeba si uvědomit, že rozkladem přitékající organické hmoty se ve specifických případech může do vody uvolňovat i amoniakální dusík, nicméně pro účely numerického modelování bylo veškeré znečištění potlačeno (neuvažováno). Numerický model byl v dalších krocích kalibrován pouze na koncentraci amoniakálního dusíku. Jelikož vyčištěná odpadní voda obsahuje i výše uvedené znečištění, není možné dosáhnout modelem vyšší spolehlivosti – jak je uvedeno v kapitole 10.6.

Tzn., znečištění CHSK, BSK a NL v předčištěné vodě (voda sloužící k závlaze filtračních kolon) je možné pro účely zpracování specificky zaměřeného modelu do jisté míry zanedbat. Cílem celého inverzního výpočtu je nalezení konkrétních sorpčně-hydraulických parametrů, které lze

následně použít pro prostředí tvořené stejným materiálem. Zároveň je možné toto prostředí zatížit vyššími průtoky nebo koncentracemi znečištění, na které byl model kalibrován.

Pro účely budoucí kalibrace numerického modelu bylo potřeba vytvořit datovou řadu odběrů vzorků vody v čase. Vzorky vody byly odebírány ze dvou míst (přítok a odtok). Přitékající (závlahová) voda byla nejprve předčištěna mechanickým předčištěním (odtok z usazovací nádrže) a následně vertikálním skrápěným filtrem s vegetací. Vzorky svou kvalitou odpovídaly odtoku z běžně provozovaných mechanicko-biologických čistíren, případně soustavě vícekomorový septik + vertikální filtr s vegetací. Vzorky byly odebírány v malé akumulační nádobě, v níž bylo umístěno čerpadlo zajišťující závlahu vyčištěnou odpadní vodou. Výsledky vybraného znečištění dávkované vody na vstupu do filtračních kolon jsou zobrazeny v Tabulce 9.

Vzorky vody, která postupně profiltrovala jednotlivými filtračními kolonami, byly odebírány ze speciálních plechových mělkých nádob, přičemž každá filtrační kolona je podložena vlastní plechovou nádobou. Odběrné místo pod filtračními kolonami bylo chráněno proti slunečnímu svitu a proti vnosu mechanického znečištění nepropustnou stříbrnou fólií, přičemž se zároveň předpokládá odraz tepla v letním období. Vzorky byly bezprostředně po odběru umístěny v chladicím boxu a nejpozději dvě hodiny po odběru byly analyzovány v laboratoři VHK. Výsledky měření vody na výstupech z jednotlivých kolon jsou pro NH_4^+-N zobrazeny v kapitole 10.2. v Tabulce 12.

Tabulka 9: Výsledky rozboru závlahové vody na vstupu do filtračních kolon.

čas den	NH_4^+ - N $mg.l^{-1}$	CHSK $mg.l^{-1}$
1	11,8	49,0
14	27,4	74,2
36	18,4	43,4
42	19,2	72,2
49	23,3	-
62	27,3	-
81	23,9	64,6

Tabulka 10: Výsledky rozboru závlahové vody na výstupu z filtračních kolon.

den	NH_4^+ - N [mg.l^{-1}]			
čas	K1	K2	K3	K4
1	1,880	0,860	0,803	2,070
14	0,168	0,312	0,435	1,500
36	0,001	0,004	0,080	0,547
42	0,001	0,010	0,001	0,250
49	0,001	0,038	0,001	0,010
62	0,090	0,440	0,166	0,440
81	0,118	0,148	0,001	0,148

Kde K1 je kolona s pískem, K2 je kolona s hlínou, K3 je kolona s hlinitým pískem I a K4 je kolona s hlinitým pískem II.

9.3 Sledované parametry (vstupní okrajová podmínka)

Tato podkapitola se věnuje ukazatelům, které bylo potřeba měřit nebo stanovit jako vstupní data do softwaru Hydrus. U každého ukazatele je vždy jeho charakteristika a role v této práci. Jednotlivé výsledky ukazatelů jsou uvedeny v kapitole 10.2.

9.3.1 Amoniakální dusík

Amoniakální dusík je zásadním měřeným ukazatelem v této práci. Jeho přípustná koncentrace na výtoku je stanovena nařízením vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.

Většina dusíku, který se vyskytuje ve vodách, pochází z atmosférických srážek a splachů ze zemědělských půd. Méně než 20% pochází ze splašků. Amoniakální dusík patří mezi zvláštní ukazatele chemického složení vod, podle nichž se povrchové vody řadí do tříd čistoty. Zvyšování koncentrace dusíkatých látek může vést k přemnožení řas a sinic ve vodách**.** Amoniakální dusík působí velmi toxicky na ryby. Toxicita však závisí do značné míry na hodnotě pH vody, protože toxický účinek má nedisociovaná molekula NH_3, nikoli iont NH_4^+. Pitná voda obsahuje maximálně do 0,5mg.l^{-1} NH_4^+-N a 0,01mg.l^{-1} NH_3. Čisté povrchové a podzemní vody obsahují do 0,1mg.l^{-1} NH_4^+-N, dešťové vody mg až desítky mg.l^{-1} NH_4^+-N, splaškové odpadní vody desítky mg.l^{-1} NH_4^+-N, rybníčky a močůvky stovky mg.l^{-1} NH_4^+-N (Horáková M., 2003).

Stanovení NH4+-N na spektrofotometru DR 3900

Potřeby: kyvety HACH amonné ionty v rozsahu 2,0 – 47,0 mg.l^{-1} NH_4-N, stojan na kyvety, pipeta, spektrofotometr DR 3900 HACH, PE láhve se šroubovým uzávěrem

Postup:

- pomocí skleněné lahvičky se odebere vzorek vody z každé nádobky z pod kolony
- během stanovení postupuji podle pracovního postupu předepsaným výrobcem HACH
- nejdříve vzorky vody nechám ohřát na pokojovou teplotu přibližně 20 °C
- připravím kyvetu odstraněním fólie ze šroubovacího uzávěru a odšroubováním uzávěru
- odpipetuji 0,2 ml vzorku vody, ihned zašroubuji uzávěr a párkrát silně zatřesu
- stejný postup provedu se zbylými vzorky a nechám 15 minut odstát
- po 15 minutách pečlivě kyvety očistím a vyhodnotím spektrofotometrem DR 3900

Výsledek: Výsledkem měření je reakce amonných iontů při pH 12,6 s ionty chlornanu a salicytanu za přítomnosti nitroprusidu sodného jako katalyzátoru za vzniku indofenolové modré.

9.3.2 Půdní vlhkost

Voda se v půdě vyskytuje od prakticky zanedbatelného množství v suché půdě až po úplné zaplnění všech půdních pórů v mokré půdě, což nastává při dosažení hodnoty plné vodní kapacity. Poměr množství vody k pevné fázi půdy je vyjádřen hodnotami hmotnostní nebo objemové vlhkosti. Momentní vlhkost půdy, to znamená, že její obsah v daném okamžiku je základní kvantitativní charakteristikou vztahu půdy a vody. Je dána poměrem hmotnosti nebo objemu půdní vody k hmotnosti nebo objemu vysušené půdy.

Kontinuální měření půdní vlhkosti je klíčové, protože půdní vlhkost zásadně ovlivňuje transport rozpuštěných látek a také její průběh definuje hydraulické parametry zeminy. Z těchto důvodu byly nainstalovány do každé kolony snímače objemové vlhkosti půdy VIRRIB, a to vždy v hloubce 50 cm od horního okraje zeminy.

9.3.3 Množství závlahové vody

Závlahová voda má za úkol simulovat situaci, kdy je v praxi prováděná závlaha. Četnost dávkování závlahové vody byla dána atmosférickými podmínkami. Automatické zavlažovací zařízení bylo seřízeno tak, aby vlhkost v půdě dosahovala po celou dobu hodnoty 35 %. V případě, že došlo k průsaku vody do nižších vrstev, resp. došlo prostřednictvím evapotranspirace ke snížení vlhkosti, spustilo se čerpadlo na čas 1 minuta. Samotné čerpadlo je zapojeno přes průtokoměr z důvodu možnosti odečtu množství dávkované vody v průběhu

vegetační sezóny. Vždy během odebírání vzorků se odečetla hodnota na průtokoměru a dané množství se propočítalo na denní dávku v předchozím období. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v kapitole 10.2 v Tabulce 15.

9.3.4 Srážky

Stanovení úhrnu je důležité, protože přímo ovlivňuje půdní vlhkost. Úhrn srážek byl měřen v těsné blízkosti testovacích filtračních kolon pomocí ombrometru bez záznamového zařízení. Měření probíhalo přepočtem přes zjištěné množství akumulované vody vždy za období mezi dvěma odběry vzorků. Z důvodu znalosti přesného dne, kdy došlo k srážkové situaci, byla data porovnána s meteorologickou stanicí v obci Bohaté Málkovice, která se nachází nejblíže k testované lokalitě (vzdušnou přímou čarou přibližně 5 km). Každý úhrn v období, kdy probíhalo měření, tedy v čase 81 dnů, byl pro konkrétní den přepočítán jako objem vody přitékající na povrch dané filtrační kolony. Pro zjednodušení (definice numerického modelu) se předpokládalo, že tento úhrn nastal v průběhu celého dne. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v kapitole 10.2 v Tabulce 14.

9.3.5 Evapotranspirace

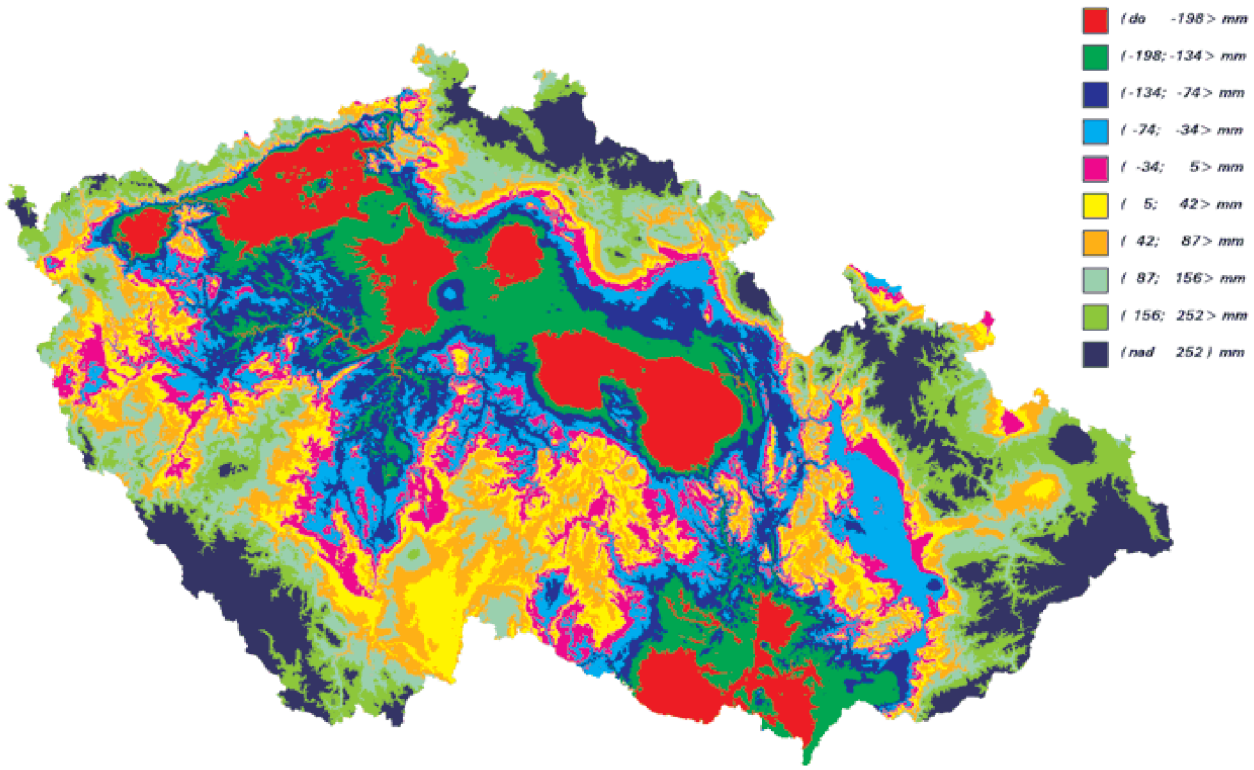
Pro vznik evapotranspirace jsou zapotřebí tyto podmínky – dostatečný přísun tepelné energie a dostatečný přísun vody (Švec, 2010). Podíl evapotranspirace na vodní bilanci povodí, či ekosystém závisí především na klimatických poměrech oblasti a na vegetačním krytu a jeho vlastnostech (Střelcová, 2005). Nejsou důležité jen meteorologické činitele a biometrické charakteristiky rostlinného porostu, ale také množství dostupné vody v kořenové zóně půdního profilu (Matějka, 1995).

Mezi faktory, které ovlivňují evapotranspiraci, patří:

- sluneční radiace
- teplota vypařujícího povrchu
- sytostní doplněk a vlhkost vzduchu
- skupenské teplo vypařování
- rychlost větru
- atmosférický tlak
- charakter vypařujícího povrchu
- kvalita vody

Evapotranspirace skládající se z evaporace transpirace nebyla stanovena na základě měření, a to z důvodu náročnosti tohoto měření. Pro účely výzkumu nebylo možné stanovit reálnou

evapotranspiraci, proto se přistoupilo k aplikaci potenciální evapotranspirace. Potenciální evapotranspirace se získala na základě mapy zobrazující rozdíl mezi ročními srážkami a evapotranspiraci a průměrnou hodnotou ročních srážek pro Jižní Moravu převzatou z webu českého hydrometeorologického ústavu. Tato mapa je zobrazena na Obrázku 14. Průběh evapotranspirace během roku byl odhadnutý a je uveden v kapitole 10.2.6. Celková odhadovaná hodnota evapotranspirace je 500 mm.rok^{-1}.



Obrázek 14: Rozdíly mezi ročními srážkami a evapotranspiraci (aretin.cz)

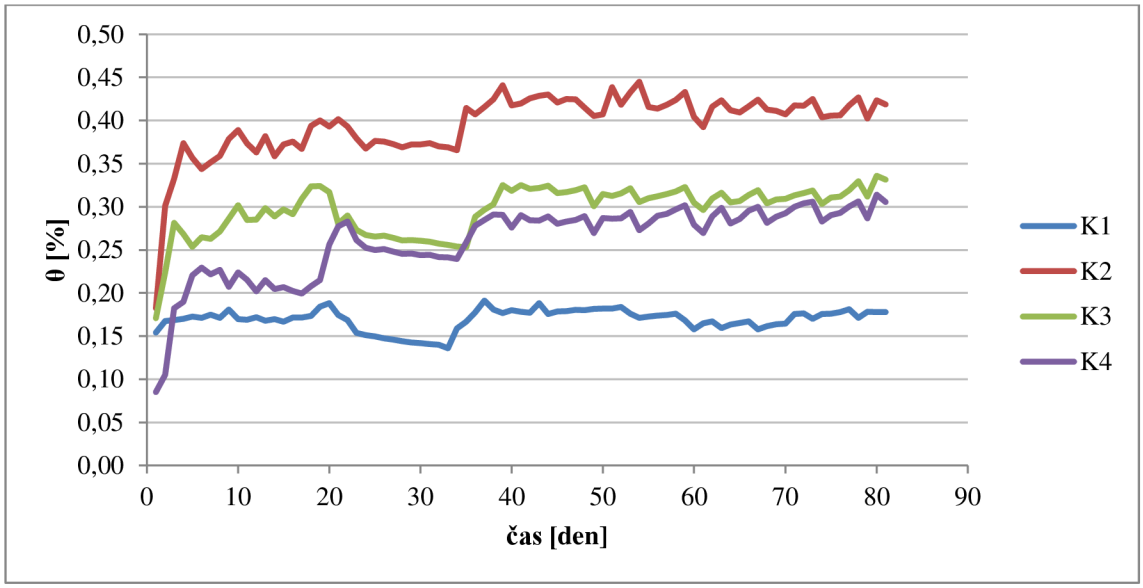
10 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ V SOFTWARU HYDRUS 2D/3D

10.1 Definice cílů

Cílem této části práce je kalibrace software HYDRUS pomocí naměřených dat, a to za účelem následného zjištění průběhu infiltrace předčištěné odpadní závlahové vody a jejího znečištění. Jednoduše řečeno, předmětem je to, jak se daná látka bude chovat v určitém druhu zeminy s ohledem na její transport pomocí vody. Zkoumání veškerých probíhajících procesů během infiltrace závlahové vody do půdy nejsou předmětem této práce. V první řadě bylo potřeba zjistit hydraulické parametry jednotlivých typů půd, a to pomocí inverzního řešení, kdy se teoretický stav s určitou spolehlivostí přibližuje k tomu reálnému. Následně pomocí spočítaných hydraulických parametrů stejným postupem, jak tomu bylo v první části, tedy pomocí inverzního řešení se spočítají parametry definující transport rozpuštěných látek. Tyto parametry budou v další kapitole aplikovány pro různé možné reálné situace.

10.2 Vstupní data

10.2.1 Objemová vlhkost půdy



Graf 1: Průběh oblemové vlhkosti jednotlivých zemin během měření.

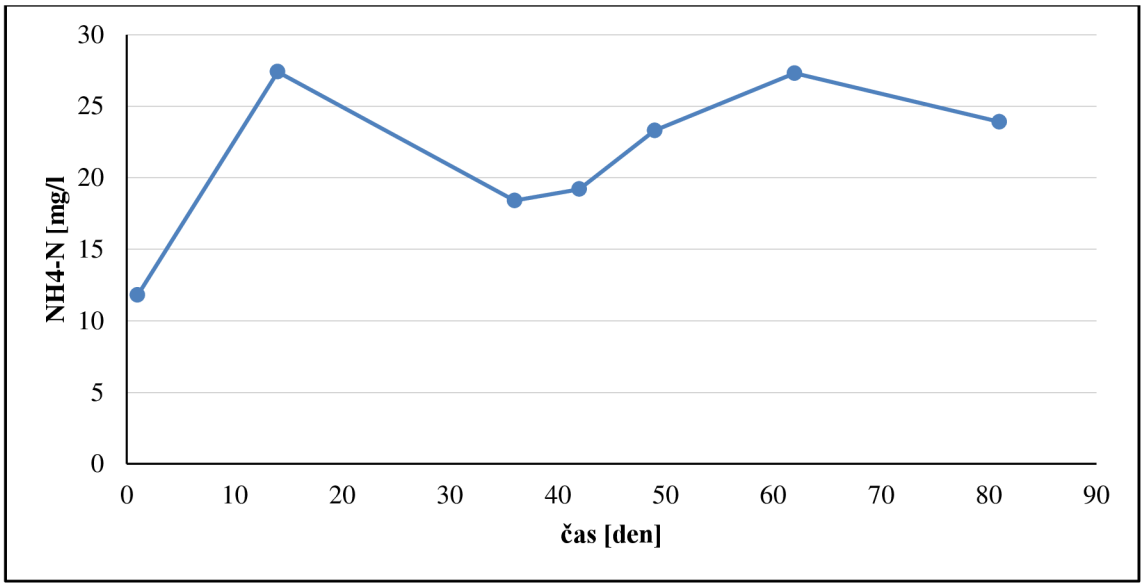
Tabulka 11: Naměřené hodnoty snímačem objemové vlhkosti v hloubce 500 mm.

čas	θ [%]				čas	θ [%]			
dny	K1	K2	K3	K4	dny	K1	K2	K3	K4
1	0,154	0,182	0,171	0,085	42	0,177	0,426	0,321	0,284
2	0,167	0,301	0,224	0,105	43	0,188	0,429	0,322	0,284
3	0,169	0,333	0,281	0,182	44	0,176	0,430	0,324	0,289
4	0,170	0,374	0,268	0,190	45	0,179	0,421	0,316	0,280
5	0,173	0,357	0,254	0,220	46	0,179	0,425	0,317	0,283
6	0,171	0,344	0,265	0,229	47	0,180	0,425	0,319	0,285
7	0,175	0,351	0,263	0,222	48	0,180	0,415	0,322	0,289
8	0,171	0,359	0,271	0,227	49	0,182	0,405	0,301	0,269
9	0,181	0,379	0,286	0,207	50	0,182	0,407	0,315	0,287
10	0,170	0,389	0,302	0,224	51	0,182	0,439	0,312	0,286
11	0,169	0,373	0,285	0,215	52	0,184	0,418	0,315	0,287
12	0,172	0,363	0,285	0,202	53	0,176	0,433	0,321	0,294
13	0,168	0,382	0,298	0,215	54	0,171	0,445	0,306	0,273
14	0,170	0,359	0,289	0,205	55	0,173	0,416	0,310	0,280
15	0,167	0,372	0,297	0,207	56	0,174	0,414	0,312	0,289
16	0,171	0,376	0,292	0,202	57	0,175	0,418	0,315	0,292
17	0,172	0,367	0,309	0,199	58	0,176	0,424	0,318	0,297
18	0,174	0,394	0,324	0,208	59	0,168	0,433	0,323	0,302
19	0,184	0,400	0,324	0,215	60	0,158	0,404	0,305	0,279
20	0,188	0,393	0,317	0,256	61	0,165	0,392	0,296	0,269
21	0,175	0,402	0,280	0,277	62	0,167	0,416	0,309	0,289
22	0,169	0,393	0,290	0,283	63	0,159	0,423	0,316	0,299
23	0,154	0,379	0,273	0,261	64	0,163	0,412	0,305	0,280
24	0,151	0,367	0,267	0,252	65	0,165	0,409	0,307	0,286
25	0,150	0,376	0,265	0,250	66	0,167	0,416	0,314	0,295
26	0,147	0,376	0,266	0,251	67	0,158	0,424	0,319	0,300
27	0,146	0,373	0,264	0,248	68	0,162	0,413	0,304	0,281
28	0,144	0,369	0,261	0,245	69	0,164	0,411	0,308	0,288
29	0,143	0,372	0,261	0,246	70	0,165	0,407	0,309	0,293
30	0,142	0,372	0,261	0,244	71	0,176	0,417	0,313	0,300
31	0,141	0,374	0,259	0,244	72	0,176	0,417	0,316	0,304
32	0,140	0,370	0,257	0,242	73	0,170	0,425	0,319	0,306
33	0,136	0,369	0,256	0,241	74	0,176	0,404	0,303	0,283
34	0,159	0,365	0,254	0,240	75	0,176	0,406	0,311	0,290
35	0,167	0,414	0,253	0,259	76	0,178	0,406	0,312	0,293
36	0,177	0,407	0,288	0,278	77	0,181	0,418	0,319	0,300
37	0,191	0,416	0,297	0,285	78	0,171	0,427	0,330	0,306
38	0,181	0,425	0,303	0,291	79	0,178	0,402	0,312	0,287
39	0,177	0,441	0,325	0,290	80	0,178	0,423	0,336	0,314
40	0,180	0,417	0,319	0,276	81	0,178	0,419	0,331	0,306
41	0,178	0,420	0,325	0,290					

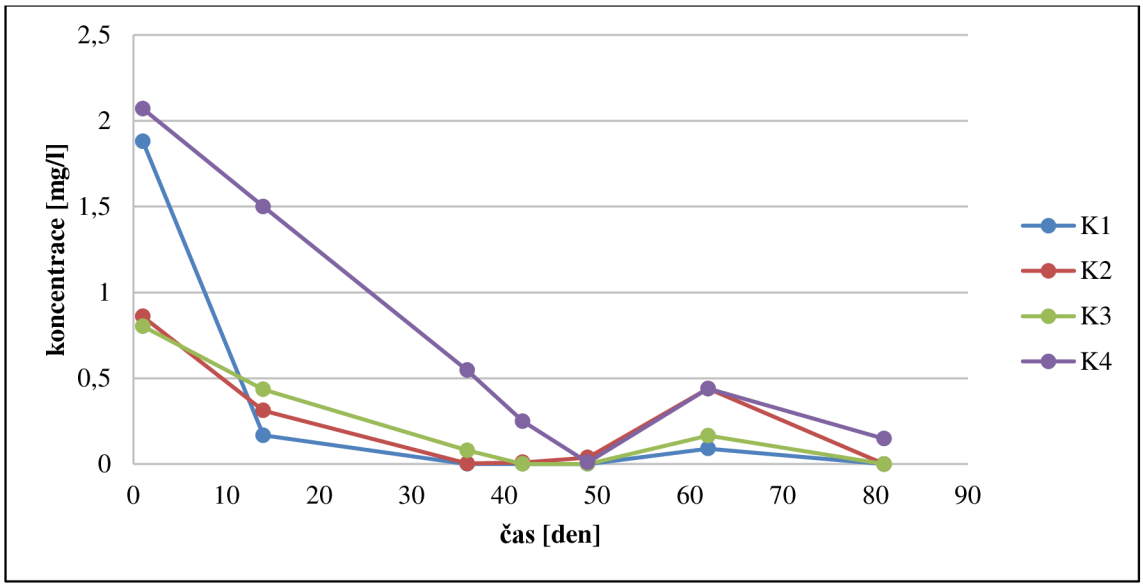
10.2.2 Koncentrace NH_4^+-N

Tabulka 12: Koncentrace NH_4^+-N na vstupu do experimentálních kolon.

čas den	NH_4^+-N $mg.l^{-1}$
1	11,8
14	27,4
36	18,4
42	19,2
49	23,3
62	27,3
81	23,9



Graf 2: Vstupní okrajová podmínka koncentrace NH_4^+-N přitékající vody na horní okraj testovaných filtračních kolon.

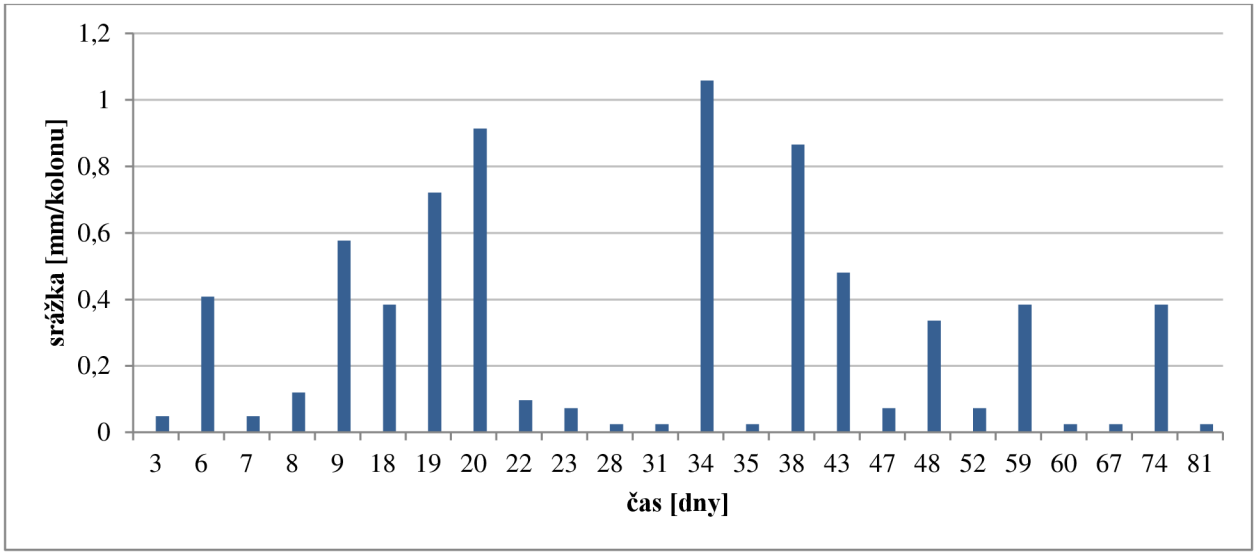


Graf 3: Průběh koncentrace NH_4^+-N na výstupu s experimentálních kolon.

Tabulka 13: Kalibrace numerického modelu – data: koncentrace NH4-N na odtoku z filtračních kolon.

čas	NH_4^+ - N [mg.l^{-1}]			
den	K1	K2	K3	K4
1	1,880	0,860	0,803	2,070
14	0,168	0,312	0,435	1,500
36	0,001	0,004	0,080	0,547
42	0,001	0,010	0,001	0,250
49	0,001	0,038	0,001	0,010
62	0,090	0,440	0,166	0,440
81	0,118	0,148	0,001	0,148

10.2.3 Atmosférické srážky

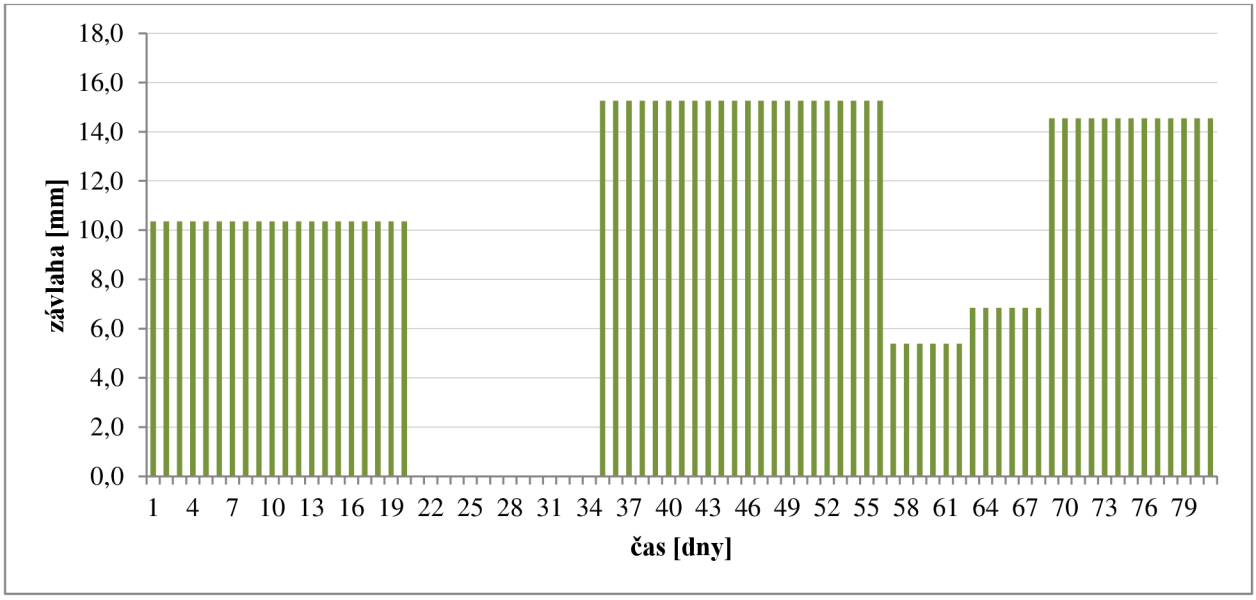


Graf 4: Průběh koncentrace NH_4^+-N na výstupu z experimentálních kolon (www.amet.cz).

Tabulka 14: Srážky v období měření (www.amet.cz).

datum -	čas dny	srážka mm.kolonu^{-1}
27.6.	3	0,05
30.6.	6	0,41
1.7.	7	0,05
2.7.	8	0,12
3.7.	9	0,58
12.7.	18	0,38
13.7.	19	0,72
14.7.	20	0,91
16.7.	22	0,10
17.7.	23	0,07
21.7.	28	0,02
24.7.	31	0,02
27.7.	34	1,06
28.7.	35	0,02
31.7.	38	0,87
5.8.	43	0,48
9.8.	47	0,07
10.8.	48	0,34
14.8.	52	0,07
21.8.	59	0,38
22.8.	60	0,02
29.8.	67	0,02
5.9.	74	0,38
17.9.	81	0,02

10.2.4 Závlaha



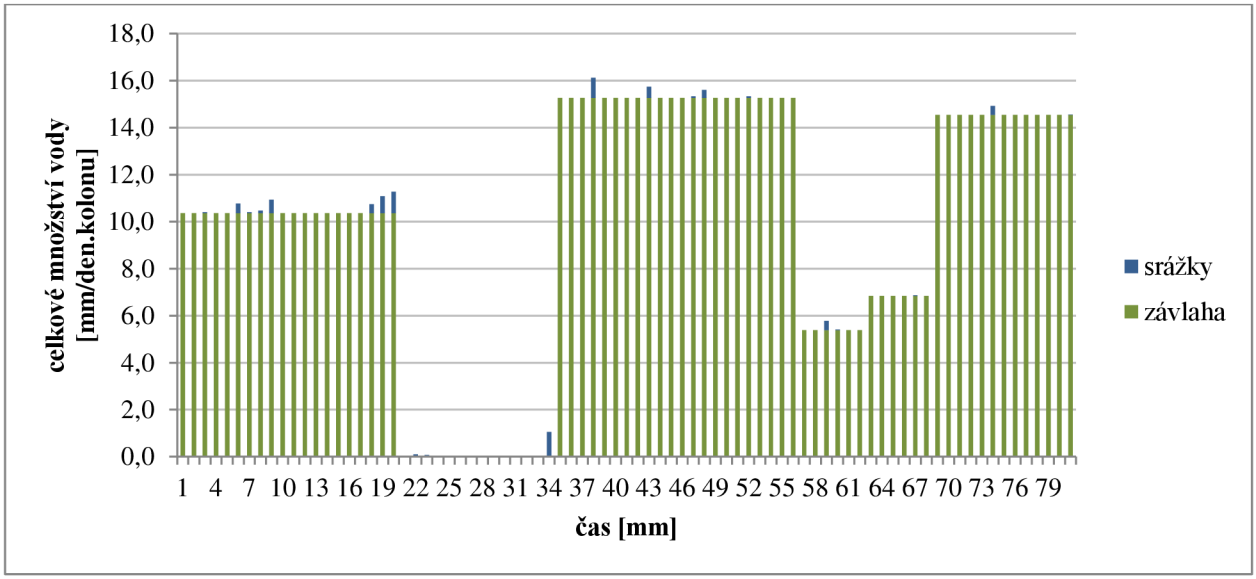
Graf 5: Průběh závlahy během měření (www.amet.cz).

Tabulka 15: Hodnoty závlahové dávky během měření.

čas dny	závlaha mm.kolonu^{-1}	čas dny	závlaha mm.kolonu^{-1}	čas dny	závlaha mm.kolonu^{-1}
1	10,4	28	0,0	55	15,3
2	10,4	29	0,0	56	15,3
3	10,4	30	0,0	57	5,4
4	10,4	31	0,0	58	5,4
5	10,4	32	0,0	59	5,4
6	10,4	33	0,0	60	5,4
7	10,4	34	0,0	61	5,4
8	10,4	35	15,3	62	5,4
9	10,4	36	15,3	63	6,8
10	10,4	37	15,3	64	6,8
11	10,4	38	15,3	65	6,8
12	10,4	39	15,3	66	6,8
13	10,4	40	15,3	67	6,8
14	10,4	41	15,3	68	6,8
15	10,4	42	15,3	69	14,5
16	10,4	43	15,3	70	14,5
17	10,4	44	15,3	71	14,5
18	10,4	45	15,3	72	14,5
19	10,4	46	15,3	73	14,5
20	10,4	47	15,3	74	14,5
21	0,0	48	15,3	75	14,5
22	0,0	49	15,3	76	14,5
23	0,0	50	15,3	77	14,5
24	0,0	51	15,3	78	14,5

25	0,0	52	15,3	79	14,5
26	0,0	53	15,3	80	14,5
27	0,0	54	15,3	81	14,5

10.2.5 Celkové množství vody



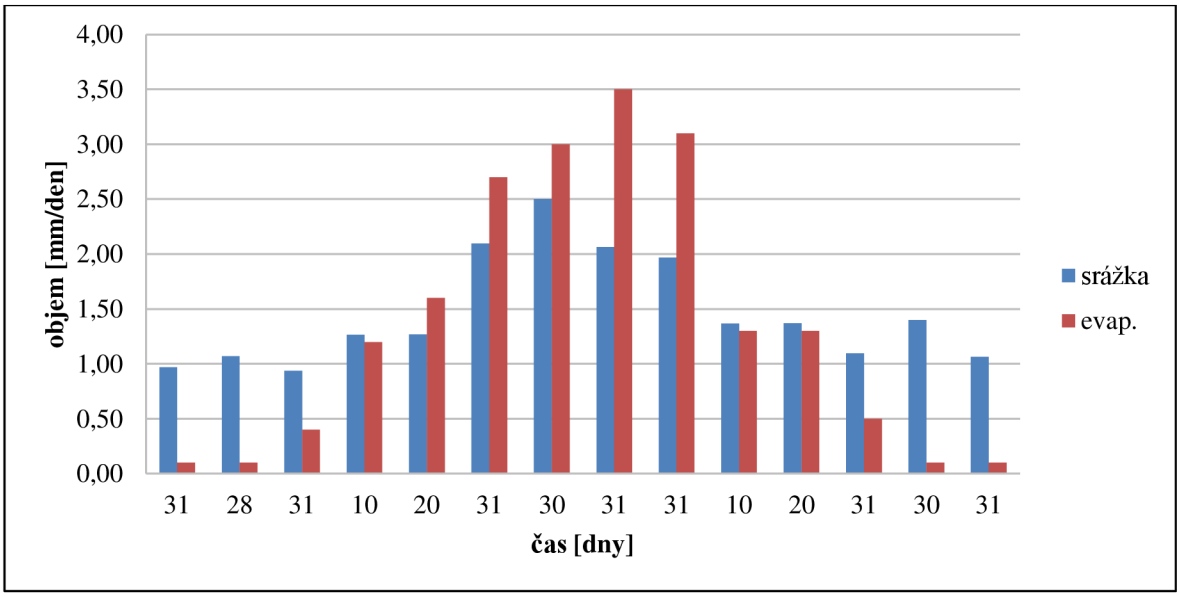
Graf 6: Porovnání průběhu závlahy a srážek během měření (www.amet.cz).

Tabulka 16: Hodnoty celkového objemu vody vstupující do experimentální kolony.

čas dny	voda mm.kolonu^{-1}	čas dny	voda mm.kolonu^{-1}	čas dny	voda mm.kolonu^{-1}
1	10,36	28	0,00	55	15,26
2	10,36	29	0,00	56	15,26
3	10,40	30	0,02	57	5,39
4	10,36	31	0,00	58	5,77
5	10,36	32	0,00	59	5,41
6	10,76	33	1,06	60	5,39
7	10,40	34	0,02	61	5,39
8	10,48	35	15,26	62	5,39
9	10,93	36	15,26	63	6,84
10	10,36	37	16,12	64	6,84
11	10,36	38	15,26	65	6,84
12	10,36	39	15,26	66	6,87
13	10,36	40	15,26	67	6,84
14	10,36	41	15,26	68	6,84
15	10,36	42	15,74	69	14,54
16	10,36	43	15,26	70	14,54
17	10,36	44	15,26	71	14,92
18	10,74	45	15,26	72	14,54
19	11,08	46	15,33	73	14,54
20	11,27	47	15,60	74	14,54

21	0,00	48	15,26	75	14,54
22	0,10	49	15,26	76	14,54
23	0,07	50	15,26	77	14,54
24	0,00	51	15,33	78	14,54
25	0,00	52	15,26	79	14,54
26	0,00	53	15,26	80	14,54
27	0,02	54	15,26	81	14,54

10.2.6 Evapotranspirace



Graf 7: Průběh evapotranspirace a srážek v jednotlivých měsících.

Evapotranspirace byla zadaná do HYDRUSU pouze pro tříletou modelaci tří variant struktury půdy. V Grafu 7 a Tabulce 17 jsou měsíce duben a září rozděleny podle toho kdy v dubnu začíná pěstování ranních brambor a kdy v září končí. Vybrání pěstování brambor je pouze pro účel určení potřebné závlahové dávky viz. kapitola 11.

Tabulka 17: Objemy evapotranspirace a srážek v jednotlivých měsících.

měsíc -	čas dny	srážka $mm.den^{-1}$	evap. $mm.den^{-1}$
leden	31	0,97	0,88
únor	28	1,07	0,89
březen	31	0,94	0,9
duben	10	1,27	1,22
duben	20	1,27	1,22
květen	31	2,10	2,08
červen	30	2,50	2,48
červenec	31	2,06	2,04
srpen	31	1,97	1,92
září	10	1,37	1,32

září	20	1,37	1,32
říjen	31	1,10	0,9
listopad	30	1,40	0,89
prosinec	31	1,06	0,88

10.3 Zjednodušující předpoklady

Verze HYDRUSU, se kterým jsme pracovali, nerozezná, o jakou znečišťující látku se jedná, rovněž nebere v úvahu, v jakých jednotkách je koncentrace zadaná. V našem případě počítá s koncentraci NH_4-N jako s číslem. Jak už bylo zmíněno, jde především o to, zjistit do jaké hloubky se dané znečištění může teoreticky infiltrovat. Tento postup zcela neodpovídá reálnému stavu, protože se nezaobírá celou řadou procesů a interakcí, které probíhají mezi jednotlivými ukazateli znečištění. Mezi tyto ukazatele patří hlavně BSK a CHSK, které stejně jako NH4-N spotřebovávají značné množství kyslíku. Důležitá je také koncentrace celkového organického uhlíku, která zásadně určuje růst nitrifikačních a denitrifikačních bakterií. Průběh procesu nitrifikace a denitrifikace je zcela klíčový pro konečnou koncentraci amoniaku, dusitanů a dusičnanů, které se infiltrují do spodní vody, a tím ovlivňují její kvalitu. Se všemi biochemickými procesy se také v tomto experimentu zanedbávají veličiny, jako teplota půdy a pH půdy, které tyto procesy ovlivňují.

10.4 Tvorba modelu

10.4.1 Geometrie modelu

Při tvorbě modelu je prvním krokem definice tvarů, sklonu, rozměrů a počet dimenzí modelu. Nastavení geometrie proběhlo v našem případě následovně. Byl zvolen dvourozměrný typ geometrie s horizontální a vertikální složkou XZ. V modelu se rozměry zeminy shodují s rozměry experimentálních zemin, tedy 300 mm na šířku a 1670mm na výšku. V modelaci tří různých struktur půd byly rozměry změněny na 1000 mm na šířku a 8000 mm na výšku. Zadaný sklon byl v obou případech nulový.

10.4.2 Výběr simulačních procesů

V této části nastavení softwaru je potřeba vybrat jakou simulaci chceme provést. V našem případě je to simulace proudění, anebo simulace transportu látek. V první části kalibrace softwaru, kdy potřebujeme zjistit hydraulické a transportní parametry zeminy, počítáme se simulaci proudění. V druhé části kalibrace pak se simulací transportu látek. Dále je potřeba

v tomto kroku rozhodnout, zdali budeme potřebovat inverzní řešení, v našem případě tomu tak je. V další části práce, kde už známe potřebné parametry, není inverzního řešení zapotřebí.

10.4.3 Časově proměnné okrajové podmínky

Hodnoty, které se v tomto kroku zadávají, jsou vysoce důležité. Definují průběh hodnot parametrů v čase, které vstupují do simulačního procesu, anebo z něho vystupují. V našem případě se jedná o hodnoty srážek, závlahy, evapotranspirace a koncentrace na vstupu do modelu.

10.4.4 Data pro inverzní řešení

Data pro inverzní řešení jsou klíčové pro kalibraci softwaru. Zdrojem dat jsou výsledky měření na experimentálních kolonách. V softwaru je vždy potřeba nadefinovat v jakém bodě modelu byla tato data získaná a o jaký typ dat se jedná. Pro kalibraci simulace proudění jsme aplikovali naměřená data objemové vlhkosti a pro kalibraci simulace transportu rozpuštěných látek byly použity naměřené hodnoty na odtoku z experimentálních dat.

10.4.5 Časové charakteristiky

V časových charakteristikách byla nastavena časová jednotka na dny. Pro modelaci experimentálních kolon byl nastaven čas v rozmezí 0–81, tedy doba, po kterou bylo prováděno měření. Pro modelaci různých struktur půdy byl nastaven čas v rozmezí 0 – 1095, tedy tří let, a to z toho důvodu, aby se ověřilo, jestli bude docházet k akumulaci amoniakálního dusíku. Poslední kolonka, kterou bylo potřeba v této části vyplnit, byl celkový počet proměnných okrajových podmínek pro každý časový výpočetní krok.

10.4.6 Modelování půdního prostředí

Pro modelaci experimentálních kolon byla vytvořena výpočtová trojúhelníková sít konečných prvků. Do softwaru byl potřeba zadat počet uzlů v horizontálním a vertikálním směru. V obou směrech byl vytvořen stejný počet uzlů, tedy 11. Relativní velikost konečných prvků nebyla upravována a pro oba směry byla zachována hodnota 1. Pro modelaci různých variant zemin byla vytvořena stejná výpočtová sít s jediným rozdílem, a to, že počet uzlů ve vertikálním směru byl 17.

10.4.7 Výběr hydraulického modelu

V tomto kroku je zapotřebí vybrat jaký chceme použít výpočetní model pro simulaci proudění. Jelikož byl vybrán simulační model podle van Genuchtena, je potřeba se rozhodnout o hysterezi

systému. V tomto případě k hysterezi nebude docházet, protože vstupní veličina závisí jen na nezávislé proměnné vstupní veličině a ne na předchozím stavu.

10.4.8 Transport rozpuštěných látek

Základní informace potřebné pro definování transportu rozpuštěných látek se zadávají v dialogovém okně transportu rozpuštěných látek. V tomto okně se určí prostor a čas systému, iterační kritéria a další informace, jako jednotka hmotnosti, kritérium stability, doba trvání a počet rozpuštěných látek.

Time Weighting Scheme

Bylo vybráno Crank-Nicholson schéma, které se doporučuje s ohledem na přesnost řešení. Jiné možnosti nebyly vybrány, protože plně implicitní schéma někdy vede k numerické disperzi, takže je lepší se vyhnout numerické nestabilitě a explicitní schéma, které je v současné době zakázáno, je z nežádoucích oscilací nejvíce náchylné k numerické nestabilitě.

Space Weighting Scheme

Hydrus nabízí tři možnosti pro prostorové schéma. Vybrali jsme Galerkinovo schéma konečných prvků, které se doporučuje s ohledem na přesnost řešení.

Solute information

Zaškrtnutím políčka koeficientu křivosti pórů bude systém s tímto koeficientem počítat tak, že jsou molekulární koeficienty difúze ve fázích vody a plynu a budou vynásobeny tímto koeficientem podle formulace Millington a Quirkovi [1991]. V kolonce počet rozpuštěných látek je v našem případě jednička, protože se zabýváme pouze amoniakálním dusíkem. Dobra trvání transportu je v první části 81 a v druhé 1095. Do kolonky s kritériem stability byla vepsána dvojka. Toto kritérium se používá, pokud chceme přidat umělou disperzi do Galerkinova schématu konečných prvku, anebo pokud chceme omezit časový krok Galerikova schématu konečných prvků.

Iteration criteria

Maximální počet iterací byl zvolen 10, což je doporučované číslo. Iterační proces tedy proběhne maximálně desetkrát pro každý časový krok, dokud není dosaženo požadovaného výsledku.

Transport parametrs

V tomto okně se nastavují difúzní a disperzní parametry. Více o procesech je napsáno v kapitole 7.4.1 Pohyb rozpuštěných látek. Tyto parametry se nezadávají, jestliže je nastavené inverzní

řešení. To znamená, že parametry byly zadávány až během tvorby modelů simulace tříleté závlahy. V našem případě byly hodnoty zadaných parametrů difúze nulové a hodnoty parametrů disperze pro každou zeminu stejné. Hodnoty parametrů disperze byly ponechány tak, jak je navrhl Hydrus.

Reaction parametrs

V této nerozšířené verzi Hydrusu se v tomto okně nastavují adsorpční parametry. Více o matematickém modelování adsorpce je popsáno v kapitole 7.4.2 Reakční procesy rozpuštěných látek. Během kalibrace Hydrusu byly pomocí inverzního řešení s velkou spolehlivostí stanoveny dva parametry. Názvy a hodnoty těchto parametrů jsou uvedené v kapitole 10.6 Výsledky kalibrace. Více hledaných parametrů znamená menší spolehlivost inverzního řešení a větší pravděpodobnost, že Hydrus nedokončí samotný výpočet.

10.4.9 Počáteční podmínky

Počáteční hodnoty objemové vlhkosti půdy v experimentálních kolonách byly zadány na základě snímače objemové vlhkosti v hloubce 500 mm. Zjednodušujícím předpokladem byly tyto hodnoty zadány do celého profilu. Počáteční objemové vlhkosti pro modelaci tři simulačních variant byly odhadnuty v každém případě stejně v rámci celého profilu modelu. Jak se později ukázalo, tento odhad v tříleté simulaci nebyl nijak podstatný.

Tabulka 18: Počáteční hodnoty objemové vlhkosti půdy.

zemina	θ [-]
K1 - písek	0,142
K2 - hlína	0,189
K3 - hlinitý písek I	0,170
K4 - hlinitý písek II	0,078
varianta 1	0,25
varianta 2	0,25
varianta 3	0,25

Tabulka 19: Počáteční koncentrace pro kalibraci HYDRUSU.

H [mm]	K1 NH_4^+-N [mg.l-$^{-1}$]	K2 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]	K3 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]	K4 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]
1670	8	8	8	8
1503	7,3	7,3	7,3	7,3
1336	6,6	6,6	6,6	6,6
1169	5,9	5,9	5,9	5,9
1002	5,2	5,2	5,2	5,2
835	4,5	4,5	4,5	4,5
668	3,8	3,8	3,8	3,8
501	3,1	3,1	3,1	3,1
334	2,4	2,4	2,4	2,4
167	1,7	1,7	1,7	1,7
0	1	1	1	1

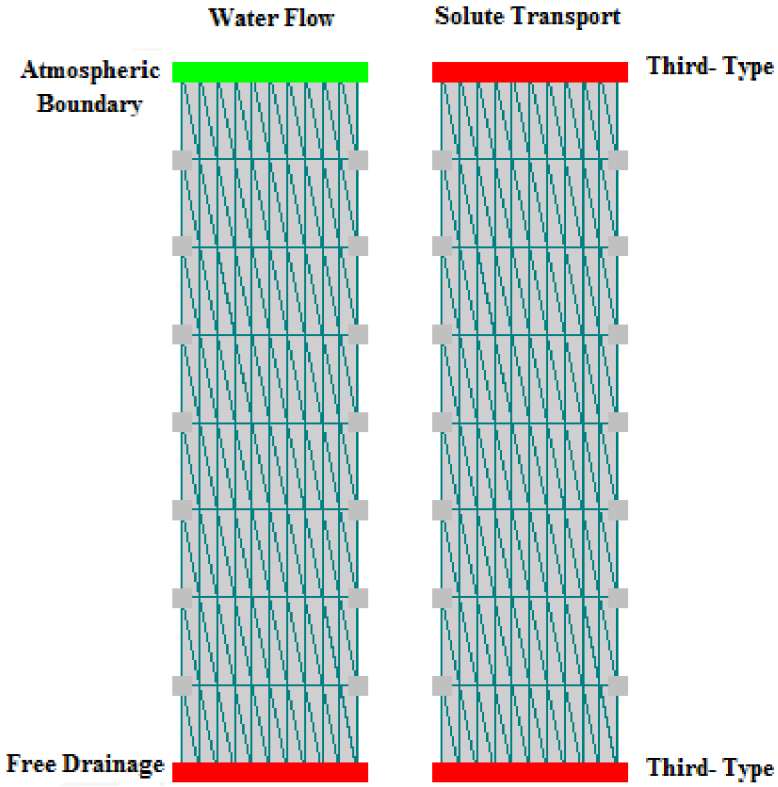
Hodnoty koncentrace amoniakálního dusíku v závislosti na hloubce, které jsou uvedené v Tabulce 20 byly odhadnuté a takto zadané, protože HYDRUS při zadání hodnoty koncentrace všude 0 se nedokázal při hledání inverzního řešení dopočítat konečného výsledku. V tvorbě modelu pro simulaci tří variant struktur půd již bylo možné nastavit počáteční hodnotu koncentrace 0 a to podél celého profilu. V tříleté simulaci takto zadané hodnoty nejsou podstatné.

Tabulka 20: Počáteční koncentrace pro kalibraci HYDRUSU.

H [mm]	varianta 1 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]	varianta 2 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]	varianta 3 NH_4^+-N [mg.l^{-1}]
8000	0,0	0,0	0,0
7500	0,0	0,0	0,0
7000	0,0	0,0	0,0
6500	0,0	0,0	0,0
6000	0,0	0,0	0,0
5500	0,0	0,0	0,0
5000	0,0	0,0	0,0
4500	0,0	0,0	0,0
4000	0,0	0,0	0,0
3500	0,0	0,0	0,0
3000	0,0	0,0	0,0
2500	0,0	0,0	0,0
2000	0,0	0,0	0,0
1500	0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
500	0,0	0,0	0,0
0	0,0	0,0	0,0

10.4.10 Okrajové podmínky

Na všech hranicích oblasti je nutné určit okrajové podmínky. Obrázek 15 znázorňuje nastavení okrajových podmínek pro řešení simulace proudění a transportu rozpuštěných látek v půdě.



Obrázek 15: Znázornění použití okrajových podmínek v simulačních procesech.

Third type

Tato okrajová podmínka se také vyskytuje pod názvem Robinova okrajová podmínka. Tato podmínka definuje tok hmoty přes hranici oblasti modelu v závislosti na koncentraci. Okrajová podmínka třetího typu se používá, když je zadané proudění rozpuštěné látky přes daný okraj. Tento typ okrajové podmínky se běžně používá v mnoha případech. V momentě, kdy je proudění nulové nebo směřuje ven z dané oblasti, tak se okrajová podmínka třetího typu automaticky přepne na typ druhý, tedy Neumannovu okrajovou podmínku. Existuje jedna výjimka tohoto pravidla, a to pro atmosférickou okrajovou podmínku, protože software předpokládá, že rozpuštěná látka nemůže opustit danou oblast proudění přes její hranici, ale povrchem půdy. Pro uživatele softwaru je doporučováno vždy, pokud je to možné, používat třetí okrajovou podmínku, protože je fyzikálně více realistická a v simulovaném systému je zachovává hmotnost rozpuštěné látky (Hydrus, 2006).

Atmosférická okrajová podmínka

Atmosférická okrajová podmínka je tvořena kombinací dvou střídavých okrajových podmínek, a to Neumannovou tokovou okrajovou podmínkou a Dirichletovou tlakovou okrajovou podmínkou. Tlaková okrajová podmínka se aplikuje, pokud je známý tlak na hranici a toková okrajová podmínka se aplikuje, pokud je známý tok, například srážka, závlaha, anebo pro nulový tok například nepropustné podloží (Hydrus, 2006).

Volná drenáž

Na hranici, kde je derivace tlakové výšky vůči hranici nulová, voda odtéká pouze vlivem geodetického gradientu. Tok touto hranicí je tedy roven hodnotě nenasycené hydraulické vodivosti. Použiti této okrajové podmínky je na hranici, kde voda vytéká do půdního prostředí. Zpravidla se používá pro situace, kdy je hladina spodní vody umístěna poměrně hluboko pod danou oblastí (Hydrus, 2006).

Deep drainage

HYDRUS také nabízí tuto okrajovou podmínku, která se používá pro zadání hladiny spodní vody. Pro aplikaci této podmínky je ovšem zapotřebí empiricky určit několik parametrů, které jsou součásti rovnice pro výpočet průtoku odtoku z kapilární zóny do zvodnělé vrstvy. Stanovení těchto parametrů se neuskutečnilo z důvodu velikosti obsahu této práce. Více informaci o okrajové podmínce je uvedeno v manuálu HYDRUSU.

10.5 Kalibrace modelu

Přesnost modelu a jeho vypovídající schopnost je třeba hodnotit také podle míry schematizace problému s vlivem přijatých předpokladů a zjednodušení. Důležitou roli hraje kalibrace modelu, která sestává z upravování a změn určitých parametrů až do dosažení přijatelné shody mezi měřenými a simulovanými hodnotami. Metody optimalizace mohou být dle počtu upravovaných parametrů statistické, ale i založené na intuici řešitele s metodou pokus omyl (Říha, 1997).

10.6 Výsledky kalibrace

Tabulka 21: Parametry definující transport rozpuštěných látek.

označení	zemina	K_d	$Sink_{Ll}$	R^2
-	-	$mm^3.mg^{-1}$	$1.den^{-1}$	-
1	hlína	0,0004	0,0779	0,94
2	hlinitý-písek II	0,0093	0,1496	0,99
3	písek	0,0657	0,2837	0,98
-	hlinitý-písek I	0,0002	0,1099	0,96

Kde jednotlivé uvedené parametry v Tabulce 20 znamenají:

- K_d – k_s – koeficient izotermické adsorpce,
- $Sink_{Ll}$ – μ_w – konstanta prvního řádu pro rychlost rozpuštěných látek (< 1 nanometer).

Tabulka 22: Hydraulické parametry jednotlivých zemin.

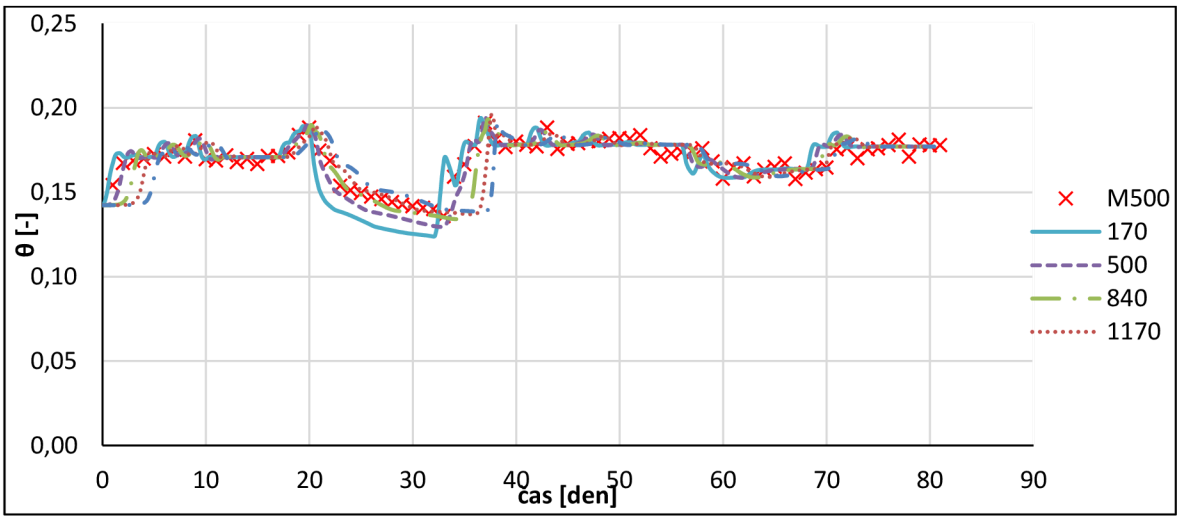
označení	zemina	Q_r	Q_s	α	n	K_s	l	R^2
-	-	-	-	$1.mm^{-1}$	-	$mm.den^{-1}$	-	-
1	hlína	0,133	0,446	0,00006	1,47	178,5	1,155	0,74
2	hlinitý-písek II	0,002	0,422	0,00055	1,56	604,3	0,405	0,78
3	písek	0,096	0,413	0,01536	2,43	7266,7	0,458	0,89
-	hlinitý-písek I	0,064	0,415	0,00054	1,64	355,4	0,326	0,71

Kde jednotlivé uvedené parametry v Tabulce 21 znamenají:

- Qr – θr - retenční vodní kapacita (reziduální vlhkost)
- Qs – θs - plná vodní kapacita (nasycená vlhkost)
- α – převrácena hodnota vstupní hodnoty vzduchu
- n – empirický koeficient tvaru pórů
- Ks – nasycená hydraulická vodivost
- l – koeficient křivosti pórů
- R2 – koeficient spolehlivosti řešení

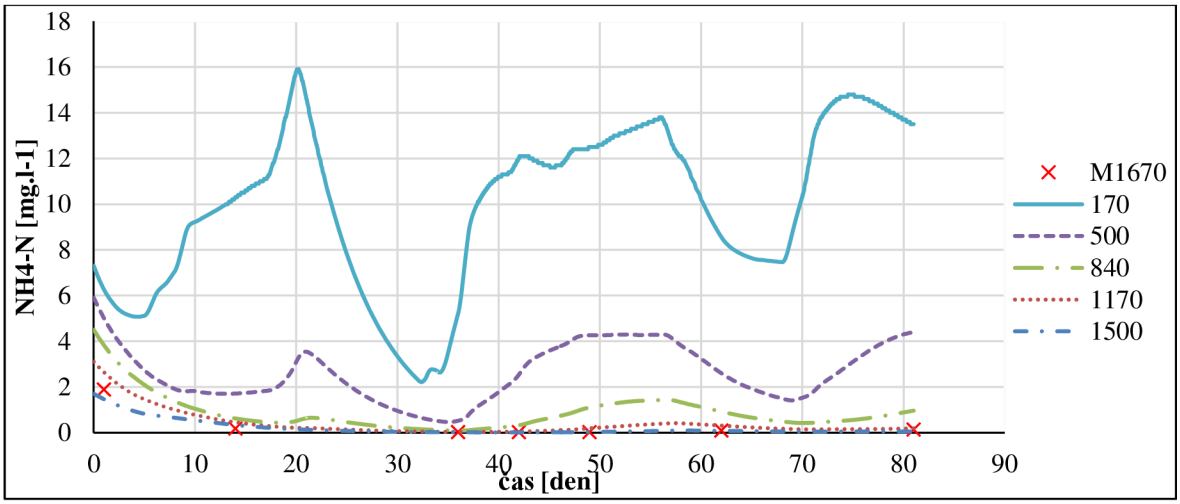
10.7 Výstupy z HYDRUSU

10.7.1 Písek



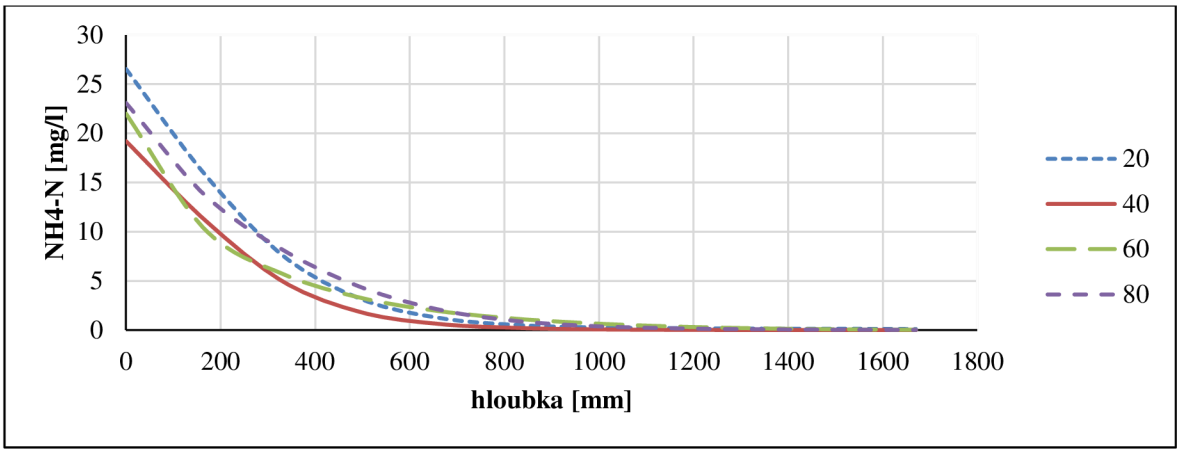
Graf 8: Průběh objemové vlhkosti pískem dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 8 je patrné, že aproximační funkce průběhu objemové vlhkosti v hloubce 500 mm téměř kopíruje naměřené hodnoty objemové vlhkosti v hloubce 500 mm. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 89 %. Objemová vlhkost ve filtrační koloně s pískem se pohybuje v rozmezí 14-19 %.



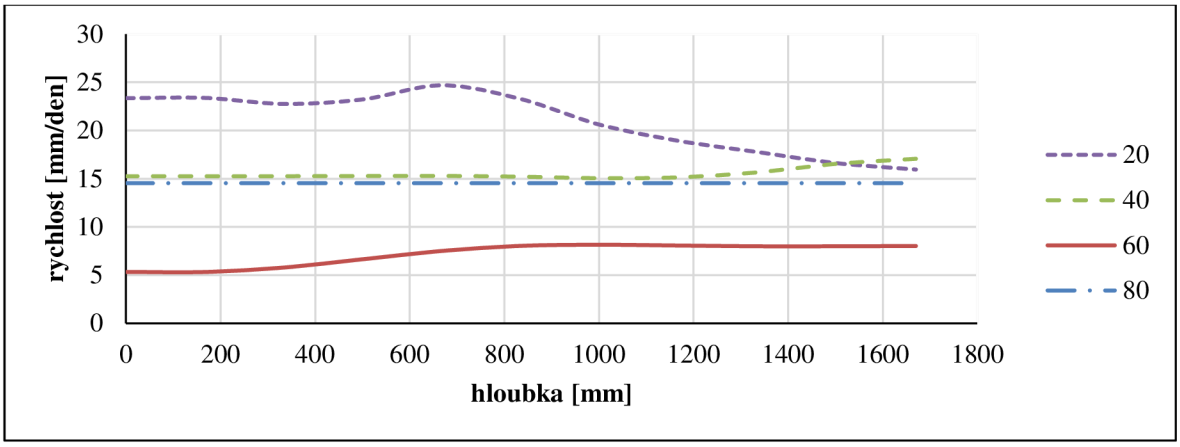
Graf 9: Průběh NH_4^+-N pískem dle měření v hloubce 1670 mm (M1670) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 9, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N po dobu měření, je patrné, že již v hloubce 1200 mm je koncentrace NH_4^+-N téměř nulová. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 98 %.



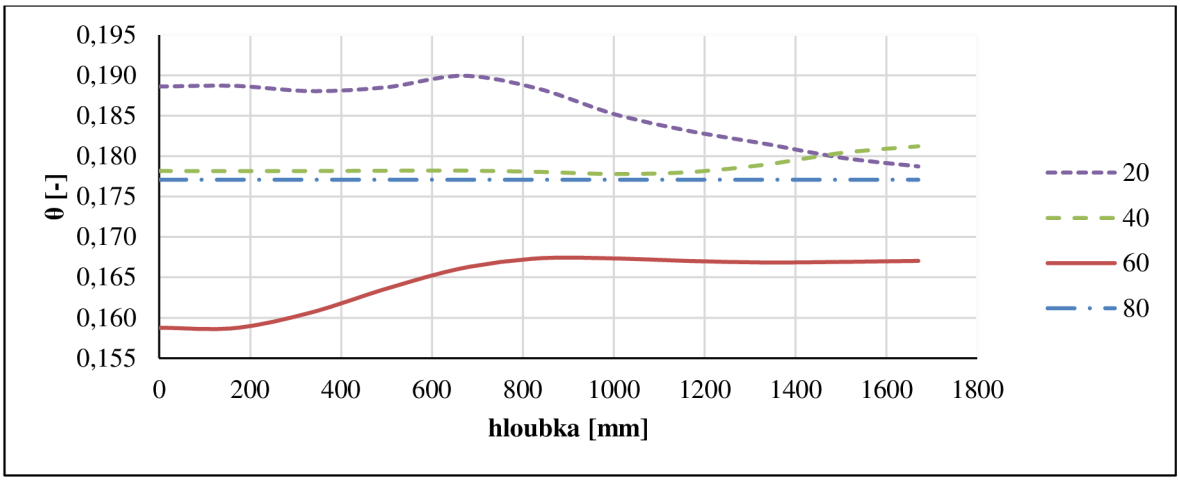
Graf 10: Příčný řez modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N pískem v dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 10, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že průběh křivky koncentrace NH_4^+-N se nemění v závislosti s přibývajícím časem.



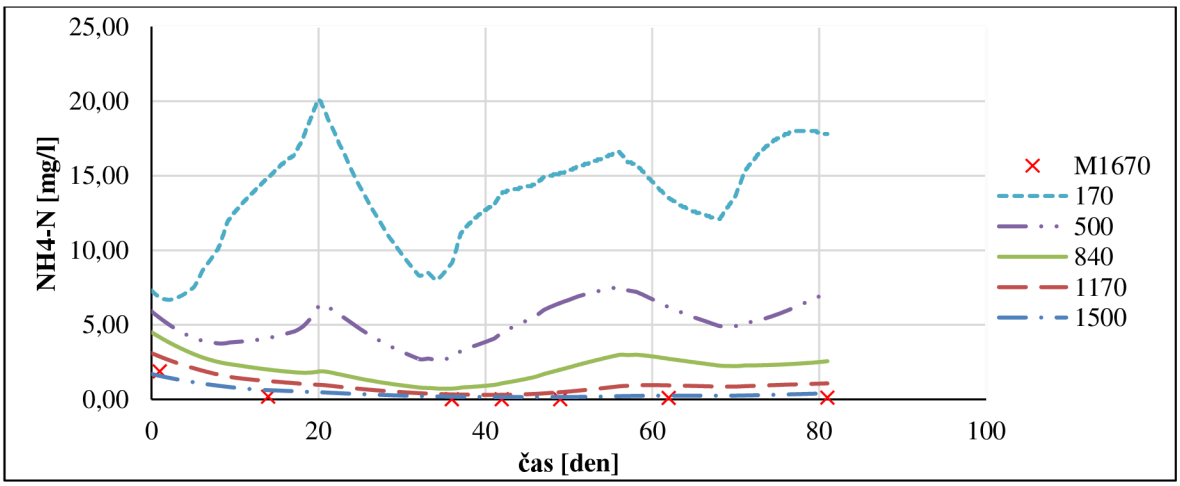
Graf 11: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace pískem ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 11, který znázorňuje průběh rychlosti infiltrace v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že rychlost po 80 dnech je v závislosti na hloubce konstantní a její hodnota přibližně 15 mm.den-1 je pravděpodobně maximální, protože objemová vlhkost v Grafu 12 je po 80 dnech také konstantní. Maximální filtrační rychlost v čase měření je 25 mm/den a minimální je 5 mm/den. Maximální objemová vlhkost v čase měření je 19 % a minimální je 16 %.



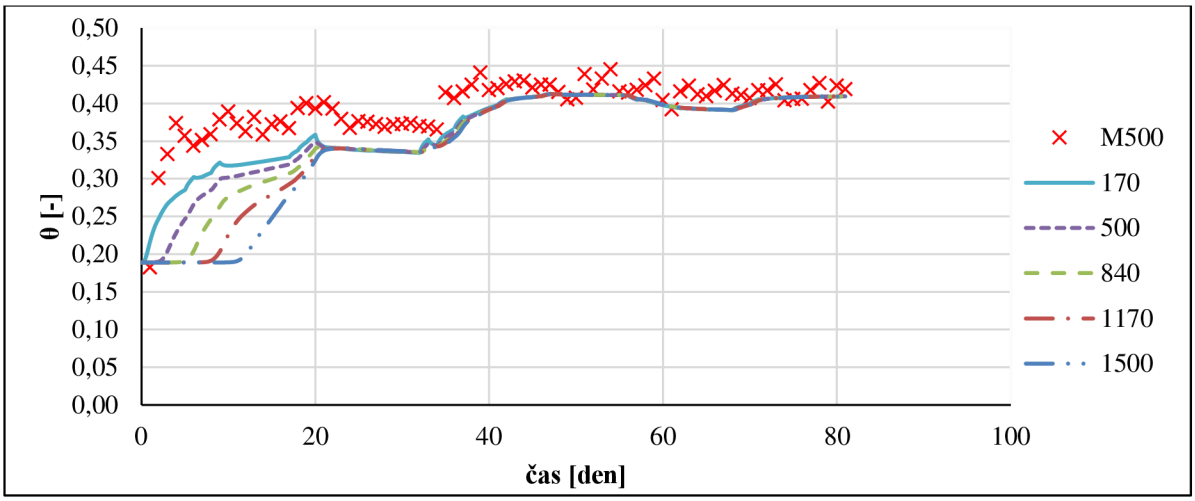
Graf 12: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti pískem ve dnech 20, 40, 60, 80.

10.7.2 Hlína



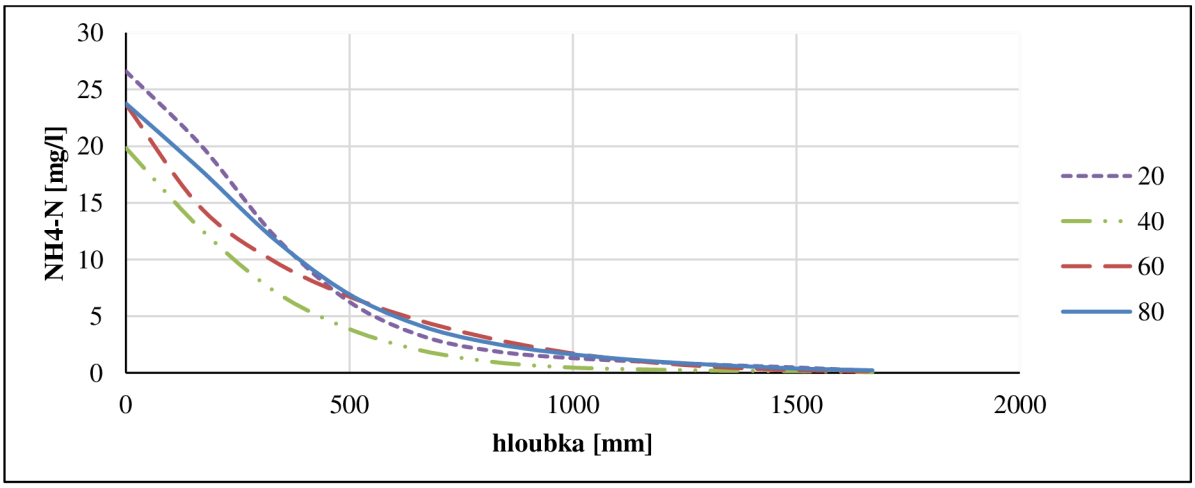
Graf 13: Průběh NH_4^+-N hlínou dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 13, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N po dobu měření, je patrné, že v hloubce 1200 mm je koncentrace NH_4^+-N menší než $1 mg^{-1}$. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 94 %.



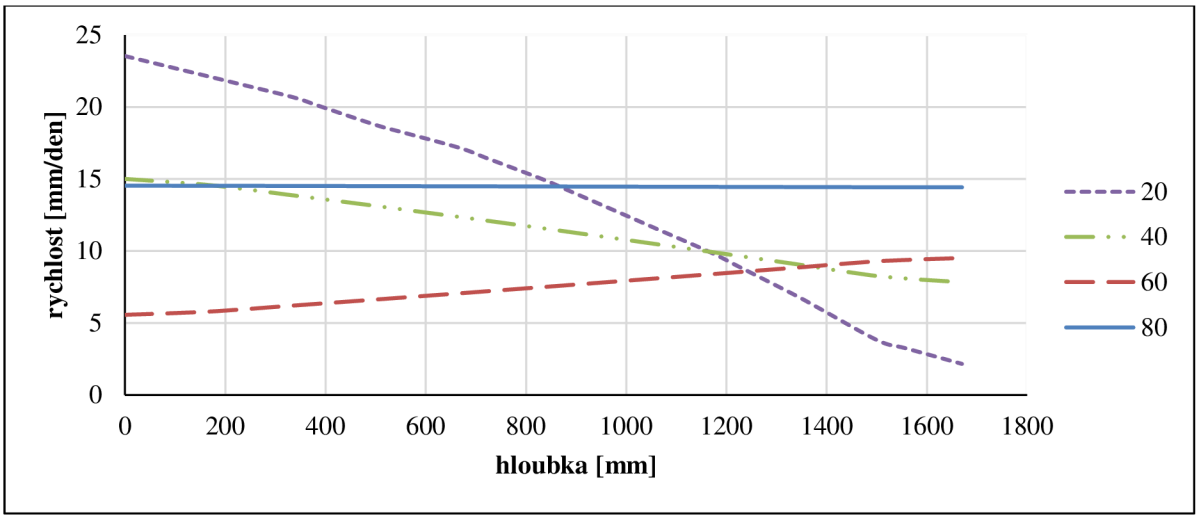
Graf 14: Průběh objemové vlhkosti hlínou dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 14 je patrné, že aproximační funkce průběhu objemové vlhkosti v hloubce 500 mm, daleko méně kopíruje naměřené hodnoty objemové vlhkosti v hloubce 500 mm, než tomu bylo u písku. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 74 %. Objemová vlhkost ve filtrační koloně s hlínou se pohybuje v rozmezí 19 - 41 %.



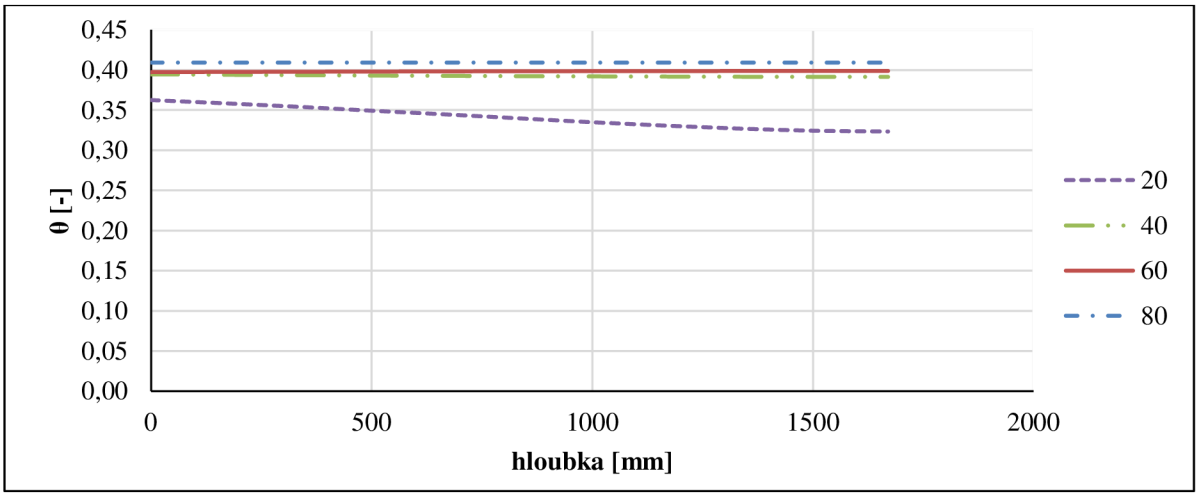
Graf 15: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 15, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že průběh křivky koncentrace NH_4^+-N se nemění v závislosti s přibývajícím časem.



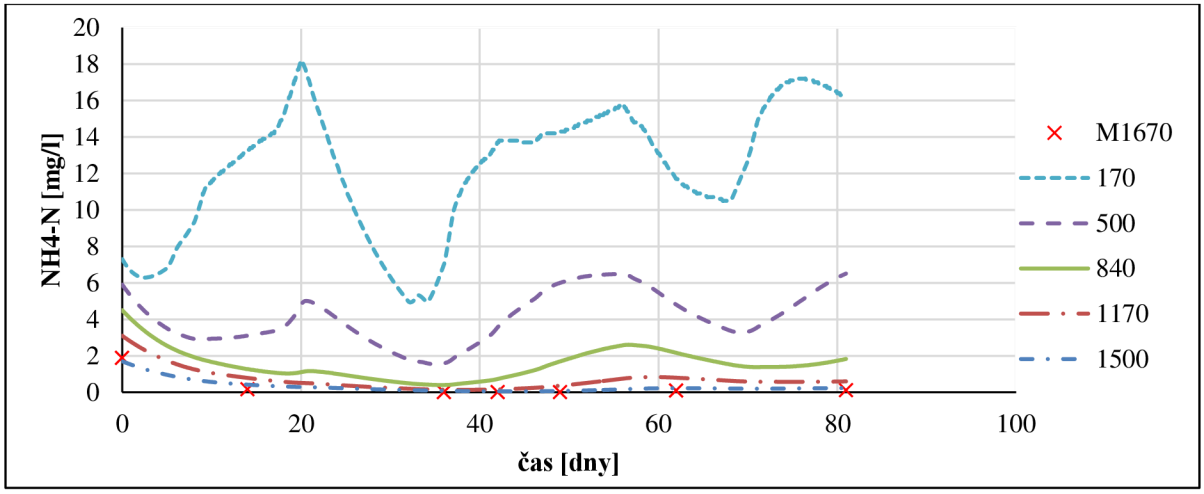
Graf 16: Příčný řez modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 16, který znázorňuje průběh rychlosti infiltrace v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že rychlost po 80 dnech je v závislosti na hloubce konstantní a její hodnota přibližně 15 mm.den^{-1} je pravděpodobně maximální, protože objemová vlhkost v Grafu 17, je po 80 dnech také konstantní. Maximální filtrační rychlost v čase měření je 24 mm/den a minimální je 3 mm/den. Maximální objemová vlhkost v čase měření je 41% a minimální je 33%.



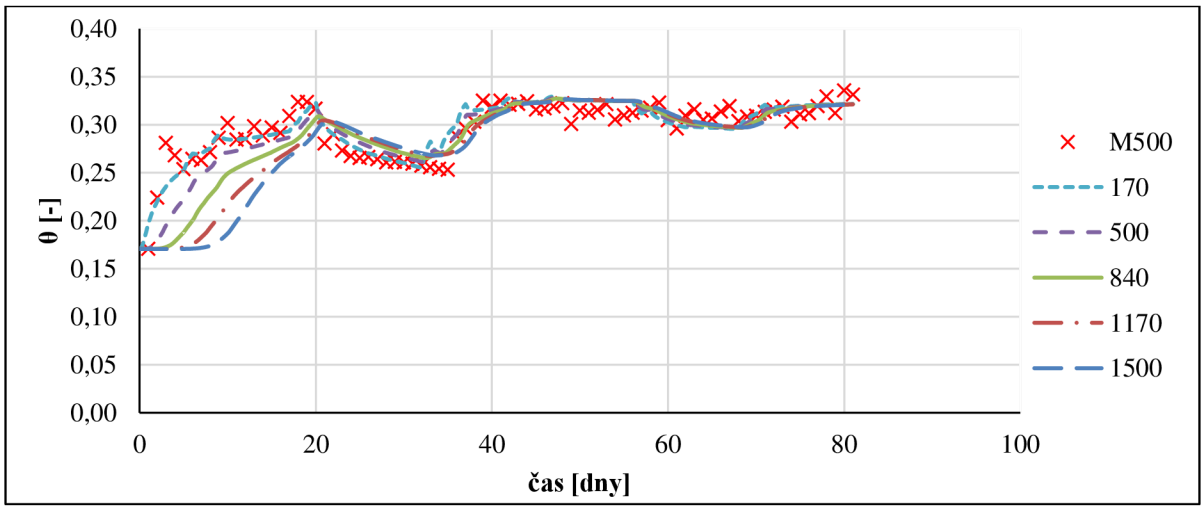
Graf 17: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80.

10.7.3 Hlinitý písek I



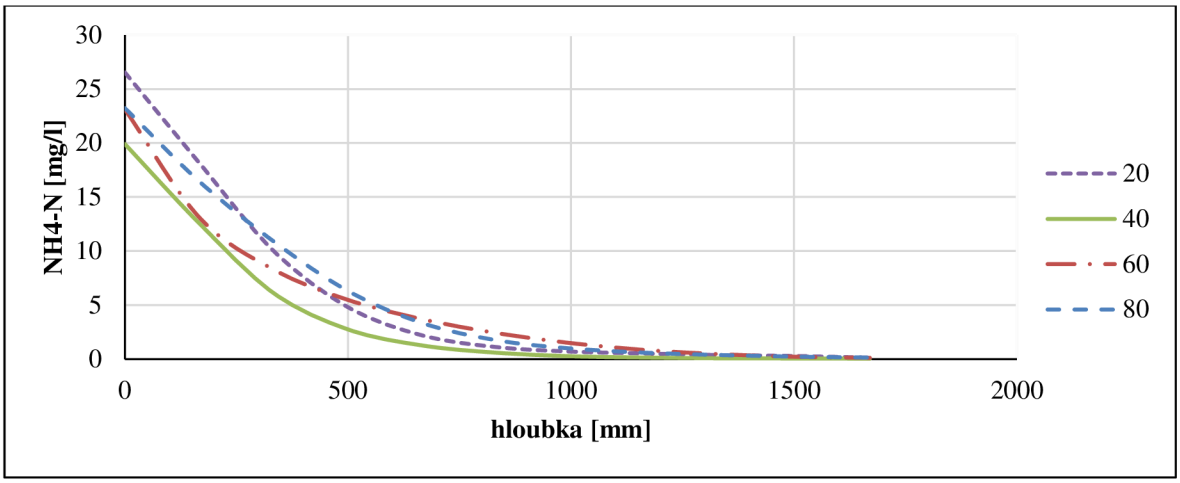
Graf 18: Průběh NH_4^+-N hlinitým pískem I dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 18, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N po dobu měření, je patrné, že v hloubce 1200 mm je koncentrace NH_4^+-N menší než $1 mg^{-1}$. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 96 %.



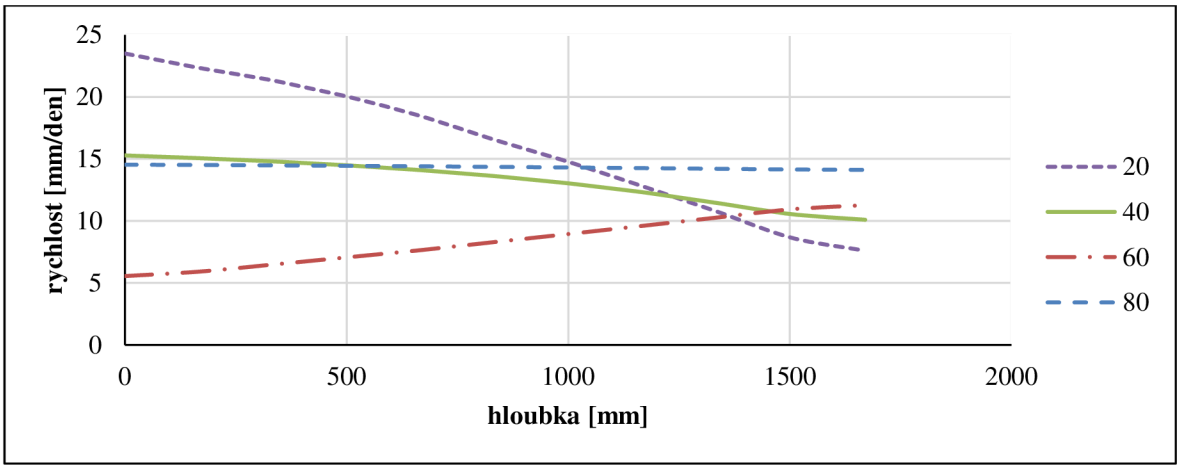
Graf 19: Průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem I dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 19 je patrné, že aproximační funkce průběhu objemové vlhkosti v hloubce 500 mm přesněji kopíruje naměřené hodnoty objemové vlhkosti v hloubce 500mm, než tomu bylo u hlíny. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 71 %. Objemová vlhkost ve filtrační koloně s hlínou se pohybuje v rozmezí 17 – 32 %.



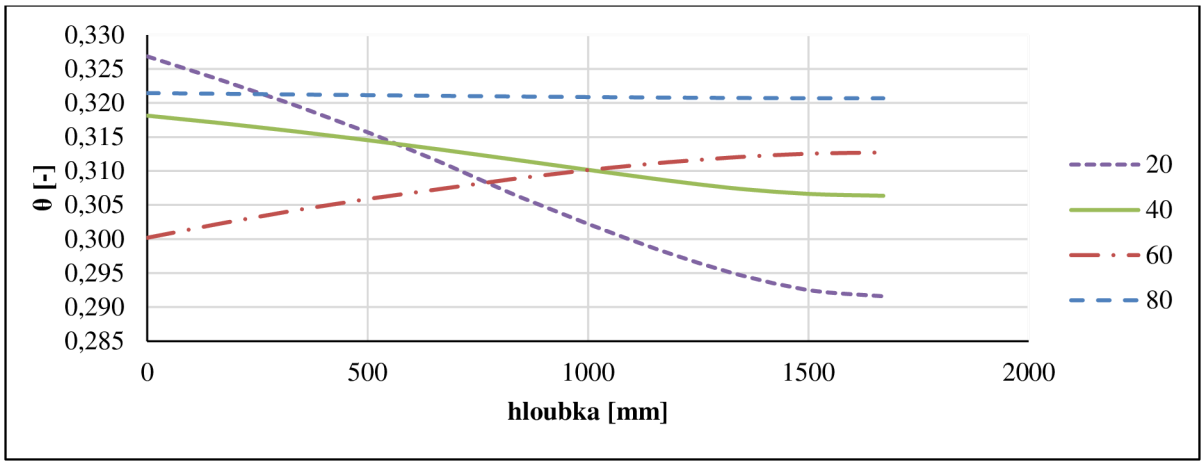
Graf 20: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 20, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že průběh křivky koncentrace NH_4^+-N se nemění v závislosti s přibývajícím časem.



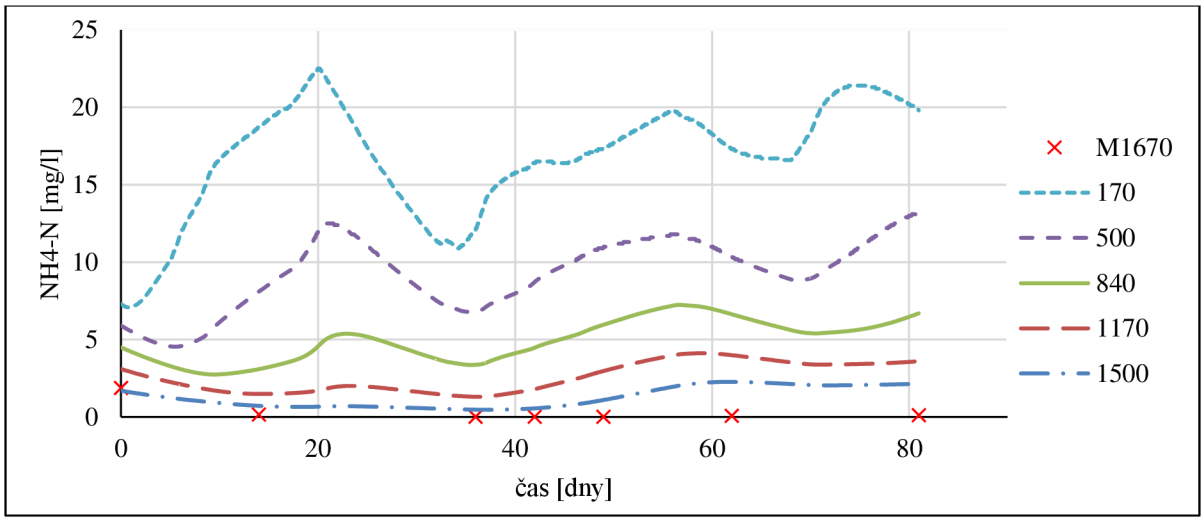
Graf 21: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 21, který znázorňuje průběh rychlosti infiltrace v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že rychlost po 80 dnech je v závislosti na hloubce konstantní a její hodnota přibližně 15 mm.den^{-1} je pravděpodobně maximální, protože objemová vlhkost v Grafu 22, je po 80 dnech také konstantní. Maximální filtrační rychlost v čase měření je 23 mm/den a minimální je 5 mm/den. Maximální objemová vlhkost v čase měření je 33 % a minimální je 29 %.



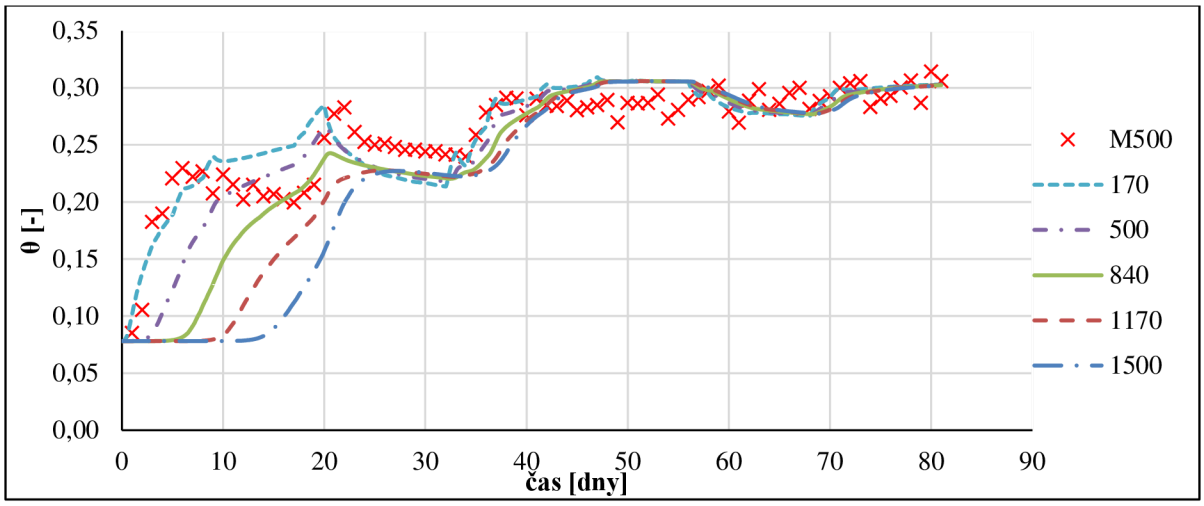
Graf 22: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80.

10.7.4 Hlinitý písek II



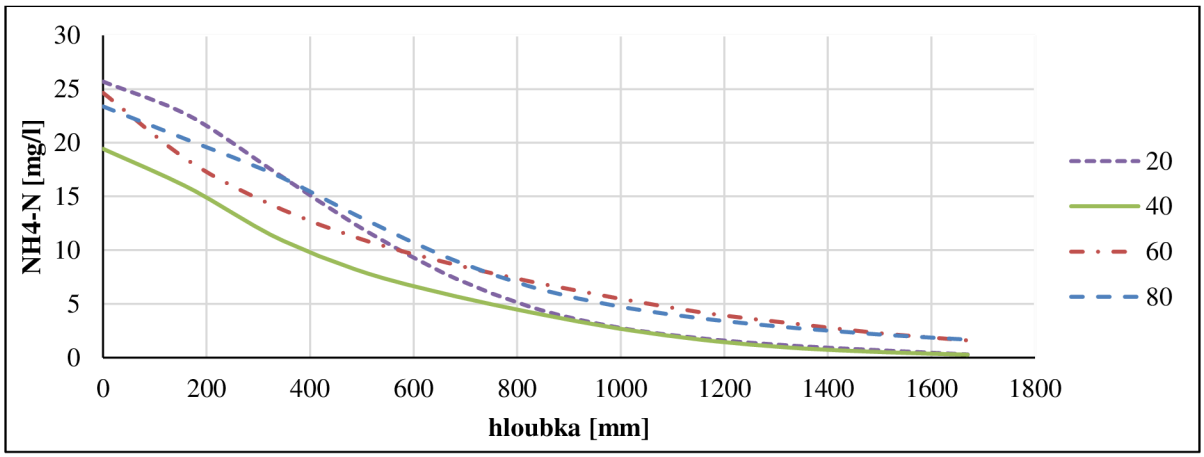
Graf 23: Průběh NH_4^+-N hlinitým pískem II dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 23, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N po dobu měření, je patrné, že v hloubce 1200 mm se koncentrace NH_4^+-N pohybuje při konci měření kolem 4mg.l^{-1}. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 99 %.



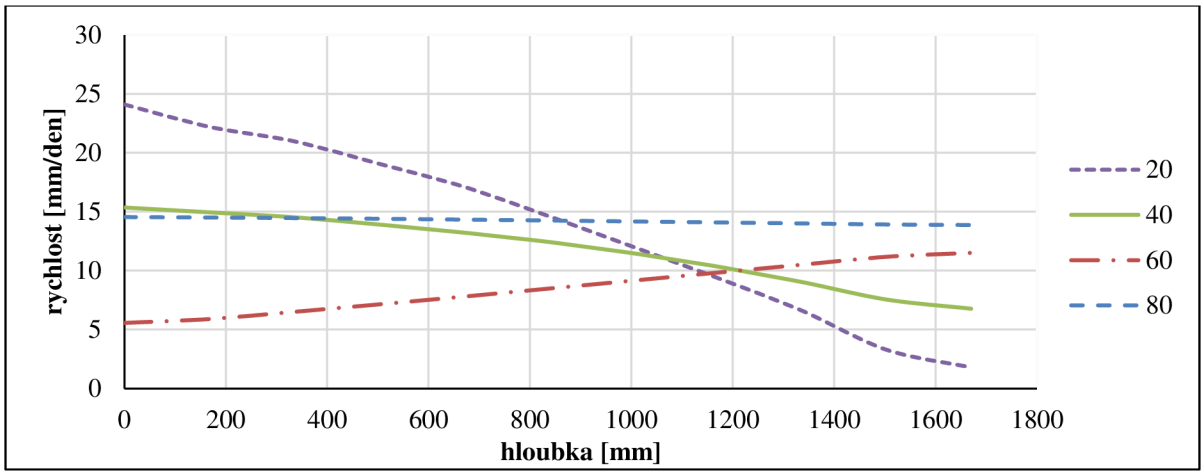
Graf 24: Průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem II dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm).

Z Grafu 24 je patrné, že aproximační funkce průběhu objemové vlhkosti v hloubce 500 mm, nejméně kopíruje naměřené hodnoty objemové vlhkosti v hloubce 500 mm, než tomu bylo u jiných kolon. Spolehlivost aproximační funkce dosahuje 71 %. Objemová vlhkost ve filtrační koloně s hlínou se pohybuje v rozmezí 9 – 31 %.



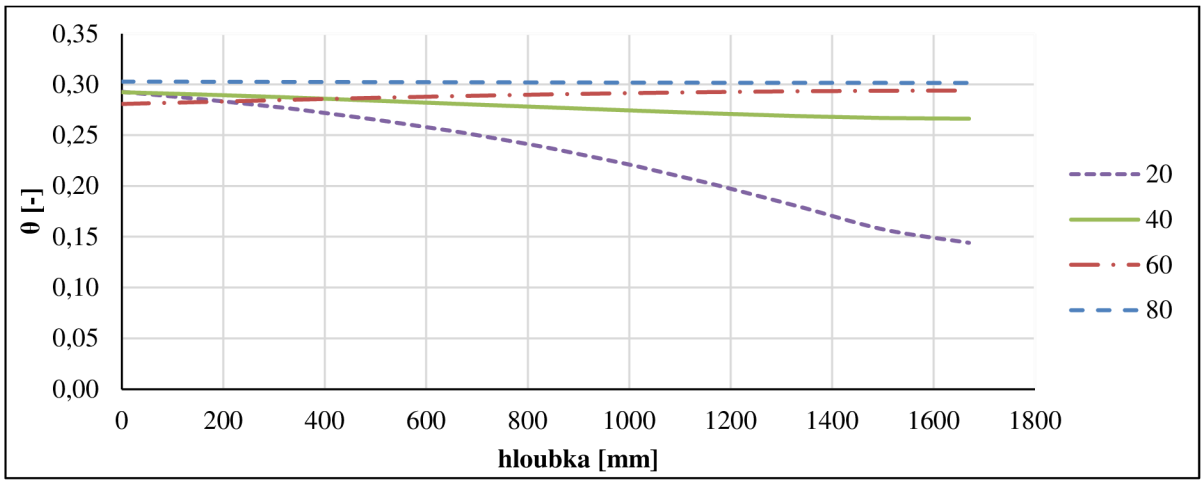
Graf 25: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 25, který znázorňuje průběh koncentrace NH_4^+-N v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že průběh křivky koncentrace NH_4^+-N se nemění v závislosti s přibývajícím časem.



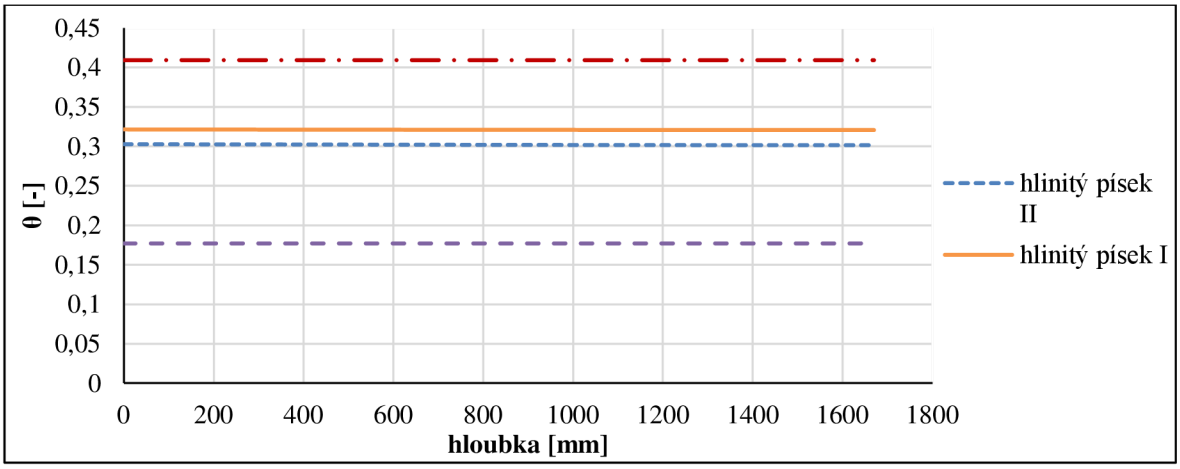
Graf 26: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80.

V Grafu 26, který znázorňuje průběh rychlosti infiltrace v časovém intervalu 20 dnů, je evidentní, že rychlost po 80 dnech je v závislosti na hloubce konstantní a její hodnota přibližně 15 mm.den-1 je pravděpodobně maximální, protože objemová vlhkost v Grafu 27 je po 80 dnech také konstantní. Maximální filtrační rychlost v době měření je 24 mm/den a minimální je 2 mm/den. Maximální objemová vlhkost v době měření je 15 % a minimální je 30 %.

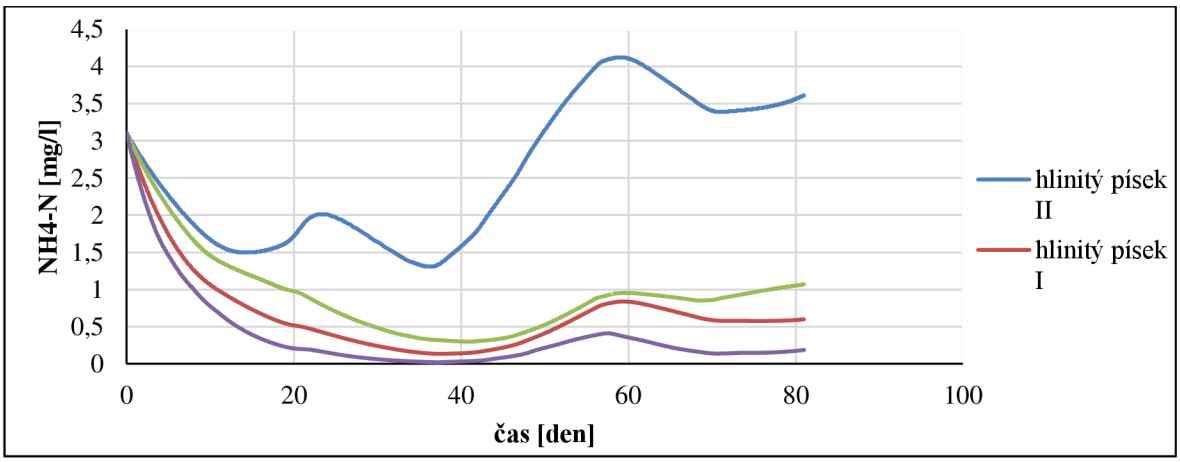


Graf 27: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80.

Porovnání filtračních kolon



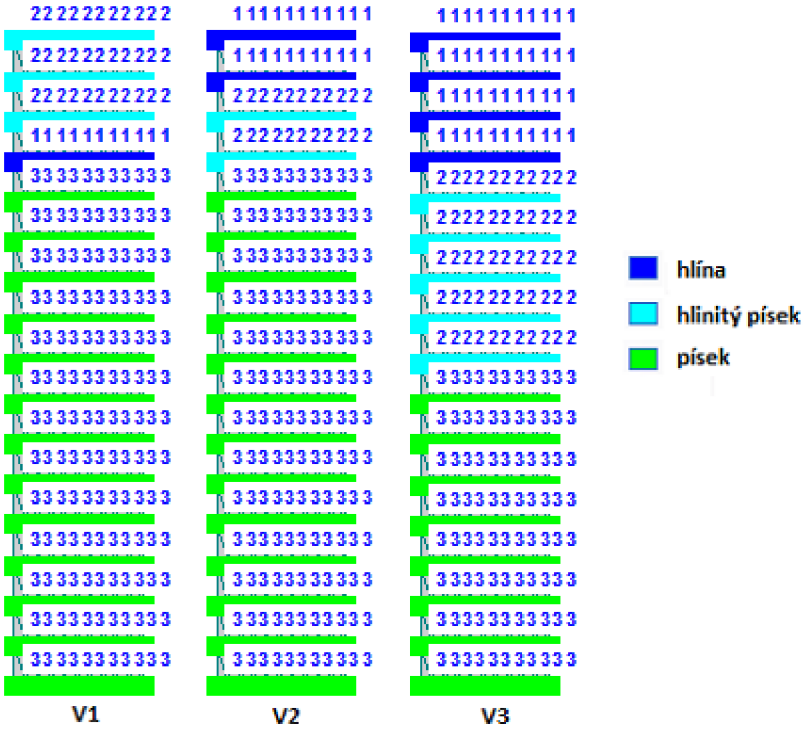
Graf 28: Porovnání příčných řezů simulačními modely znázorňující průběh objemové vlhkosti po 80 dnech.



Graf 29: Porovnání průběhů koncentrace NH_4^+ v hloubce 1170 mm u jednotlivých simulačních modelů v době měření.

11 APLIKACE VÝSLEDKU

Tato část práce je věnována aplikaci výsledků dosažených v předchozích kapitolách. Jde o využití zjištěných hydraulických a transportních parametrů pro následnou modelaci simulace tříleté závlahy pro tří různé náhodně zvolené struktury půdy. Zvolená doba závlahy by mohla být dostačující pro zjištění průběhu rychlosti infiltrace, objemové vlhkosti a možné akumulace amoniakálního dusíku v půdě. Tyto tří varianty, kde každá má jinou strukturu půdy jsou vytvořeny pro prozkoumání vlivu různorodosti struktur půd na průběh již zmiňovaných veličin. Tato simulace je limitována tím, že vytvořené struktury půd jsou omezeny pouze na tři zeminy. Různorodost těchto variant je dosažena pořadím zemin a jejich tloušťkou. Přehled variant je zobrazen na Obrázku 16.



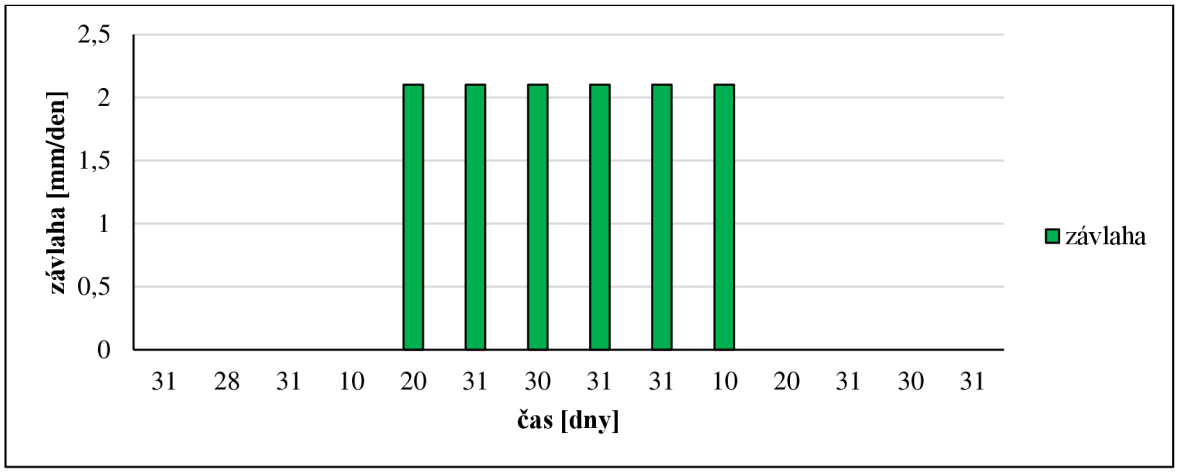
Obrázek 16: Přehled variant pro simulaci tříleté závlahy.

Brambora, jako plodina pro závlahu, byla vybrána pouze z důvodu jakési prezentace myšlenky o tom, že společnost by pravděpodobně špatně snášela představu, že například paprika, kterou si koupíme v obchodě, byla zavlažována vyčištěnou odpadní vodou. Vyčištěnou myšleno ve smyslu, že splňuje emisní limity pro vypouštění do toku, ale od jiných látek vyčištěna z daleka není. U brambor by to mohlo být jiné, protože by se mohly použít také jako například krmivo pro zvířata, anebo na výrobu lihu. Další možností by bylo například použití této vody pro závlahu sadů, kde nedochází ke kontaktu závlahové vody a plodu.

Tabulka 23: Výtah z normy CSN 75 0434 uvádějící potřebu vody pro doplňkovou závlahu brambor.

Název plodiny	Celková vláhová potřeba V_c v m^3/ha					
	Polabí		Podunajská nížina jižní Morava		Východoslovenská nížina	
	Vegetační období	V_c m^3/ha	Vegetační období	V_c m^3/ha	Vegetační období	V_c m^3/ha
brambory pozdní	20. 4. až 20. 9.	3 000	10. 4. až 10. 9.	3 200	20. 4. až 10. 9.	3 000

Hodnoty srážek a evapotranspirace jsou totožné s použitými hodnotami v předchozích částech diplomové práce. Vybraná závlahová dávka 3200 $m^3.ha^{-1}$ podle Tabulky 23, je rovnoměrně rozložena po dobu 153 dní. Celkové množství vody vstupující do modelu simulace tříleté závlahy je uvedeno v Tabulce 24.



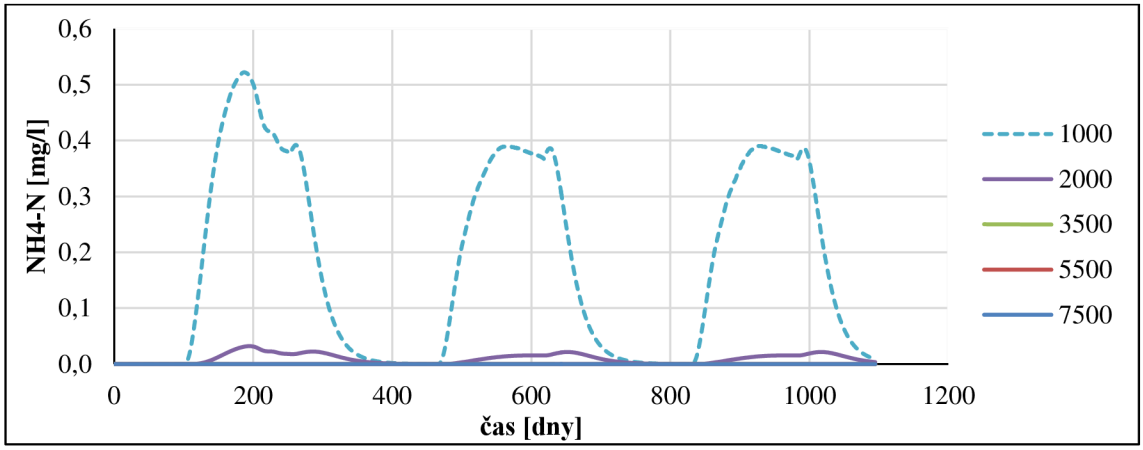
Graf 30: Průběh množství závlahy pro simulaci tříleté závlahy.

Tabulka 24: Celkové množství vody vstupující do modelace tříleté závlahy.

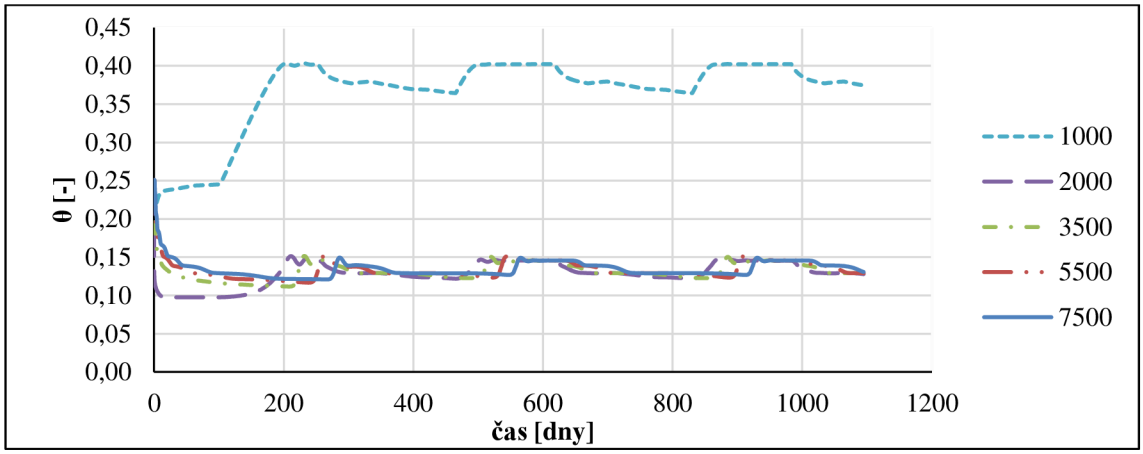
měsíc -	čas dny	srážka $mm.den^{-1}$	závlaha $mm.den^{-1}$	evapotr. $mm.den^{-1}$	celkem $mm.den^{-1}$
leden	31	0,97	0	0,88	0,09
únor	28	1,07	0	0,89	0,18
březen	31	0,94	0	0,9	0,04
duben	10	1,27	0	1,22	0,05
duben	20	1,27	2,1	1,22	2,14
květen	31	2,1	2,1	2,08	2,11
červen	30	2,5	2,1	2,48	2,11
červenec	31	2,06	2,1	2,04	2,12
srpen	31	1,97	2,1	1,92	2,14
srpen	10	1,37	2,1	1,32	2,14
září	20	1,37	0	1,32	0,05

říjen	31	1,1	0	0,9	0,2
listopad	30	1,4	0	0,89	0,51
prosinec	31	1,06	0	0,88	0,18

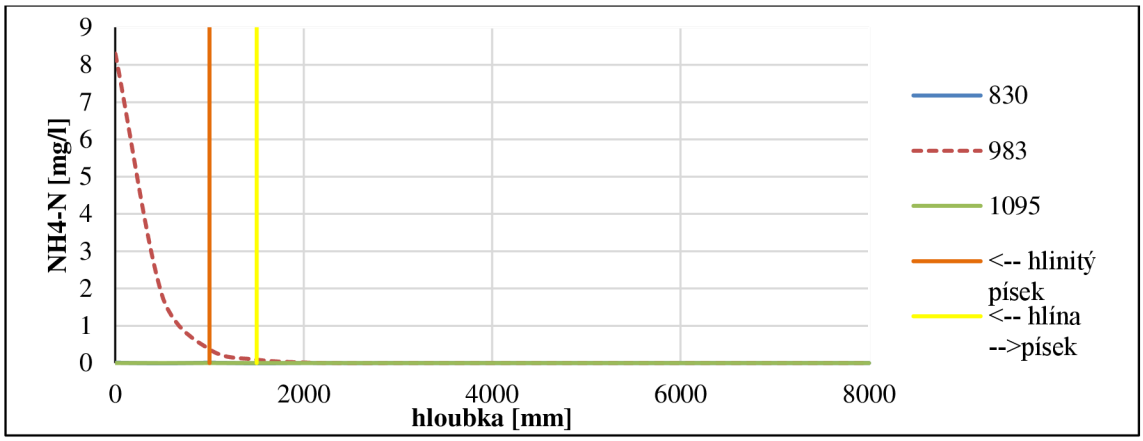
11.1 Varianta 1



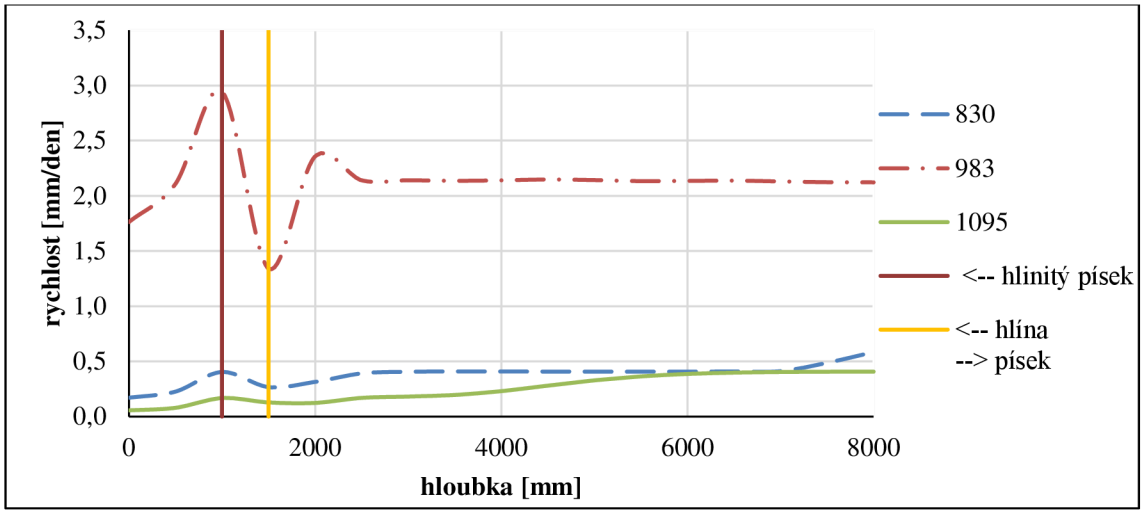
Graf 31: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V1.



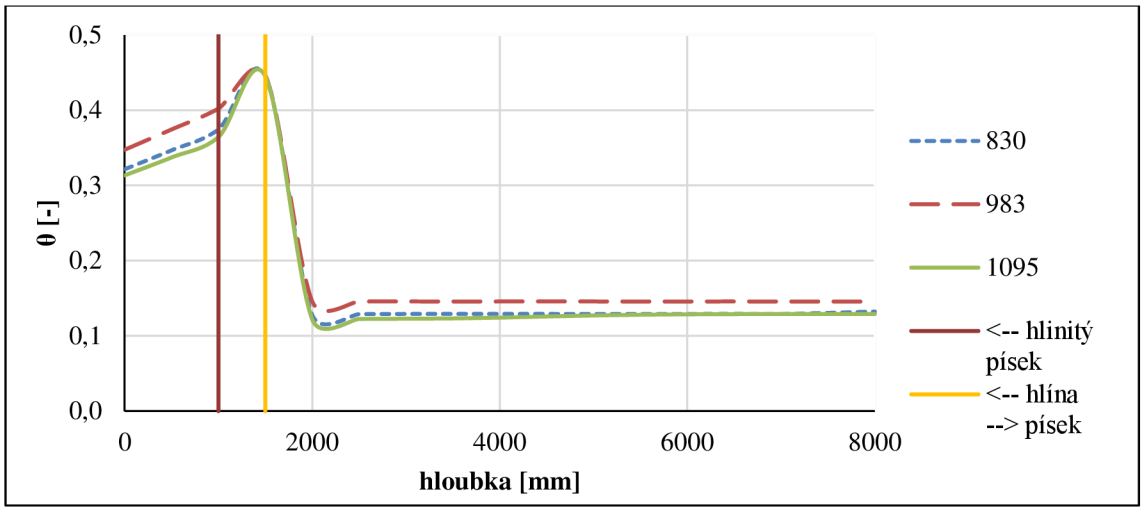
Graf 32: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V1.



Graf 33: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

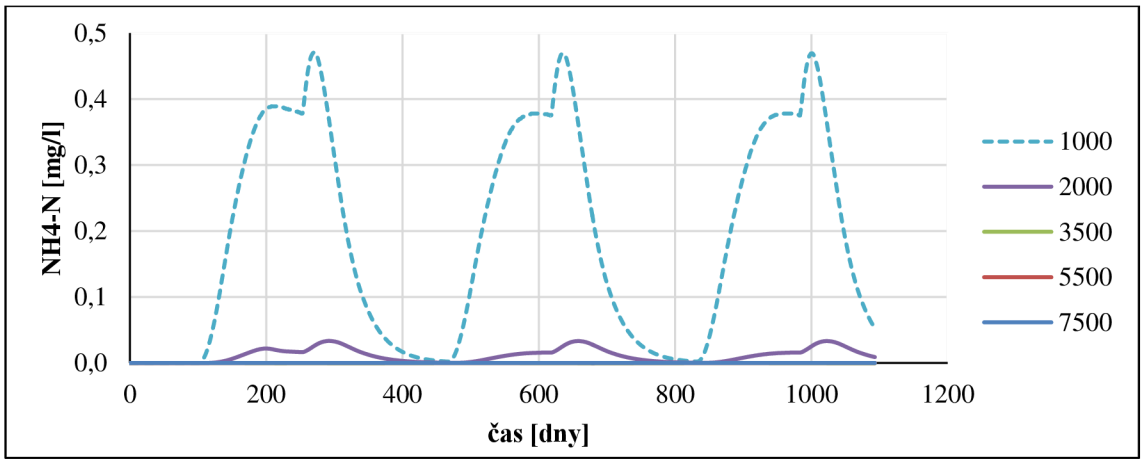


Graf 34: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

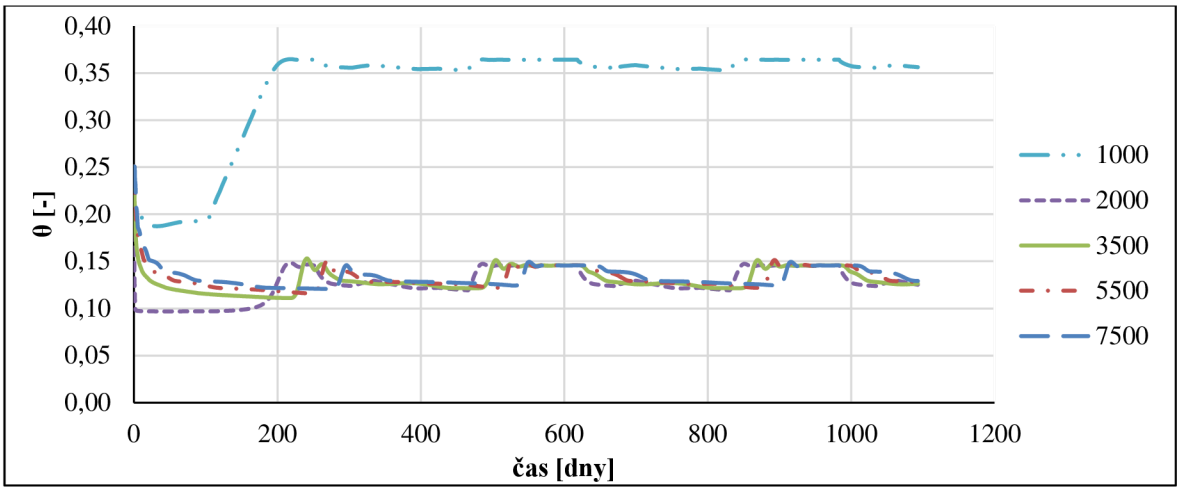


Graf 35: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

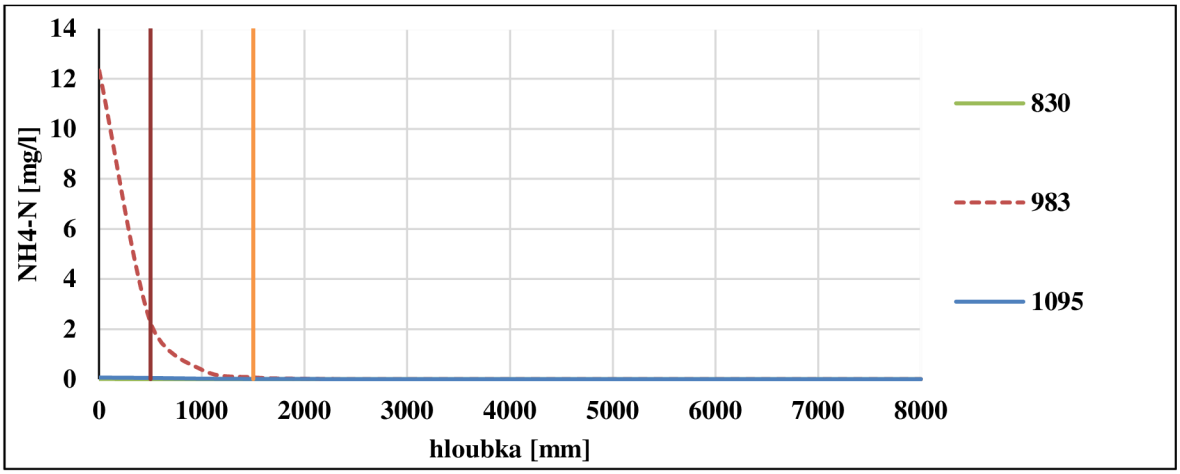
11.2 Varianta 2



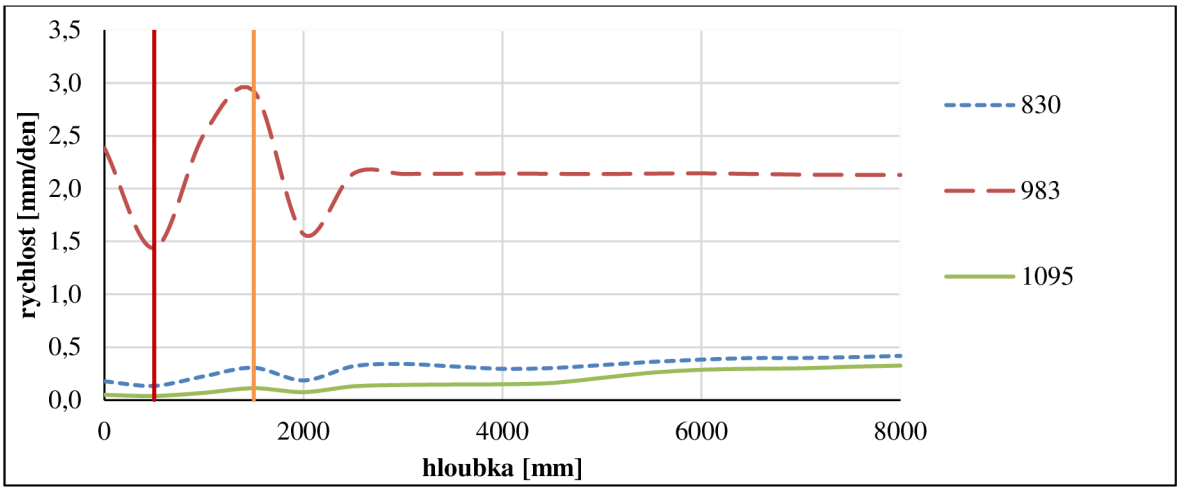
Graf 36: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V2.



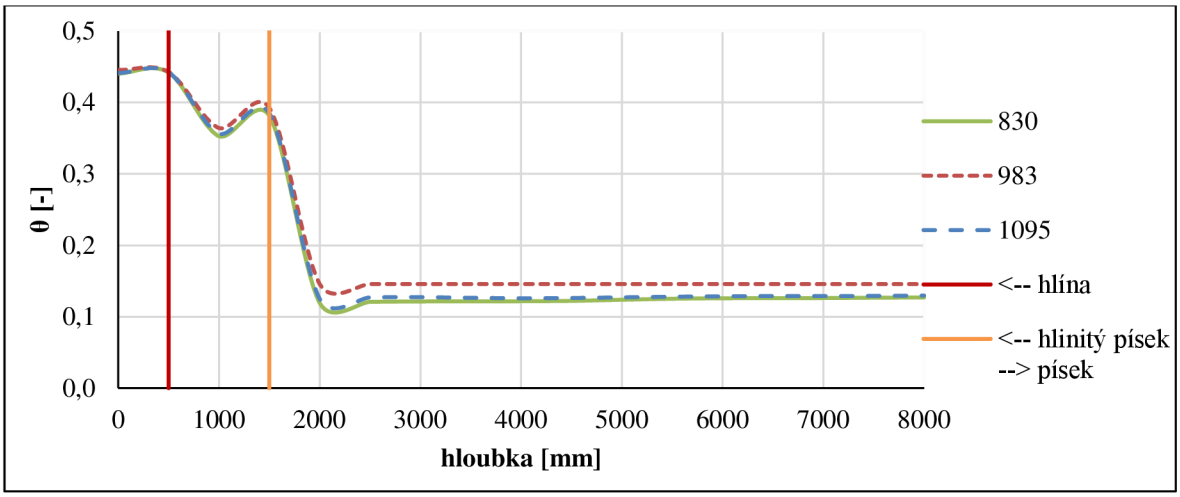
Graf 37: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V2.



Graf 38: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

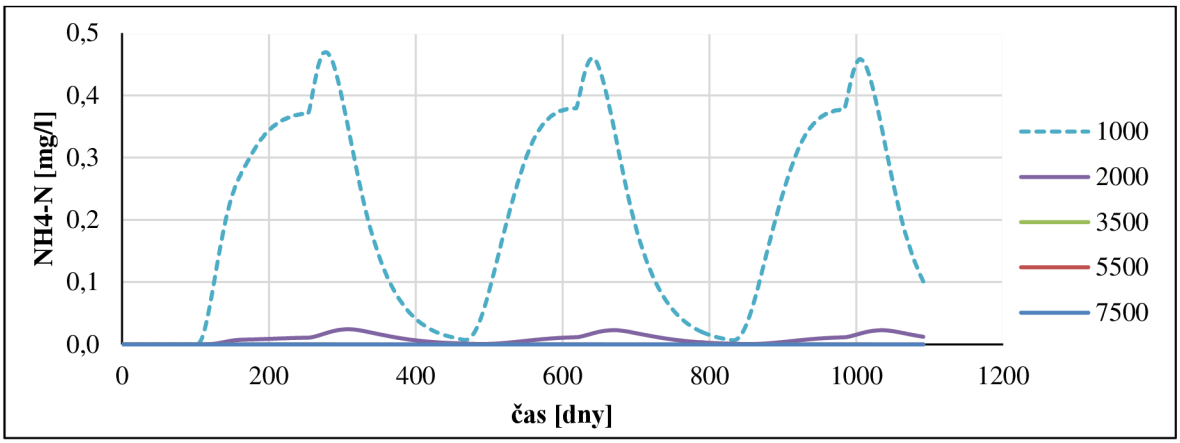


Graf 39: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

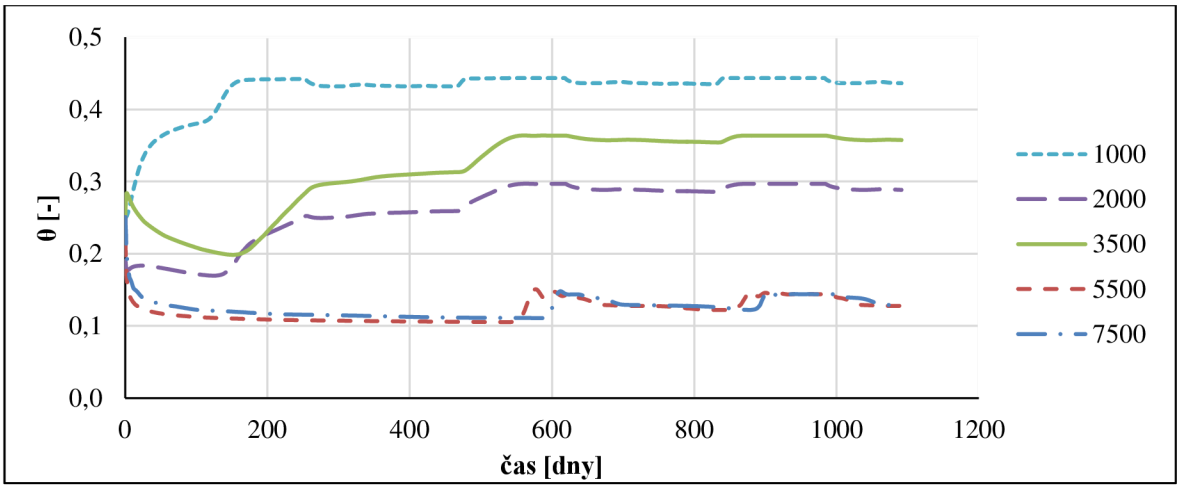


Graf 40: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

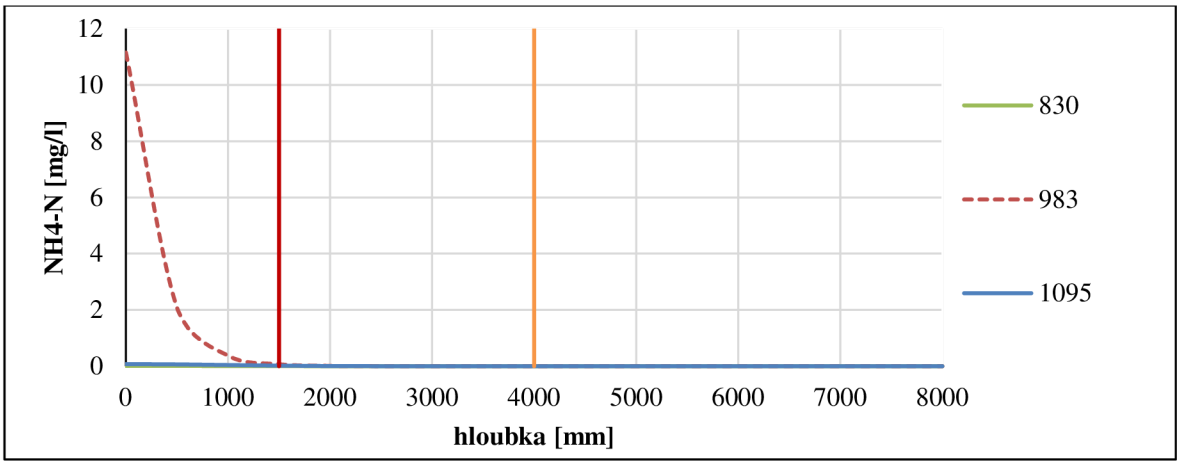
11.3 Varianta 3



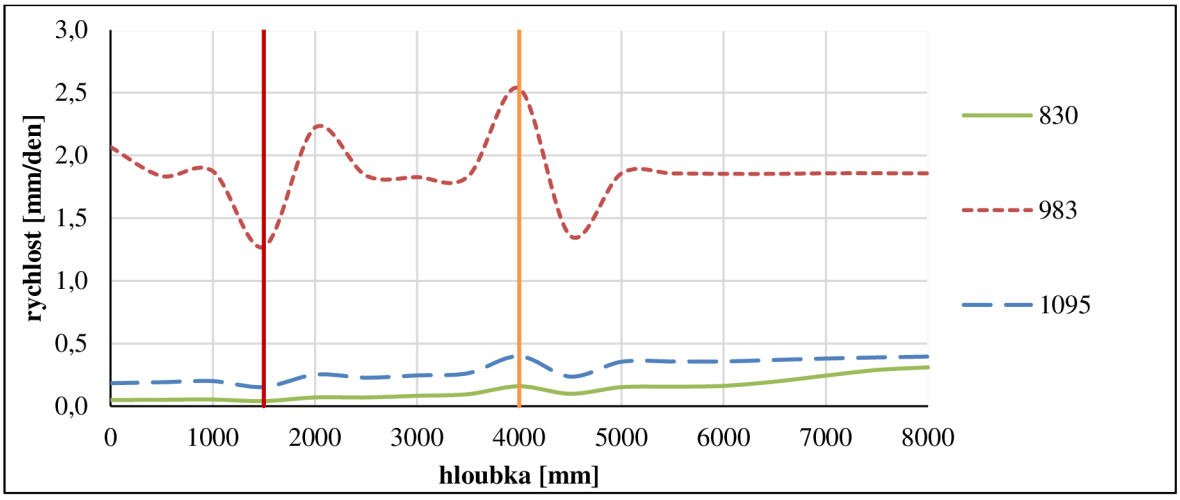
Graf 41: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V3.



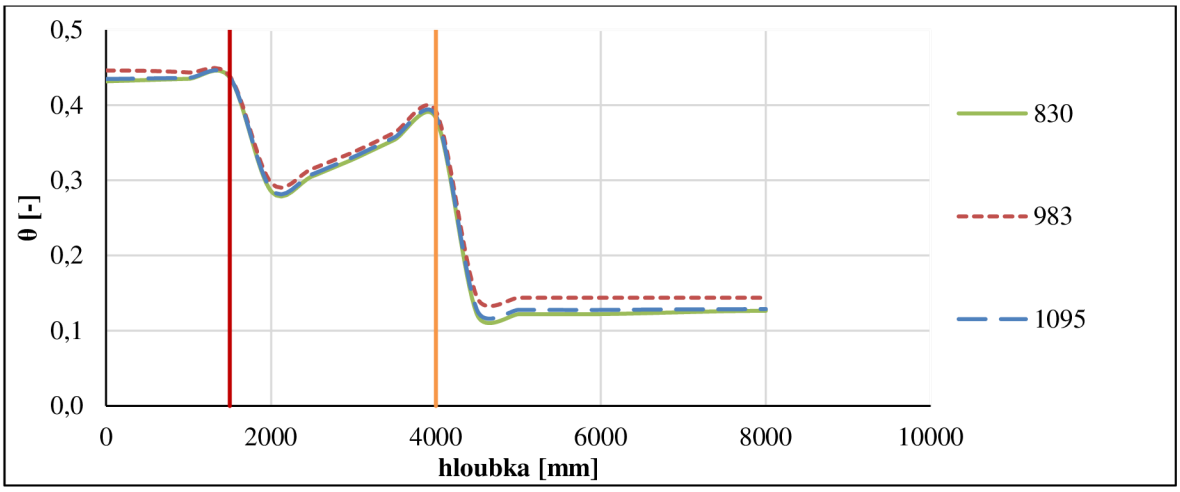
Graf 42: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V3.



Graf 43: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.



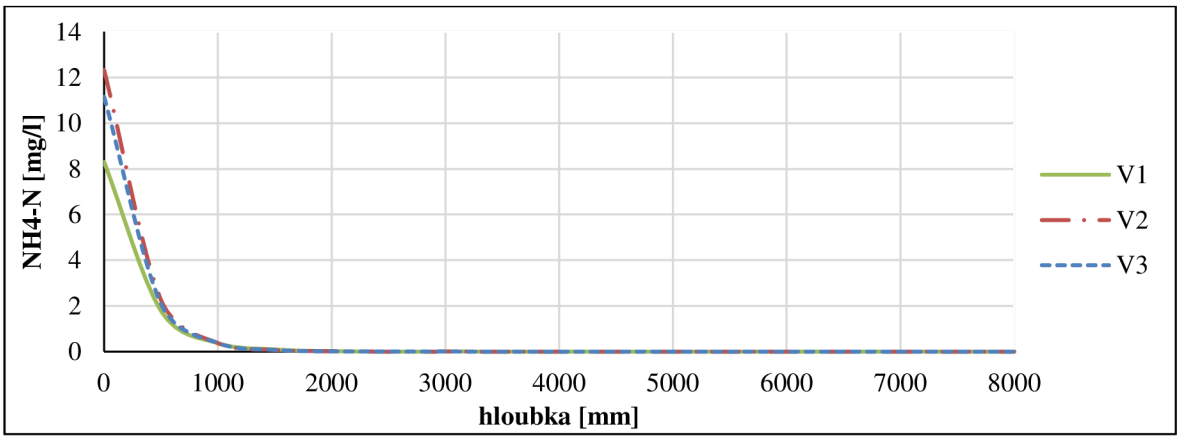
Graf 44: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.



Graf 45: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev.

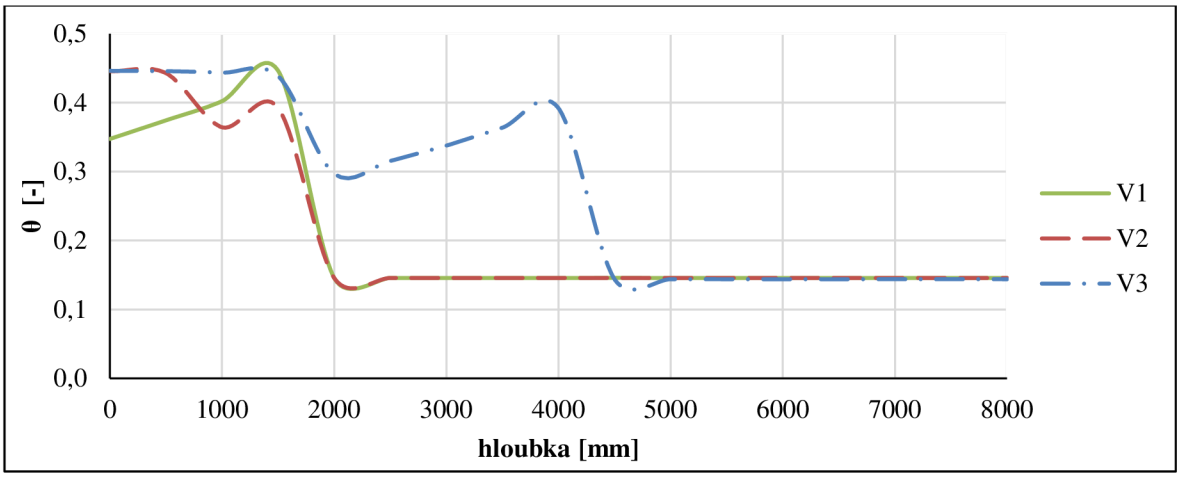
11.4 Porovnávání variant

983 – Poslední den závlahy v třetím roce



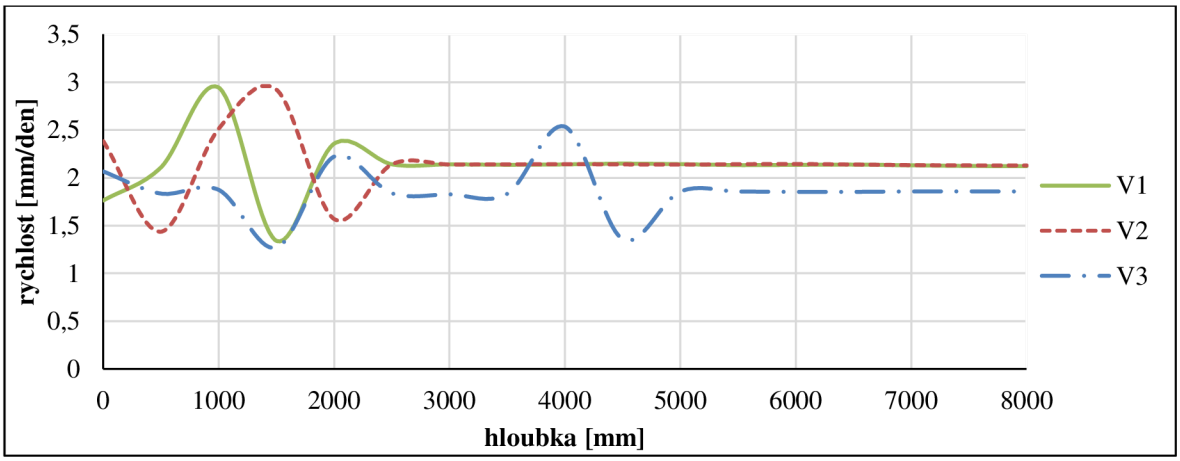
Graf 46: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce.

Z Grafu 46 můžeme vidět, že přibližně v hloubce 500 mm je u všech tří variant téměř stejná koncentrace NH_4^+-N.



Graf 47: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce.

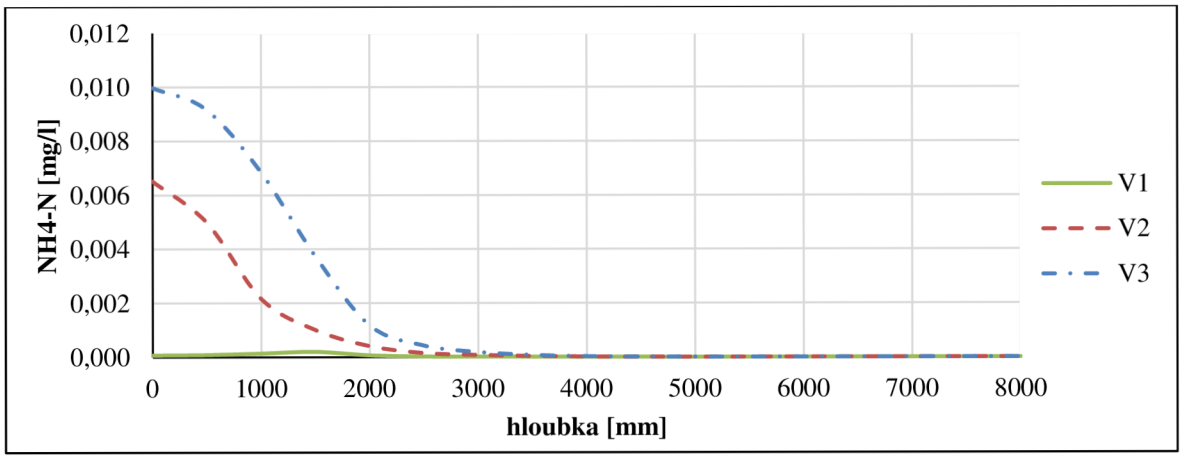
Z Grafu 47 je patrné, že ve variantě 3, kde je vrstva hlíny 1500 mm a vrstva hlinitého písku 2500 mm, je objemová vlhkost 40 % do hloubky 4000 mm. U všech variant je zřetelné, že jakmile voda dosáhne hranici písku, tak objemová vlhkost klesne na 12 %.



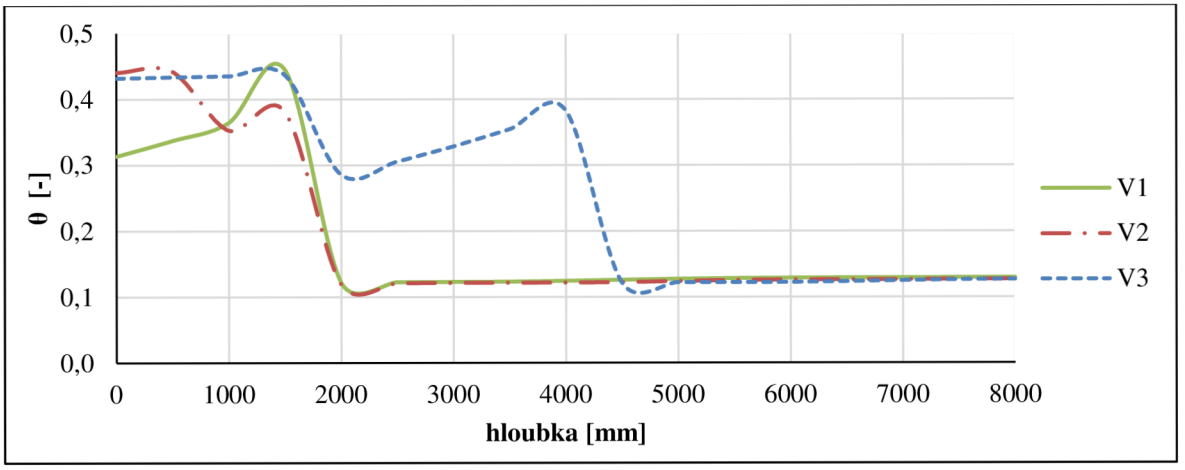
Graf 48: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce.

V Grafu 48 je vidět evidentní rozdíl v průběhu rychlosti infiltrace mezi třetí variantou a zbylými dvěma. V třetí variantě dosahuje rychlost infiltrace na konci závlahy nejmenších hodnot, v první a druhé je minimální rozdíl v průběhu.

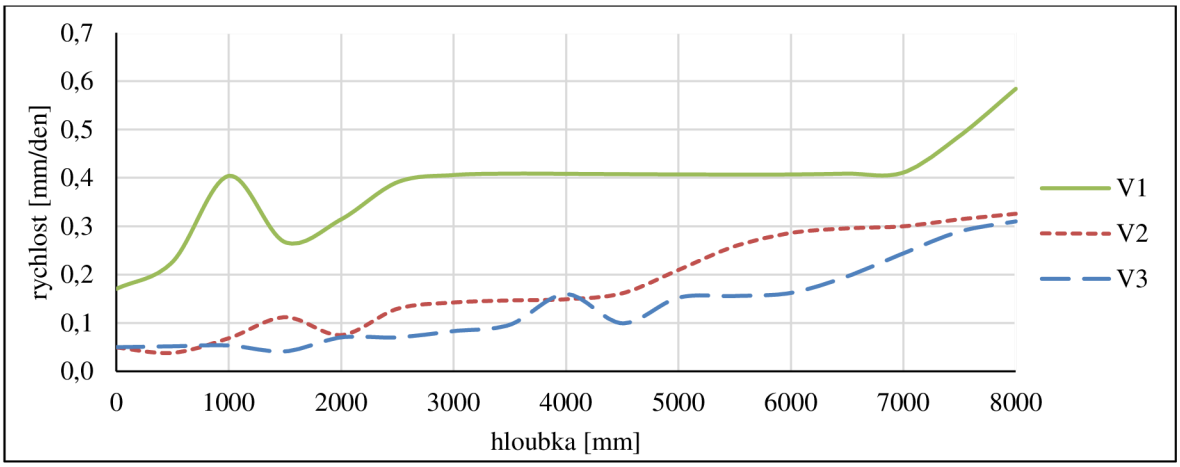
830 – Poslední den před začátkem závlahy ve třetím roce



Graf 49: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce.

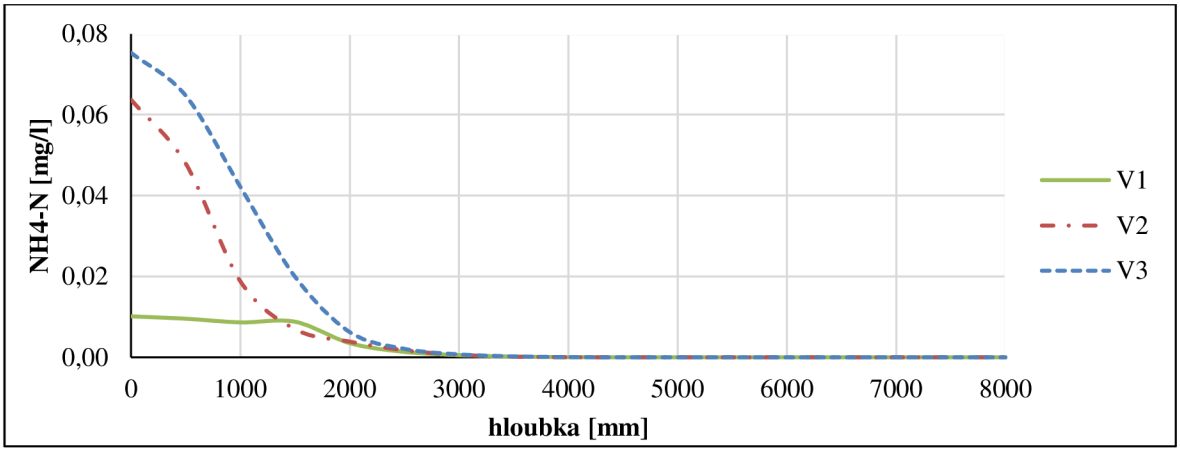


Graf 50: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce.

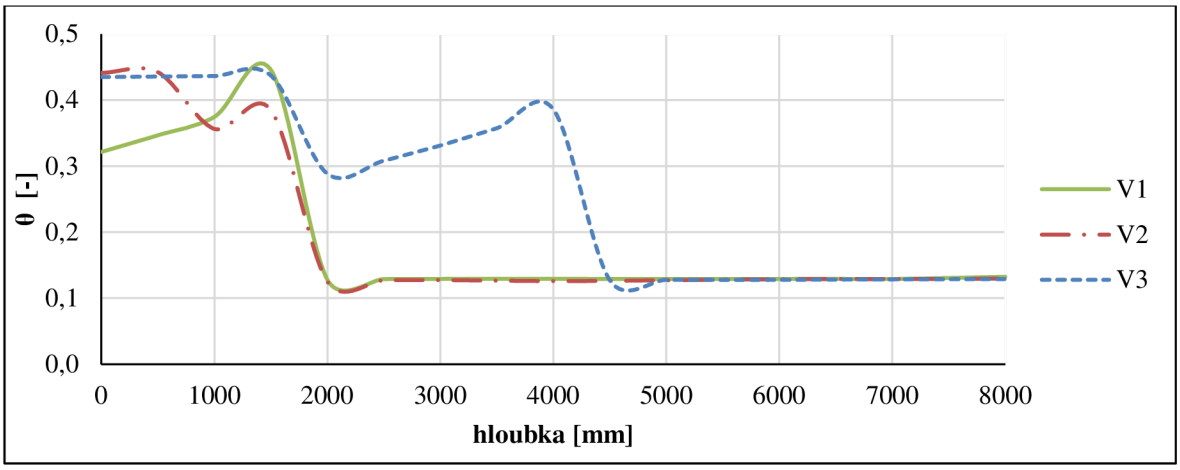


Graf 51: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce.

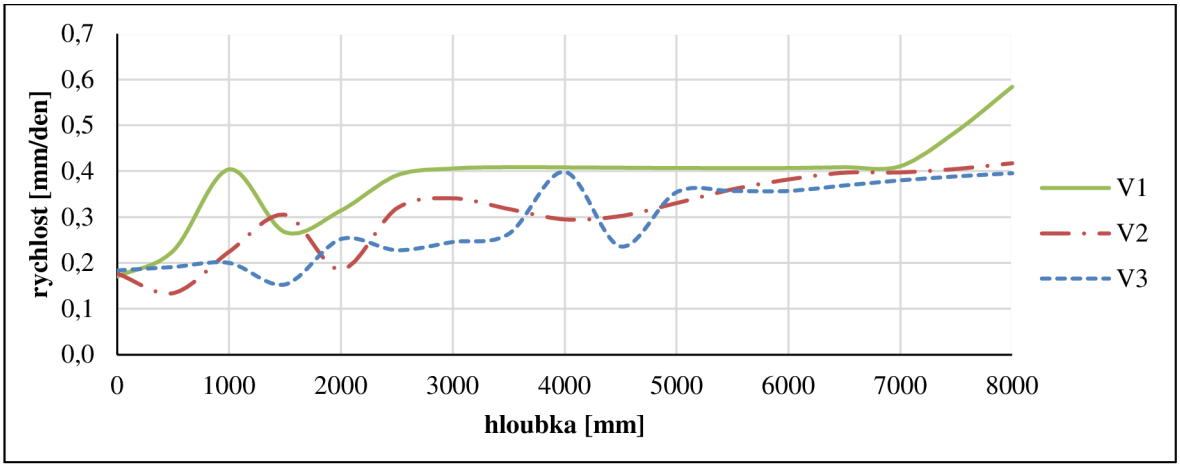
1095 – Poslední den třetího roku



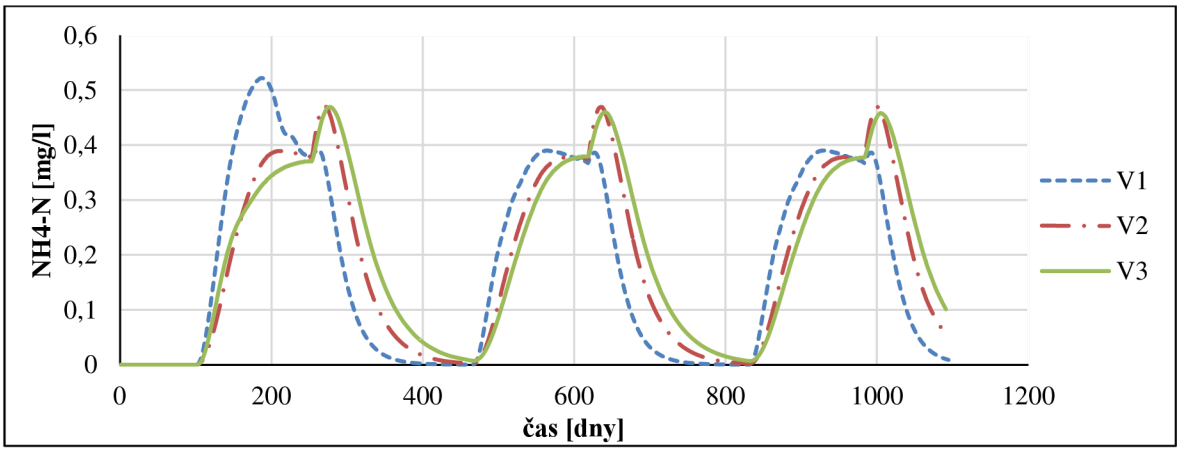
Graf 52: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v posledním dni třetího roku.



Graf 53: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v posledním dni třetího roku.



Graf 54: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v posledním dni třetího roku.

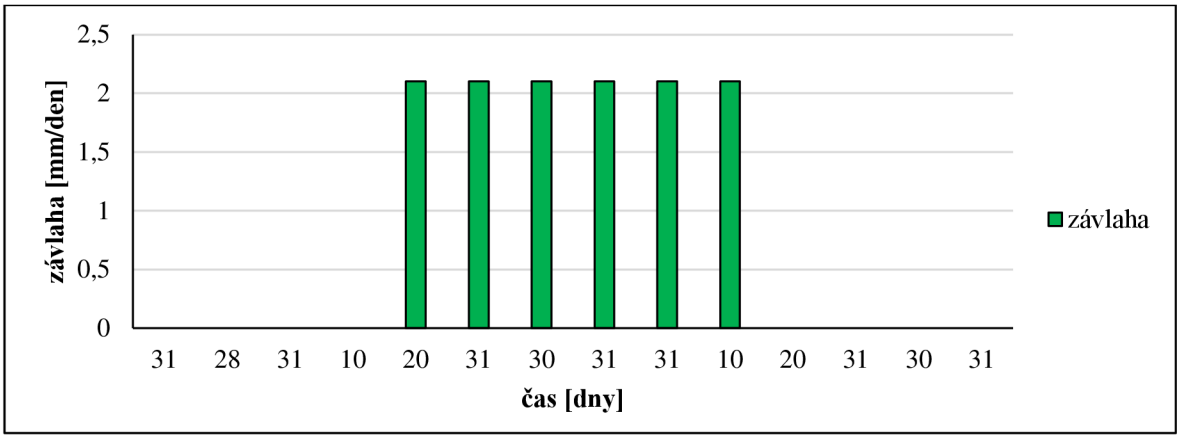


Graf 55: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v hloubce 1000 mm v posledním dni závlahy v třetím roce.

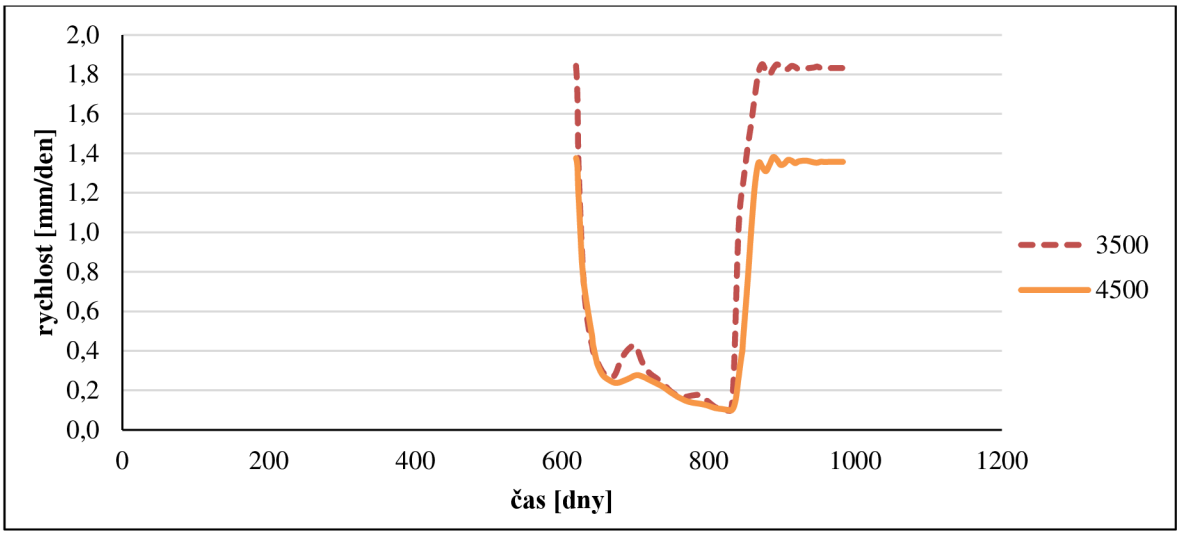
11.5 Odtok do hlubokých vrstev

Jelikož se často může problematika závlahy odpadními vodami potýkat s odporem zejména z důvodu ovlivnění kvality podzemní (pitné) vody, byl numerický model použit k pozorování postupu infiltrující vody spodním okrajem modelované oblasti. Pozorovat je možné jak množství vody, tak koncentraci znečištění (amoniakálního), postupně kumulující se množství znečištění, apod. Zejména aktuální hmotnostní množství odtékající spodním okrajem modelované oblasti se jeví jako veličina, která je pro praxi nejlépe využitelná. Na základě odtokových hodnot lze posoudit, zdali má závlaha odpadní vodou vliv na kvalitu podzemní vody, a pokud ano, jak silný je tento vliv.

Dolní okrajová podmínka v simulačních modelech tří různých variant struktur půd není zadaná tak, aby tyto varianty reálně simulovaly odtok do spodní vody. Přesto, ale malá ukázka jakby tento odtok probíhal se zjednodušujícím předpokladem, a to, že hladina spodní vody je v prostředí, kde se předpokládá, že tok vody je roven hodnotě nenasycené hydraulické vodivosti. Přesnější informace o okrajových podmínkách tohoto modelu jsou uvedeny v kapitole 10.4.10. Je zcela zřejmé, že tato situace v reálných podmínkách nikdy nenastane, a tak je potřeba brát níže uvedené hodnoty pouze jako orientační. Pro reálnější simulaci odtoku by bylo potřeba nastavit již zmíněnou v kapitole 10.4.10 dolní okrajovou podmínku jako „Deep drainage“.



Graf 56: Časové rozložení první varianty závlahové dávky 3200m^3.ha^{-1} pro vegetační období 153 dnů.



Graf 57: Průběh rychlosti infiltrace od konce druhé závlahy do konce třetí závlahy v hloubce 3,5 a 4,5 m; pro první variantu závlahy.

Hloubky, ve kterých jsou v Grafu 57 znázorněny průběhy rychlosti pohybu vody v půdě, byly vybrány náhodně. Data jsou převzatá z kapitoly 11.3 Varianta 3, protože půdní struktura v této variantě se nejvíce podobá půdnímu profilu hnědozemě, která je mezi nejvíce rozšířenými půdními typy v ČR.

Pro návrh stanovení maximální přípustné dávky je třeba počítat s tou nejhorší možnou variantou, která může nastat. Je zřejmé, že největší hodnoty odtoku závlahové vody do vody spodní nastanou za určitou dobu od začátku závlahy a skončí po určité době po ukončení závlahy. Dá se předpokládat, že v reálné situaci bude průběh odtoku do spodní vody pomalejší a jeho křivka bude na časové ose více roztáhnutá. Do výpočtu je také zahrnutá srážková voda.

Tabulka 25: Objemové množství infiltrované vody v hloubce 3500 a 4500 mm v období od konce závlahy v druhém roce do konce závlahy v roce třetím; první varianta závlahy.

popis	den [-]	čas [dny]	Q 3500 [m3.ha^{-1}]	Q 4500 [m3.ha^{-1}]	Q 3500 [%]	Q 4500 [%]
konec závlahy	618	212	662	576	21	24
počátek závlahy	830					
konec závlahy	983	153	2559	1800	79	76

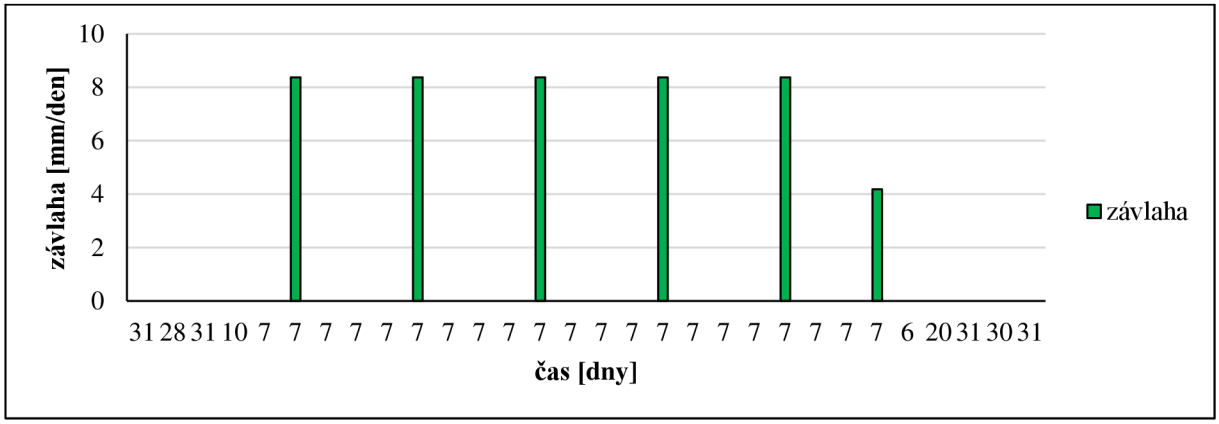
Průměrný průtok v hloubce 3500 v době závlahy je 16,7 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

Průměrný průtok v hloubce 3500 v době bez závlahy je 3,12 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

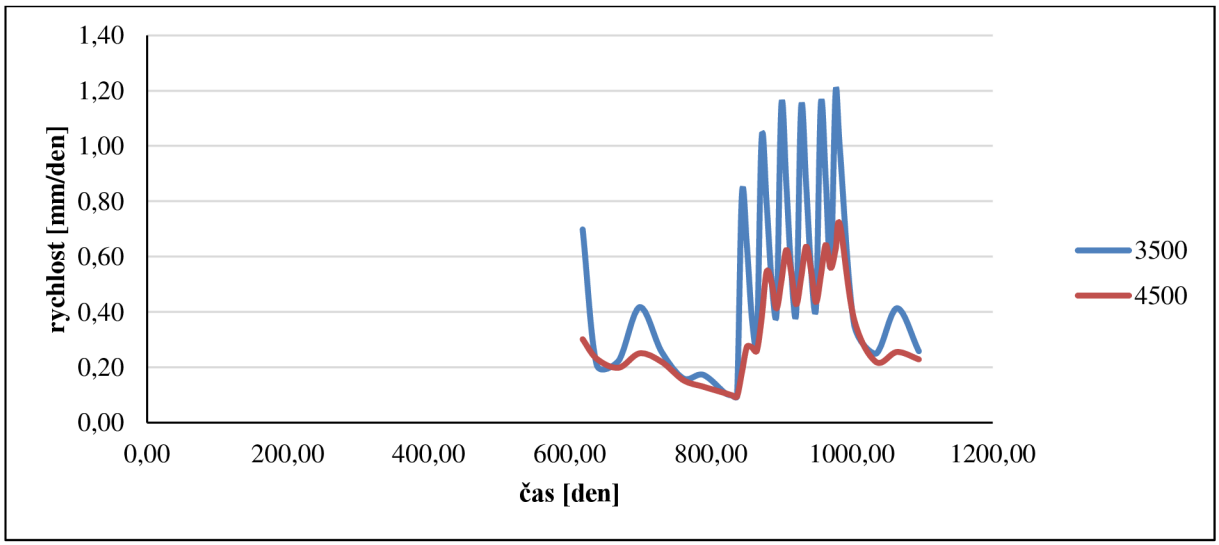
Průměrný průtok v hloubce 4500 v době závlahy je 11,7 $m^3.ha^{-1}.den^{-1}$.

Průměrný průtok v hloubce 4500 v době bez závlahy je 2,7 $m^3.ha^{-1}.den^{-1}$.

Výsledky by nesplnily kritérium uvedené v kapitole Legislativa, tedy že závlahová dávka se nemá dostat do spodních vod. Proto byla provedena další simulace, kde stejná závlahová dávka tedy 3200$m^3.ha^{-1}$ byla rozložena způsobem, který znázorňuje Graf 58.



Graf 58: Časové rozložení druhé varianty závlahové dávky 3200$m^3.ha^{-1}$ pro vegetační období 153 dnů.



Graf 59: Průběh rychlosti vody od konce druhé závlahy do konce třetí závlahy v hloubce 3,5 a 4,5 m; pro druhou variantu závlahy.

Tabulka 26: Objemové množství infiltrované vody v hloubce 3500 a 4500 mm v období od konce závlahy v druhém roce do konce závlahy v roce třetím; druhá varianta závlahy.

popis	den [-]	čas [dny]	Q 3500 [m3.ha^{-1}]	Q 4500 [m3.ha^{-1}]	Q 3500 [%]	Q 4500 [%]
konec závlahy	618	212	954	751	48	52
počátek závlahy	830					
konec závlahy	983	153	1053	689	52	48

Průměrný průtok v hloubce 3500 mm v době závlahy je 6,8 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

Průměrný průtok v hloubce 3500 mm v době bez závlahy je 4,5 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

Průměrný průtok v hloubce 4500 mm v době závlahy je 4,5 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

Průměrný průtok v hloubce 4500 mm v době bez závlahy je 3,5 m^3.ha^{-1}.den^{-1}.

Ve srovnání s výsledky z předchozí situace se objem vody infiltrované do hloubky 3500 mm zmenšil o 62 % a infiltrované do hloubky 4500 mm o 61 %, přestože byla zachována závlahová dávka 3200 m^3.ha^{-1}. Z toho vyplývá, že nezávisí jenom na množství závlahové dávky, ale také na časovém rozložení.

Stanovení přesnějšího průběhu odtoku závlahové vody je důležitý pro další směřování řešení této problematiky. Tento údaj by mohl poskytnout řadu nových možností pro ověřování a porovnávání různých možných postupů, které by směřovaly k návrhu jakési metodiky.

11.6 Množství dusičnanů z vyčištěné odpadní vody

Dusičnany jsou významným článkem v koloběhu dusíku v přírodě a jsou přítomny téměř ve všech půdách. Rostliny přijímají dusík převážně ve formě dusičnanů, proto je výnos rostlin velmi silně závislý na jejich zásobení v půdě. Obsah dusičnanů v půdě přibývá mineralizací organických látek v půdě, dusíkatým hnojením a vodními srážkami. Množství dusičnanů v půdě ubývá převážně příjmem rostlinami, vyplavováním do podzemní vody a částečně také denitrifikací (KALINA, M.).

Určitou výhodou využití vyčištěných odpadních vod pro závlahu může být poměrně malý rozptyl koncentrací jednotlivých ukazatelů, které jsou limitovány emisními standarty přípustného znečištění odpadních vod. Rozptyl kvality vyčištěné vody klesá s velikostí čistírny – obce nad 1000 EO mají často technologii sledovanou kontinuálně, často se jedná o online monitoring

koncentrace O2 v aktivačních nádržích, sledování zákalu apod. Například pro obce s 500 – 2000 ekvivalentními obyvateli je limitní průměrná koncentrace NH_4^+-N=20 mg.l^{-1}.

Za předpokladu, že zanedbáme koncentraci CHSK, BSK ve vyčištěné odpadní vodě a také všechny jiné možnosti vnosu a spotřeby dusičnanů v půdě, můžeme podle nitrifikační rovnice spočítat, kolik dusičnanů vznikne úplnou nitrifikací z 20 mg.l^{-1} NH_4^+-N. Díky tomu dostaneme hodnotu (množství, koncentraci) dusičnanů, které se do přirozeného stavu dodávají navíc oproti situaci, kdy je např. závlaha realizována čistou vodou a bez přídavku umělého hnojiva. Přestože tato hodnota nebude zcela přesná, pravděpodobně bude o něco menší, tak může posloužit jako jakási maximální hodnota dusičnanů, kterou může způsobit závlaha vyčištěnou odpadní vodou, přičemž se uvažuje čistota vody s minimální možnou koncentrací amoniakálního dusíku. Ve výpočtu se předpokládá, že dojde k úplné nitrifikaci. V reálné situaci tomu tak pravděpodobně bude, protože teplota ve vegetačním období je pro nitrifikační bakterie příznivá a množství kyslíku v dobře obhospodařované půdě, kde pórovitost dosahuje například 45 %, je dostatečné. Toto tvrzení také potvrzují výsledky měření vody na odtoku z experimentálních kolon (ipni.net).

Výpočet maximální teoretické koncentrace dusičnanů z vyčištěné odpadní vody pro limitní průměrnou koncentraci NH_4^+-N=20mg.$^{-1}$:

Množství dusitanů z amoniakálního dusíku se vypočítá pomocí molární hmotnosti jednotlivých molekul a jejich procentuálnímu podílu, kdy se obě strany musí rovnat.

$$NH_4^+ + 1{,}5\ O_2 \rightarrow NO_2^- + 2\ H^+ + H_2O$$
$$M(NH_4) + M(1{,}5O_2) = M(NO_2) + M(2H) + M(H_2O)$$
$$18 + 48 = 46 + 2 + 18$$

$$a = \frac{M(NO_2)}{M(NH_4)} = \frac{46}{18} \approx 2{,}56$$
$$20\ \text{mg.}l^{-1}\ NH_4^+ \longrightarrow 20 \times a = 20 \times 2{,}56 \approx 51\ \text{mg.}l^{-1}\ NO_2^-$$

Množství dusičnanů z dusitanů se vypočítá obdobně jako v předchozím případě.

$$NO_2^- + 0{,}5\ O_2 \rightarrow NO_3^-$$
$$M(NO_2) + M(0{,}5O_2) = M(NO_3)$$
$$46 + 16 = 62$$

$$b = \frac{M(NO_3)}{M(NO_2)} = \frac{62}{46} \approx 1{,}35$$
$$51\ \text{mg.}l^{-1}\ NO_2^- \longrightarrow 51 \times b = 51 \times 1{,}35 \approx 69\ \text{mg.}l^{-1}\ NO_3^-$$

Kontrolní výpočet z celkové nitrifikační rovnice.

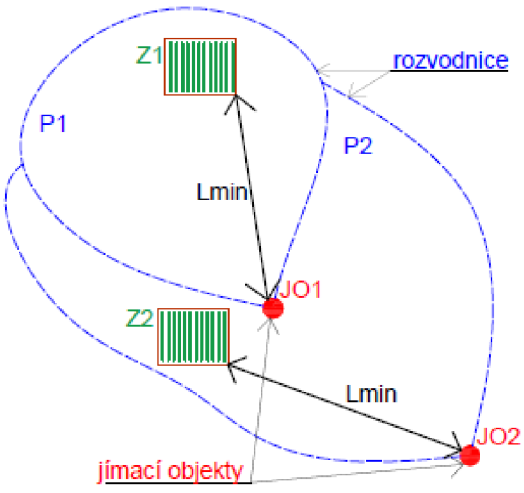
$$NH_4^+ + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O$$
$$M(NH_4) + M(2O_2) = M(NO_3) + M(2H) + M(H_2O)$$
$$18 + 64 = 62 + 2 + 18$$

$$c = \frac{M(NO_3)}{M(NH_4)} = \frac{62}{18} \approx 3{,}44$$
$$20\ \text{mg.l}^{-1}\ NH_4^+ \longrightarrow 20 \times c = 20 \times 3{,}44 \approx 69\ \text{mg.l}^{-1}\ NO_3^-$$

Maximální teoretické koncentrace dusičnanů ve vyčištěné a infiltrující odpadní vodě pro limitní průměrnou odtokovou koncentraci NH_4^+-N=20 mg^{-1} 69 $mg.l^{-1}$ NO_3^-. Modelování průběhu dusičnanů nebylo zpracováváno, nicméně se předpokládá vysoká nitrifikační schopnost kořenové zóny a dalších vodou nenasycených vrstev.

11.7 Návrh na postup pro stanovení přibližné maximální závlahové dávky

Byl zvolen co nejvíce zjednodušený postup výpočtu. Předmětem není přesný výpočet, ale náznak možného postupu. Skutečné hodnoty všech složek hydrologické bilanční rovnice je velice těžké stanovit, především podpovrchový odtok, který je tvořen hypodermickým odtokem a hlubší filtraci (perkolaci). V tomto reprezentativním příkladu jsou všechny hodnoty zvolené, jenom průtok závlahové vody do vody spodní byl převzat z kapitoly 11.5, jedná se ale pouze o orientační hodnotu průtoku. Taktéž se zanedbává rozdíl mezi orografickou a hydrogeologickou rozvodnicí.



Obrázek 17: Schéma zakreslení pro návrh přístupu k určení maximální závlahové dávky u jednotlivých závlahových ploch.

Na obrázku 17 jsou červené body (jímací objekty) závěrné profily dvou malých povodí, které jsou zakresleny orografickou rozvodnici. Zelené obdélníky jsou zemědělské plochy, kde by docházelo k závlaze vyčištěnou odpadní vodou a zkratka L_{min} je minimální vzdálenost takto zavlažovaných ploch od jímacího objektu.

Zvolené hodnoty:

- hladina spodní vody pod zemědělskou půdou H=4,5m
- průměrný průtok závlahové vody pro hloubku 4,5m dle třetí experimentální varianty
- koncentrace dusičnanů v ředící vodě 30mg.l^{-1}
- koncentrace dusičnanů ze závlahové vody 70 mg.l^{-1}
- průměrný odtokový součinitel pro oba povodí je C=0,2
- plocha prvního povodí je $A_1 \approx$ 2km^2, druhého povodí je $A_2 \approx$ 4 km^2
- Zemědělská plocha A_{Z1}=50 ha, A_{Z2}=80 ha
- roční výška srážek $H_s \approx$ 550 mm
- roční výška výparu $H_v \approx$ 400 mm
- roční výška přímého povrchového odtoku OP ≈ 550 x 0,2 ≈ 110 mm
- roční výška odtoku vody do hlubších vrstev OS ≈ 40 mm ≈ 110 m^3.km^{-2}.den^{-1}

Výpočet směšovací rovnice:

$$Q_i = OS \times A_i$$
$$Q_1 \approx 11\,000 \times 2 \approx 220\, m^3.den^{-1}$$
$$Q_2 \approx 11\,000 \times 4 \approx 440\, m^3.den^{-1}$$

Průměrný průtok závlahové vody v hloubce 4,5 v době závlahy je $Q_v \approx$4,5 m^3.ha^{-1}.den^{-1}

$$Q_{zi} = A_{zi} \times Q_v$$
$$Q_{z1} \approx 50 \times 4{,}5 \approx 225\, m^3.den^{-1}$$
$$Q_{z2} \approx 80 \times 4{,}5 \approx 360\, m^3.den^{-1}$$

$$c_{P1} = \frac{Q_1 \times c_o + Q_{z1} \times c_d}{Q_1 + Q_{z1}}$$
$$c_{P1} \approx \frac{220 \times 30 + 225 \times 70}{220 + 225} \approx 51\, mg.l^{-1}$$

Koncentrace dusičnanů ve vodě z prvního jímacího objektu by byla přibližně stejná jako hodnota, kterou uvádí norma tedy 50mg.l^{-1}. V případě větší koncentrace by se pravděpodobně musela změnit pěstovaná plodina s menší potřebou závlahové vody.

V druhém povodí by bylo potřeba počítat také s povodím prvním.

$$c_{P2} \approx \frac{Q_2 \times c_o + Q_{z2} \times c_d + Q_1 \times c_o + Q_{z1} \times c_d}{Q_2 + Q_{z2} + Q_1 + Q_{z1}}$$

$$c_{P2} \approx \frac{440 \times 30 + 360 \times 70 + 220 \times 30 + 225 \times 70}{440 + 360 + 220 + 225} \approx 48\, mg.l^{-1}$$

Koncentrace dusičnanů ve vodě z druhého jímacího objektu by byla nižší než hodnota, kterou uvádí norma pro pitnou vodu.

V tomto postupu bude zpravidla platit, že ve vzdálenějších po směru proudění řešených oblastech, které se na sebe budou kumulovat, se bude koncentrace dané látky měnit pomaleji, protože objem ředící vody bude větší.

Tento postup by se mohl aplikovat pro všechny látky, které se v půdě zcela neodstraní, a tak dále prosakují do spodních vod.

12 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU

V následném řešení dané problematiky by měla být pozornost věnována následujícím tématům:

1) Nastudovat optimální podmínky pro optimalizaci procesu denitrifikace v půdě a podle toho uzpůsobit časové rozložení závlahové dávky a druh pěstované plodiny (cambridge.org) (ipni.net)
2) Vytvořit komplexní model zahrnující nenasycenou, kapilární a nenasycenou zónu
3) Stanovit doporučenou minimální vzdálenost zavlažovaných ploch vyčištěnou odpadní vodou od jímacích objektů
4) Důkladně nastudovat nejrozsáhlejší dohledanou studii, která shrnuje výsledky desítek studii na toto téma (intechopen.com)
5) Provést reálnou aplikaci s kontrolními studnami a prozatím aplikovat pouze v lokalitách, kde se pěstují plodiny za účelem krmiva pro zvířata

V následujících bodech je předložen návrh, jak by se mohlo teoreticky postupovat při projektování závlahy vyčištěnou odpadní vodou. Důraz je kladen na snížení rizika kontaminace spodní vody rozpuštěnými látkami, které se v průběhu infiltrace půdou neodstraní, anebo se přemění na jiný produkt (dusičnany). Je potřeba prozkoumat níže navrhovaný postup a stanovit jeho přednosti a nedostatky.

Pro každou danou oblast řešit individuálně:

1) Zakreslit na mapě jímací objekty
2) Od jímacích objektů zakreslit proti směru proudění minimální vzdálenost np. 1km
3) Zakreslit hranice orografickou rozvodnici povodí k jímacím objektům jako k závěrným profilům
4) Stanovit plochu povodí nad jímacím objektem
5) Stanovit jednotlivé členy hydrologické bilanční rovnice pro dané povodí
6) Určit hloubku spodní vody pod zemědělskou půdou
7) Stanovit strukturu půdy v závlahové oblasti
8) Tvorba simulačního modelu v HYDRUSU – výpočet objemu infiltrované závlahové
9) Výpočet směšovací rovnice pro určitý jímací objekt
10) Podle výpočtem předpovídané koncentrace rozpuštěné látky v okolí jímacího objektu rozhodnout, zda daná koncentrace nepřekročuje limity pro pitnou vodu

13 ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problematiku, která není sice v současné době prioritním tématem nakládání s vodami, ale přesto lze tušit na základě zahraničních zkušeností a vývoje, že se v budoucnu z odpadní vody postupně stane účinný zdroj vody pro závlahové systémy.

Práce se soustředí na vytvoření zjednodušeného numerického modelu, který je kalibrován na základě získaných dat. Před samotným sestavováním modelu bylo nutné realizovat několik poloprovozních testovacích filtračních kolon. Zařízení bylo umístěno na čistírně odpadních vod v obci Dražovice. Osazeno bylo několika dataloggery (vlhkostní a teplotní čidla), připojeno bylo na automatický závlahový systém, který zajišťuje pro účely numerického modelu snadno definovatelné okrajové podmínky (konstantní požadovaná vlhkost v půdním profilu).

Filtrační kolony byly naplněny pískem, hlínou a hlinitým pískem, celkově byly instalovány čtyři experimentální kolony. Čtvrtá kolona naplněná hlinitým pískem plnila účel kontroly výsledků měření.

Zatíženy byly vyčištěnou odpadní vodou, která protékala speciálně připravenou filtrační kolonou, zajišťující dostatečné objemové množství vody, potřebné pro závlahu.

Práce se zaměřila na sledování průniku znečištění, ze znečišťujících látek byl vybrán amoniakální dusík.

Na základě známých hydraulických i chemických parametrů by numerický model postupně kalibrován. Jako první probíhala kalibrace pro hydraulické charakteristiky prostředí, navazovala kalibrace na podle známého šíření znečištění, hledány byly reakční a sorpční charakteristiky.

Výsledky ukazují, že spolehlivost zpracovaného modelu z hlediska hydrauliky dosahuje u hlíny 74 %, u hlinitopísčité půdy 78 % a u písku 89 %, a z hlediska transportu rozpuštěných látek dosahuje u hlíny 94 %, u hlinitopísčité půdy 99 % a u písku 98 % což lze považovat za spolehlivý model a výsledek. Zásadní a nejspíše nejdůležitější výsledky přináší rozklíčování průběhu šíření znečištění. Již v hloubce 1000 mm je na konci 153 dnů trvající intenzivní závlahy je koncentrace NH_4^+-N z původních 20 $mg.l^{-1}$ snížena na 0,2 $mg.^{-1}$. Další z mnoha výsledků je zjištění, že během simulace tří leté závlahy nedochází v žádné hloubce k akumulaci NH_4^+-N. Dalším zajímavým výsledkem je např. porovnání odtoku do hlubokých vrstev z hlediska časové rozložení stejného objemu závlahové dávky.

Tato práce ukázala, že použití takových softwarů, jakým je HYDRUS 2D, má potenciál propraktické využití při posuzování maximální závlahové dávky vyčištěnou odpadní vodou

z hlediska možné infiltrace této vody do hlubokých vrstev. Uvedené výsledky, postřehy a myšlenky mohou být v praxi použité při tvorbě postupu projektování závlahy vyčištěné odpadní vodou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura

Aquarec Project. Work Package 2. *Guideline for Quality Standards for Water Reuse in Europe.* EVK1-CT-2002-00130.

BEAR, J. CHENG, A. H-D. *Modeling groundwater flow and contaminant transport - Theory and applications of transport in porous media*. London: Springer, 2010, ISBN 14-020-6682-1.

BIXIO, D., THOEYE, T., DE KONING, J., JOKSIMOVIC, D., SAVIC, D., WINTGENS, T. *Wastewater reuse in Europe.* Desalination, 2006, 187 s.

BONTON A., ROULEAU A., BOUCHARD C., RODRIGUEZ M. J. *Nitrate transport modeling to evaluate source water protection scenarios for a municipal well in an agricultural area, Agricultural Systems*. 2011.

CELIA, M. A. *A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation, Water resources research*. 1980.

CÍSLEROVÁ, M. *Inženýrská hydropedologie*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 156 s.

CÍSLEROVÁ, M., VOGEL, T. *Transportní procesy.* Praha: ČVUT, 1998, 182 s. ISBN 80-01-01866-0.

DUCHAN, D., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. *Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod: Hydraulika vsakování dešťových vod.* Vydání první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-5017-2.

DURNER, W. *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resour. Res., 1994.

EU. *Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union European Union (EU)*. Brussels: EU, 2007, (COM/2007/0414).

FAO. Coping with water scarcity. *An action framework for agriculture and food security FAO Water Reports.* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012. ISBN: 978-92-5-107304-9.

FAO. FAO statistical yearbook 2013. *World Food and Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. ISBN: 978-92-5-107396-4.

FAO: P. KOOHAFKAN, B.A. STEWART (Eds.) *Drylands, people and land use., Water and Cereals in Drylands.* Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2008, ISBN: 978-92-5-1060520.

GAVLASOVÁ, I. *Pedotransferové funkce pro odhad vlhkostních retenčních křivek středně těžkých půd jižní Moravy.* Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Ivana Kameníčková, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, 2013.

Hydrus user manul, 2006.

ISBN: 0-230-50058-7, NIEMCZYNOWICZ, J.: *Urban hydrology and water management — present and future challenges.* Urban Water, 1, 1999, 1–14 s.

KALAVROUZIOTIS, I. K., KOKKINOS, P., ORON, G., FATONE, F., BOLZONELLA, D., VATYLIOTOU, M. *Current status in wastewater treatment, reuse and research in some Mediterranean countries.* Desalin, Water Treat, 2013.

KALINA, M. *Hnojení půdy a kompostování v zahradě.* Praha: Grada Publishing, a.s., 2016, 128 s. ISBN 978-80-247-5848-0.

KODEŠOVÁ, R. *Modelování v pedologii*, 2. vydání. Praha: ČZU, 2012, 152 s. ISBN 80-213-1347-1.

KOOL, J. B., PARKER, J. C. *Development and evaluation of closed-form expression for hysteretic soil hydraulic properties*. Water Resour, 1987.

KURÁŽ M. *Numerical solution of the flow and transport equations in porous media with the dual permeability conceptual approach.* Zlín: VeRBuM, 2011. ISBN 978-80-87500-12-5.

KUTÍLEK, M. *Vlhkost pórovitých materiálů.* Praha: SNTL, 1984, 210 s.

LÓŽIOVÁ, L. *Matematické modelování transportních procesů v porézním prostředí*. Diplomová práce. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013.

MASE G. E., *Theory and problems of continuum mechanics.* New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

MATĚJKA, F. Vplyv meteorologických činitělov na evapotranspiráciu. *Meteorologické Zprávy 48,* 1995, č. 3, s. 90.

MUCHA, I., ŠESTAKOV, V. *Hydraulika podzemných vôd.* Bratislava: Alfa, Bratislava spolu se SNTL, Praha, 1987.

NDOUR, N.Y.B., BAUDOIN, E., GUISSÉ, A., SECK, M., KHOUMA, M., BRAUMAN, A. *Impact of irrigation water quality on soil nitrifying and total bacterial communities.* Biol. Fertil. Soils, 44, 2008, 797–803 s.

ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T. *Závlahy a jejich perspektiva.* Mikulov, 2015, ISBN 978-80-87577-47-9.

ŘÍHA, J. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů.* Brno: VUT Brno, 1997, 185 s. ISBN 80-214-0827-8.

SCOTT, P.S., FARQUHAR G. J., KOUWEN N. *Hysteresis effects on net infiltration,in Advanves Infiltration.* Am.Soc. of Agric. Eng., St. Joseph., 1983.

SHIKLOMANOV, I.A. World fresh water resources, P.H. GLEICK (Ed.), *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press, 1993 13 –24 s.

STŘELCOVÁ, K., KUČERA, J. *Stanovenie evapotranspirácie smrekového porastu metódou s dendromentrickým prístupom.* In ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T.: Evaporace a evapotranspirace: Sborník z mezinárodního vědeckého semináře. Brno: ČHMÚ, 2005, ISBN 80-86690-24-5.

ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., van GENUCHTEN, M. Th. *The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC - TPS – 5.* Colorado: International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, 1999, 251 s.

ŠRÁČEK O., DATEL J., MLS J. *Kontaminační hydrogeologie*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2002.

ŠRÁMKOVÁ M., WANNER, J. *Opětovné využití vyčištěné odpadní vody.* Sborník konference Pitná voda 2010, České Budějovice: W&ET Team, 2010, s. 264. ISBN 978-80-254-6854-8

ŠVEC, M. *Určení vlivu evapotranspirace pro zpřesnění srážko-odtokových modelů.* In RŮŽIČKA, J., PEŠKOVÁ, K.: Sborník - Sympozium GIS Ostrava 2011. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 155 s. ISBN 978-80-248-2366-9.

Technical manual HYDRUS, 2006.

TOURKOVÁ, J. *Hydrogeologie.* Praha: ČVUT, 1996, 165 s. ISBN 80-01-03101-2.

UNDP. *Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis*. New York: United Nations Development Programme (UNDP), 2006. ISBN: 0-230-50058-7.

VALENTOVÁ, J. *Hydraulika podzemní vody*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 158 s. ISBN 80-01-01167-4.

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

WHO: *Guidelines for the Safe Use of Wastewater*. Excreta and Greywater. France: World Health Organization (WHO), 2006. ISBN: 92-4-154683-2.

ZAVADIL J. *Kritéria využití městských odpadních vod k závlaze zemědělských plodin, Metodika.* Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., 2008.

Internetové zdroje

Agrocenzus 2010 - Strukturální šetření v zemědělství a metody zemědělské výroby – 2010. *Český statistický úřad.* [online]. Aktual. 26. 8. 2011 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/agrocenzus-2010-strukturalni-setreni-v-zemedelstvi-a-metody-zemedelske-vyroby-2010-q4sw1ne9f5>.

Beneficial and Negative Impacts on Soil by the Reuse of Treated/Untreated Municipal Wastewater for Agricultural Irrigation. *Intech.* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/57226>.

Čistírny odpadních vod v ČR. *old.pglb.cz* [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://old.pglbc.cz/files/chv/COV/vyznam.html>.

Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. *Cambridge University Press.* Aktual. Srpen 1958 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/div classtitledenitrification-in-soil-ii-factors-affecting denitrificationdiv/5A9655255969C713EB52713A1B73DB9E>.

Denitrification. *IPNI.* [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.ipni.net/publication/nitrogen-en.nsf/0/668099AE825517CB85257DD600054B8C/$FILE/NitrogenNotes-EN-5.pdf>.

Evapotranspirační modelování. *Aretin.* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.aretin.cz/?l=cz&t=projekty&refid=evapo-trans-model>.

Graf dat sondy 00002; Bohaté Málkovice. *Ala.* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://a.la-a.la/chart/cl.php?probe=11359123>.

Hydrodinamická disperze. *Is.muni.cz* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/el/1431/podzim2009/G7401/um/prednaska_4.pdf>.

Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky. *Voda.chmi.cz* Aktual. srpen 2015 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/zprava_bilance_04.pdf>.

Hydrus 2D/3D for Windows. Pc-progress. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?HYDRUS-3D>.

Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances. *Science Direct.* Aktual. leden 2007 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506007740>.

KULOVANÁ, E. Fosfor v půdě. *Úroda.* Aktual. 5. 1. 2001 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://uroda.cz/fosfor-v-pude/>.

Mapa meteorologických stanic MeteoUNI s GSM přenosem na území České a Slovenské republiky. *Amet.cz* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.amet.cz/meteodupont.htm>.

Plán oblasti povodí Dyje. *pmo.cz* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/pop/2009/Dyje/end/index.html>.

Propustnost hornin a půdy. *Encyklopedie Vševěd.* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://encyklopedie.vseved.cz/propustnost+hornin+a+půdy>.

Půdní horizonty – co je to půdní profil? Vítejte na zemi. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=pudni_horizonty_co_je_to_pudni_profil&site=puda>.

Soudný den - fosforečný vrchol? (období kdy budou vytěženy dostupné zásoby fosfátů na Zemi). *Zemědělská společnost Chrášťany.* Aktual. 7. 3. 2014 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.zsch.cz/news/bude-nedostatek-fosforecnych-hnojiv-/>.

SPITZ, P., FILIP, J. Potřeba závlah při predikované klimatické změně v České republice. *cbks.cz* [online]. Aktual. 19. 11. 2001 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.cbks.cz/sucho01/Spitz.pdf>.

STROCH, D. Hlad po fosforu. *Respekt.* [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <www.cts.cuni.cz/soubory/Media/Storch_Hlad_po_fosforu.pdf>.

WANNER, F. Úloha opětovného využívání vyčištěných odpadních vod v budoucím plánování vodních zdrojů v Evropě. *Sdružení odboru vodovodů a kanalizací ČR.* [online]. Aktual. 21. 12. 2016 [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.sovak.cz/clanky/jorg-e-drewes-uloha-

opetovneho-vyuzivani-vycistenych-odpadnich-vod-v-budoucim-planovani-vodnich-zdroju-v-evrope>.

Základy pedologie a ochrany půdy. *pedologie.czu.cz* [online]. [cit. 2. 1. 2017]. Dostupné z: <http://pedologie.czu.cz/prednasky/zpop/zpop5.pdf>.

Právní předpisy

ČSN 75 0434 - Meliorace. Potřeba vody pro doplňkovou závlahu**.**

ČSN 75 7143 - Jakost vod. Jakost vody pro závlahu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Srovnání dvou zemědělských polí ve stejné lokalitě v centrálním Mexiku, kde na levém obrázku se závlaha nepoužívá a na pravém se zavlažuje nevyčištěnou odpadní vodou (intechopen.com). 19

Obrázek 2: Hystereze retenční křivky, rozdíl mezi drenážní a zvlhčovací větví (pedologie.czu.cz). 26

Obrázek 3: Schematizované profily hlavních půdních typů na území České republiky (vítejtenazemi.cz). 32

Obrázek 4: Mapa pedologických poměrů oblasti povodí řeky Dyje (pmo.cz). 33

Obrázek 5: Mapa zavlažovaných ploch v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz). 34

Obrázek 6: Mapa vstupů plošného znečištění dusíkem do půdy v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz). 35

Obrázek 7: Mapa vstupů plošného znečištění fosforem do půdy v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz). 36

Obrázek 8: Mapa potenciální plošné vodní eroze ve vodních útvarech v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz). 37

Obrázek 9: Mapa poměru průtoků Q_a/Q_{330d} vyjadřuje v agregované podobě přirozené akumulační schopnosti v oblasti povodí řeky Dyje v období mezi roky 2010-2015 (pmo.cz). 38

Obrázek 10: Pohled na kořenová pole KČOV v Dražovicích v roce 2014. 50

Obrázek 11: Spodní část kolon a místo pro odběr vzorků vody. 54

Obrázek 12: Pohled na závlahový systém a rostliny v horní části kolon. 54

Obrázek 13: Pohled na experimentální filtrační kolony. 55

Obrázek 14: Rozdíly mezi ročními srážkami a evapotranspiraci (aretin.cz) 60

Obrázek 15: Znázornění použití okrajových podmínek v simulačních procesech. 74

Obrázek 16: Přehled variant pro simulaci tříleté závlahy. 88

Obrázek 17: Schéma zakreslení pro návrh přístupu k určení maximální závlahové dávky u jednotlivých závlahových ploch. 107

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled možného použití vyčištěných odpadních vod v podmínkách ČR (Šrámková, 2010).....15

Tabulka 2: Koncentrace [$\mu g.l^{-1}$] xenobiotik na přítoku a odtoku z ČOV, a ve studnách v oblasti 40-leté závlahy se stanovenou 95% spolehlivostí odběrů vzorků. LOQ je nezměřitelná koncentrace (sciencedirect.com). 16

Tabulka 3: Doba přežití některých patogenů v půdě a plodinách zavlažované vyčištěnou odpadní vodou (intechopen.com). 17

Tabulka 4: Procesy v půdě, které zlepšují kvalitu odpadních vod, vzhledem k vybraným parametrům (intechopen.com). 17

Tabulka 5: Shrnutí negativních vlivů na půdní organismy v důsledku výskytu znečišťujících látek ve stopových koncentracích, u kterých se objevují obavy (intechopen.com). 18

Tabulka 6: Srovnání výnosů plodin, kde se využívá pro závlahu nevyčištěná odpadní voda a spodní voda (intechopen.com). 19

Tabulka 7: Přehled veličin hydrologické bilance (voda.chmi.cz) 31

Tabulka 8: Emisní standardy: přípustné hodnoty (p), maximální hodnoty (m) a hodnoty průměru koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod (zákonyprolidi.cz). 51

Tabulka 9: Výsledky rozboru závlahové vody na vstupu do filtračních kolon. 56

Tabulka 10: Výsledky rozboru závlahové vody na výstupu z filtračních kolon. 57

Tabulka 11: Naměřené hodnoty snímačem objemové vlhkosti v hloubce 500 mm. 62

Tabulka 12: Koncentrace NH_4^+-N na vstupu do experimentálních kolon. 63

Tabulka 13: Kalibrace numerického modelu – data: koncentrace NH4-N na odtoku z filtračních kolon. 64

Tabulka 14: Srážky v období měření (www.amet.cz). 65

Tabulka 15: Hodnoty závlahové dávky během měření. 66

Tabulka 16: Hodnoty celkového objemu vody vstupující do experimentální kolony. 67

Tabulka 17: Objemy evapotranspirace a srážek v jednotlivých měsících. 68

Tabulka 18: Počáteční hodnoty objemové vlhkosti půdy. 72

Tabulka 19: Počáteční koncentrace pro kalibraci HYDRUSU. 73

Tabulka 20: Počáteční koncentrace pro kalibraci HYDRUSU. 73

Tabulka 21: Parametry definující transport rozpuštěných látek. 76

Tabulka 22: Hydraulické parametry jednotlivých zemin. 76

Tabulka 23: Výtah z normy CSN 75 0434 uvádějící potřebu vody pro doplňkovou závlahu brambor. 89

Tabulka 24: Celkové množství vody vstupující do modelace tříleté závlahy. 89

Tabulka 25: Objemové množství infiltrované vody v hloubce 3500 a 4500 mm v období od konce závlahy v druhém roce do konce závlahy v roce třetím; první varianta závlahy. 103

Tabulka 26: Objemové množství infiltrované vody v hloubce 3500 a 4500 mm v období od konce závlahy v druhém roce do konce závlahy v roce třetím; druhá varianta závlahy. 105

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Průběh oblemové vlhkosti jednotlivých zemin během měření. 61

Graf 2: Vstupní okrajová podmínka koncentrace NH_4^+-N přitékající vody na horní okraj testovaných filtrančích kolon. 63

Graf 3: Průběh koncentrace NH_4^+-N na výstupu s experimentálních kolon. 64

Graf 4: Průběh koncentrace NH_4^+-N na výstupu z experimentálních kolon (www.amet.cz). 65

Graf 5: Průběh závlahy během měření (www.amet.cz). 66

Graf 6: Porovnání průběhu závlahy a srážek během měření (www.amet.cz). 67

Graf 7: Průběh evapotranspirace a srážek v jednotlivých měsících. 68

Graf 8: Průběh objemové vlhkosti pískem dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 77

Graf 9: Průběh NH_4^+-N pískem dle měření v hloubce 1670 mm (M1670) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 77

Graf 10: Příčný řez modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N pískem v dnech 20, 40, 60, 80. 78

Graf 11: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace pískem ve dnech 20, 40, 60, 80. 78

Graf 12: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti pískem ve dnech 20, 40, 60, 80. 79

Graf 13: Průběh NH_4^+-N hlínou dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 79

Graf 14: Průběh objemové vlhkosti hlínou dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 80

Graf 15: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80. 80

Graf 16: Příčný řez modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80. 81

Graf 17: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlínou ve dnech 20, 40, 60, 80. 81

Graf 18: Průběh NH_4^+-N hlinitým pískem I dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 82

Graf 19: Průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem I dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 82

Graf 20: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80. 83

Graf 21: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80. 83

Graf 22: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem I ve dnech 20, 40, 60, 80. 84

Graf 23: Průběh NH_4^+-N hlinitým pískem II dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 84

Graf 24: Průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem II dle měření v hloubce 500 mm (M500) a modelu v různých hloubkách (170, 500, 840, 1170, 1500 mm). 85

Graf 25: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80. 85

Graf 26: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh rychlosti infiltrace hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80. 86

Graf 27: Příčný řez simulačním modelem znázorňující průběh objemové vlhkosti hlinitým pískem II ve dnech 20, 40, 60, 80. 86

Graf 28: Porovnání příčných řezů simulačními modely znázorňující průběh objemové vlhkosti po 80 dnech. 87

Graf 29: Porovnání průběhů koncentrace NH_4^+ v hloubce 1170 mm u jednotlivých simulačních modelů v době měření. 87

Graf 30: Průběh množství závlahy pro simulaci tříleté závlahy. 89

Graf 31: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V1. 90

Graf 32: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V1. 90

Graf 33: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 91

Graf 34: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 91

Graf 35: Příčný řez simulačním modelem V1 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 92

Graf 36: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V2. 92

Graf 37: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V2. 93

Graf 38: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 93

Graf 39: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 94

Graf 40: Příčný řez simulačním modelem V2 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 94

Graf 41: Průběh koncentrace NH_4^+-N v různých hloubkách simulačního modelu V3. 95

Graf 42: Průběh objemové vlhkosti v různých hloubkách simulačního modelu V3. 95

Graf 43: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh koncentrace NH_4^+-N ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 96

Graf 44: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh rychlosti infiltrace ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 96

Graf 45: Příčný řez simulačním modelem V3 znázorňující průběh objemové vlhkosti ve dnech 830 (počátek závlahy), 983 (konec závlahy) a 1095 (konec třetího roku); svislé čáry značí hranice vrstev. 97

Graf 46: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce. 97

Graf 47: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce. 98

Graf 48: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v posledním dni závlahy ve třetím roce. 98

Graf 49: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce. 99

Graf 50: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce. 99

Graf 51: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v dnu před závlahou ve třetím roce. 100

Graf 52: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v posledním dni třetího roku. 100

Graf 53: Porovnání průběhu objemové vlhkosti simulačními modely v posledním dni třetího roku. 101

Graf 54: Porovnání průběhu rychlosti infiltrace simulačními modely v posledním dni třetího roku. 101

Graf 55: Porovnání průběhu koncentrace NH_4^+-N simulačními modely v hloubce 1000 mm v posledním dni závlahy v třetím roce. 101

Graf 56: Časové rozložení první varianty závlahové dávky $3200 m^3.ha^{-1}$ pro vegetační období 153 dnů. 102

Graf 57: Průběh rychlosti infiltrace od konce druhé závlahy do konce třetí závlahy v hloubce 3,5 a 4,5 m; pro první variantu závlahy. 103

Graf 58: Časové rozložení druhé varianty závlahové dávky $3200 m^3.ha^{-1}$ pro vegetační období 153 dnů. 104

Graf 59: Průběh rychlosti vody od konce druhé závlahy do konce třetí závlahy v hloubce 3,5 a 4,5 m; pro druhou variantu závlahy. 104