



FAKULTA STAVEBNÍ

Diplomová práce

2019/2020

Návrh experimentální zelené střechy zavlažované šedou vodou

leden 2020

Jan Pipta

Poděkování

Vřelý dík patří Doc. Ing. Michalovi Sněhotovi, Ph.D. za vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce a dále panu Ing. Michalu Šperlingovi, který byl ochoten poskytnout odbornou konzultaci a předal cenné rady k řešenému tématu.

Tato práce je součástí řešení dílčího projektu REVOZIM v rámci Centra pokročilých materiálů a efektivních budov, NCK CAMEB, podpořeného Technologickou agenturou České republiky. Tímto děkuji výše zmíněným, že jsem se mohl na tomto projektu podílet.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing Michala Sněhoty, Ph. D. včetně použití odborné literatury a zdrojů informací.

V Mariánských Lázních dne

.....

Obsah

Seznam veličin a zkratek.....	8
Základní pojmy	9
Úvod	10
1. Rešerše.....	12
1.1 Vlastnosti šedé vody a její vliv na půdní charakteristiky.....	12
1.2 Zelené střechy	15
1.3 Závlaha zelených střech šedou vodou.....	16
1.4 Substrát zelených střech a vegetace	20
1.5 Umělé mokřadní systémy	23
1.6 Hydraulické charakteristiky	26
1.7 Hydraulické charakteristiky pórovitých materiálů.....	27
1.7.1 Retenční čára.....	27
1.7.2 Nasycená hydraulická vodivost.....	28
2. Cíle práce.....	29
3. Praktická část	30
3.1 Hydraulická vodivost.....	30
3.1.1 Materiály	30
3.1.2 Metody	30
3.1.3 Výsledky	32

3.2	Retenční křivka a stanovení hydraulických charakteristik.....	33
3.2.1	Metody	33
3.2.2	Výsledky	35
3.3	Model experimentální zelené střechy	36
3.4	Výpočet výšky přepadového paprsku a přelivná hrana	40
3.4.1	Metody	40
3.4.2	Výsledky	41
3.5	Stanovení závlahového množství.....	42
3.5.1	Metody	42
3.5.2	Výsledky	47
3.6	Počet závlahových dávek.....	51
3.7	Doporučení pro provoz experimentální střechy.....	53
4.	Diskuse.....	54
	Závěr	56
	Seznam zdrojů.....	58
	Seznam příloh	62

Abstrakt

Tato práce řeší návrh modelu experimentální zelené střechy, na němž bude testována možnost závlahy šedou vodou a její vliv na půdní charakteristiky střešních substrátů. Návrh byl proveden na základě rešerše literatury, která se zabývá problematikou čištění odpadních vod, zelených střech a také umělých mokřadů. Tvorba fyzikálního modelu se opírá o matematický model proudění vody v soustavě nádrží. K sestavení matematického modelu byly laboratorně zjištěny půdní charakteristiky zvolených materiálů předpokládaného souvrství experimentální střechy. Výstupem této práce je návrh experimentální sestavy ve výkresové dokumentaci a doporučených průtoků pro provoz. Model sestává ze dvou nerezových van vhodných pro umístění venku. První menší nádrž reprezentuje předčištění umělým mokřadem. Umělý mokřad je navržený jako systém nádržek, otvorů a přelivů zajišťující rovnoměrnou distribuci vody do druhé části modelu, kterou je extenzivní zelená střecha. Odtok z tohoto segmentu je monitorován průtokoměrem. Plocha modelu je přibližně 1x2 m a výška včetně podstavce se pohybuje okolo 1,1 m. Tato práce slouží jako podklad pro výzkum znovuvyužití šedé vody na experimentální zelené střeše.

Klíčová slova:

Šedá voda, udržitelnost, umělý mokřad, závlaha, zelená střecha, půdní charakteristiky, čištění odpadních vod

Abstract

This thesis proposes the design of an experimental green roof where the grey-water irrigation and its impact on the soil characteristic of green roof substrates will be tested. The design was based on the research of literature about the issues of the wastewater treatment, green roofs also about the constructed wetlands. The design of a physical model was based on a mathematical model of water flow in the soil. For the building of a physical model was necessary to find the experimental green roof materials soil characteristics through several laboratory tests. The output of this thesis is the draft of an experimental green roof and recommended operational values of greywater flow. The model includes two stainless steel tanks suitable for outdoor application. The first smaller tank represents water treatment on a constructed wetland. Constructed wetland was designed as system of spillways and holes which provide steady distribution of the grey water to the other part. The second part represents an extensive green roof. The outflow is monitored by a flowmeter. The area of the model is approximately 1x2 m and the height is about 1,1 m. This thesis tends to be a basis for following experiments that will use the experimental set-up in research into greywater reuse.

Keywords:

Grey water, sustainability, constructed wetland, green roof, soil characteristics, wastewater treatment

Seznam veličin a zkratk

Symbol/ zkratka	Název	Jednotky
θ_E	efektivní objemová vlhkost	[-]
θ	aktuální vlhkost	[L ³ / L ³]
θ_S	nasycená vlhkost	[L ³ / L ³]
θ_r	reziduální vlhkost	[L ³ / L ³]
α	empirický koeficient rovnice van Genuchtena	[1/L]
n	empirický koeficient rovnice van Genuchtena	[-]
m	empirický koeficient rovnice van Genuchtena, $m=1-1/n$	[-]
K_s	nasycená hydraulická vodivost	[L/T]
$ h $	absolutní hodnota tlakové výšky	[L]
T	teplota	[°C]
t	čas	[T]
Q_i	průtok	[L ³ /T]
q	objemový tok	[L/T]
μ	přepadový součinitel	[-]
α	úhel trojúhelníkového přelivu	[°]
h_e	energetická přepadová výška paprsku	[L]
E	intenzita evaporace	[L/T]
h	hloubka vody	[L]
ŠV	šedá voda	
DP	diplovová práce	

Základní pojmy

Evaporace – fyzikální výpar (Hydrology, 2015)

Evapotranspirace – proces celkového výparu, který se skládá z evaporace a transpirace (Hydrology, 2015; Vinter, 2009)

Nutrient (neboli živina) – látka, kterou organismus potřebuje a přijímá (z vnějšího prostředí) pro svoji výživu a vývoj (Kožešník a kol., 1982)

Surfaktant (neboli tenzid) - je organická povrchově aktivní látka snižující povrchovou či mezifázovou energii (Masarykova Univerzita, 2014)

Šedá voda – komunální voda bez fekálií a moče, tedy voda z van, sprch, umyvadel, myček nádobí a praček (SOVAK, 2012)

Transpirace – výpar vody fyziologickými procesy z rostlin do ovzduší; dýchání rostlin (Hydrology, 2015; Vinter, 2009)

Umělý mokřad – systém průtočných žlábků či van, vhodného kameniva a rostlin, které v jsou v součinnosti schopny čistit odpadní vodu (Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010; Winward, 2008)

Zelená střecha – střecha částečně nebo úplně pokrytá vegetací (Minke, 2001)

Úvod

V současné době je vyvinuta snaha o všeobecnou udržitelnost zdrojů a znovuvyužití některých materiálů. Lze se setkat s například s využíváním odpadních vod v domácnostech k jiným než pitným účelům. Stále častěji se objevuje téma zelených střech jako vhodných kandidátů na alespoň částečné přiblížení urbanizovaného prostředí k přírodě. Někteří autoři navíc tato dvě témata propojují dohromady a zelené střechy uvádí jako prostředky pro upotřebení či znovuvyužití odpadních vod (Anwar, 2011; Chowdhury a Abaya, 2018; Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010)

Hlavním úkolem diplomové práce (dále jen DP) je návrh modelu, na němž bude tým specialistů testovat vliv závlahy šedou vodou na půdní charakteristiky substrátů zelených střech. Lze očekávat jiné vlastnosti u šedé vody než v případě závlahy pitnou, příp. jinak neznečištěnou vodou, a s nimi spojené změny hydraulických charakteristik testovaných substrátů. Cílem je zavlažit zelenou střechu ze známého zdroje šedé vody. Šedá voda spadá svou povahou mezi vody odpadní.

Rešerše je zaměřena problematiku závlahy šedou vodou, čištění odpadních vod umělými mokřady a šedou vodu obecně. Dále se částečně věnuje tématu rostlin vhodných k odbourávání nutrientů v odpadních vodách. Okrajově se tato kapitola dotýká i definice zelených střech. Na konci rešerše se nachází kapitola, která se okrajově zabývá hydraulickými charakteristikami.

Praktická část řeší návrh modelu experimentální plochy. Na začátku jsou stanoveny cíle, tedy návrh jednotlivých segmentů fyzikálního modelu zelené střechy. Pro každou část návrhu je nejdříve vysvětlena teorie potřebná a použité vzorce. Nejprve byly testovány vrstvy modelu. Dále byl navržen jednotlivé části experimentální vany, k čemuž se uplatnily hydraulické výpočty. Výstupem z této kapitoly je fyzikální model experimentální zelené střechy, který se opírá o model matematický. Z něho bylo možné odvodit hodnoty nezbytné pro další výpočty a především pro budoucí experimenty na fyzikálním modelu.

Přílohami DP jsou výkresy modelu. Jedná se o dílenskou dokumentaci pro svaření modelu. Dále jde o experimentální zelenou střechu včetně vrstev a o výkres celé sestavy fyzikálního modelu zahrnující podstavec, na kterém bude model umístěn. V přílohách se nachází i jiné než finální varianty modelu.

Diplomová práce je navíc doplněna o CD nosič se soubory dat, které byly buďto změřeny, vypočteny nebo odvozeny matematickými modely.

1. Rešerše

1.1 Vlastnosti šedé vody a její vliv na půdní charakteristiky

Šedá voda je komunální voda bez fekálií a moče, tedy voda z van, sprch, umyvadel, myček nádobí či praček (SOVAK, 2012). Šedá voda (dále jen ŠV) a její recyklace jsou stále častěji probíranými tématy. Ale i navzdory benefitům spojeným s její recyklací ve světě, neexistuje zatím žádný mezinárodní standard v kontrole jejich kvality pro recyklaci.

Literatura označuje hodnoty 90-120 l/os./den za typické množství vyprodukované ŠV, které závisí na životním stylu, životních standardech, struktuře populace a stupni hojnosti vody. V rozvojových zemích se hodnoty pohybují od 20 do 30 l/os./den (Oh, 2018; Li a kol, 2009). Povaha šedé vody záleží na jejím původci, jeho zvycích, věku atp. (Chowdhury a Abaya, 2018)

ŠV má přirozeně vliv na rostliny a půdní charakteristiky vzhledem k obsaženým nutrientům, rozpuštěným surfaktantům a dalším látkám produkovanými lidmi. Lze tedy očekávat například změny hydraulické vodivosti substrátu zelené střechy, pokles, resp. vzrůst pH, či změny povrchového napětí na rozhraní kapaliny a půdy.

Li a kol. (2009) zmiňují typické hodnoty ukazatelů kvality ŠV zřejmé z tabulky 1.1 pro koupelny, prádelny. Záměrně byly vyřazeny hodnoty pro ŠV z kuchyní vzhledem k možné přítomnosti oleje, který je pro účely závlahy nežádoucí.

Tabulka 1.1 – Hodnoty ukazatelů kvality ŠV

	Koupelna	Prádelna	Směs
pH [-]	6,4 – 8,1	7,1 - 10	6,3 – 8,1
TSS [mg/l]	7-505	68-465	25-183
Zákal [NTU]	44-375	50-444	29-375
CHSK [mg/l]	100-633	231-2950	100-700
BSK [mg/l]	50-300	48-472	47-466
CN [mg/l]	3,6 – 19,4	1,1 – 40,3	1,7 – 34,3
CP [mg/l]	0,11 – 48,8	0,171	0,11 – 22,8
Fekální kolifor. b. [CFU/100 ml]	0-3,4.10 ⁵	50-1,4.10 ³	0,1-1,5.10 ⁸

ŠV pochází z různorodých zdrojů a to má jednoznačný vliv na její složení, proto může obsahovat široké spektrum nutrientů, pevných částic, mikrobů a organických i anorganických polutantů. Koncentrace polutantů je přímo závislá na zdroji ŠV, jimiž mohou být prádelny, sprchy či umyvadla. Hodnocení úpravy ŠV je typicky založeno na fyzikálních, chemických a mikrobiologických charakteristikách. Používání mýdel, prostředků osobní hygieny, detergentů nebo barviv vede k vyšším koncentracím těžkých kovů, zbytkového chloru, celkového organického uhlíku (Pradhan a kol., 2019; Li a kol., 2009).

Anwar (2011) popisuje vliv šedé vody na půdní charakteristiky a vysvětluje je na jednoduchém pokusu. K experimentu byla vybrána šedá voda z praní konkrétního pracího prášku, u nějž bylo možné zjistit přesné složení z dostupné literatury. K posouzení využil jednoduchého experimentu v laboratoři na půdním sloupci výšky 1 m, který se skládal z 20 válečků naplněných písčitou půdou se zrny o efektivním průměru 0.52 mm. Experimenty byly prováděny s různou koncentrací šedé vody, a to 0.26 g/L, 0.316 g/L, 0.368 g/L and 0.442 g/L. Na výtoku bylo měřeno pH vody a výsledky ukázaly, že u nižších koncentrací ŠV pH rostlo nejvíce v čase okolo 140 minut od začátku experimentu na půdním sloupci. V případě nejvyšší koncentrace ŠV byl nárůst pH zaznamenán dříve a jednalo se celkově vyšší, a tedy zásaditější, hodnoty kyselosti. Půda byla též testována z hlediska půdní hydraulické vodivosti. Ta rostla plynule vymýváním jemných prachových částic půdy, a tedy i v důsledku redukce povrchového napětí na rozhraní proudící vody a půdy. Zvyšování hydraulické vodivosti též signalizuje, že půda vykazuje „vodoodpudivé“ vlastnosti zapříčiněné závlahou ŠV. Závlaha vykazovala vyšší hodnoty hydraulické vodivosti, které by mohly znamenat potenciálně jednodušší kontaminaci podzemních vod v případě použití ŠV. To se ovšem nejeví jako problém pro závlahu zelených střech vzhledem k tomu, že zde nebezpečí kontaminace podzemní vody odpadá. Dále experiment zahrnoval gravimetrické měření objemové hmotnosti a porozity. Testování odhalilo, že objemová hmotnost klesá s koncentrací ŠV. To je způsobeno vymýváním jemných částic, zvýšením hydraulické vodivosti a zmenšením velikosti půdních zrn, resp. agregátů. Tak se zmenšuje i celkové množství pevných částic půdy.

Anwar (2011) ve stejné studii zmiňuje, že fosfor a dusík v ŠV může působit jako hnojivo. Ovšem vyšší koncentrace pracích detergentů je naopak pro rostliny škodlivá. Může způsobovat například tzv. „fosforovou toxicitu“, která má nepříímý dopad na zdraví rostliny. Symptodem tohoto onemocnění je nedostatek železa, resp. zinku, v biomase. Pórovitost se zvyšovala s rostoucí koncentrací ŠV až do určitého bodu vyšší koncentrace, kdy naopak začala klesat. Autor to popisuje jako dopad vyplavení jemných částic, které je propojené s tvorbou „prázdných míst“, neboli pórů. Když ale povrchově aktivní látky, tedy tenzidy, obsažené v ŠV nejdříve nasatí rozdílné rozhraní (půda/kapalina, vzduch/kapalina) a dále formují micely (shluky molekul tenzidů), jež snižují množství prázdných míst (pórů), mohou se měnit podmínky ve vztahu půda-voda. S rostoucí koncentrací testované ŠV se redukoval kapilární tlak. K tomu docházelo vzhledem k přítomnosti surfaktantů (tenzidů) a též vzhledem k nízkému kontaktnímu úhlu lze usuzovat, že tyto látky zmenšují povrchové napětí kapalných fází. Je tomu tak proto, že monomery surfaktantů jsou shlukovány na jednotlivých rozhraních. Tento jev pak mění geometrii pórů v půdě. Kapilární tlak prudce klesal s rostoucí objemovou vlhkostí vzorku do hodnoty přibližně 2.5 %. Po dosažení této hodnoty setrval tlak téměř konstantní. Tento jev byl zřejmě způsoben tím, že monomery tenzidů začínají formovat micely až po plném nasycení celého rozhraní. Hodnota koncentrace surfaktantu je pro tuto fázi známá jako *kritická hodnota koncentrace micel (CMC)*.

V návaznosti na Anwarův (2011) článek lze konstatovat, že dlouhodobá závlaha ŠV může vést k vodoodpudivosti půdy a mít na ní tak negativní dopad, který se může v globálu projevit na životním prostředí. Vyšší vodoodpudivostí půdy může být kupříkladu snížena její retenční schopnost a půdě tak nemusí být dostatek vody pro rostliny

Huag (2007) se ve své práci zaměřuje na vliv surfaktantů, tedy chemikálií stabilizující roztoky oleje a vody redukcí povrchového napětí na rozhraní jejich molekul. Surfaktanty se nachází v běžně dostupných pracích prostředcích. Autor poukazuje na dva druhy adsorpce, a to aniontovou a neiontovou. Neiontové surfaktanty mají obecně vyšší sorpční kapacitu, než je tomu v případě aniontových. Výzkum pro-

kázal, že hlavní vliv na adsorpci aniontových surfaktantů v půdě má především organický materiál a podíl jílovitých částic. U neiontových surfaktantů hraje při jejich adsorpci největší roli organický materiál.

Huang (2007) ve svých experimentech s aniontovými surfaktanty došel k závěru, že při zvýšení obsahu jílu dochází k vyššímu vyplavování surfaktantu z půdy. Lze tedy konstatovat, že jílovité částice mají negativní vliv na adsorpci surfaktantů v půdě a následného vyluhování. Zároveň ale rostl i podíl organického materiálu s množstvím jílu. Tento jev závisí na dvou mechanismech. Prvním z nich je existence vazeb na povrchu mezi jednotlivými jílovými částicemi. Druhým ovlivňujícím mechanismem je existence vyššího potenciálu tvorby agregátů. Půdní makroagregáty chrání organickou hmotu před další mineralizací způsobenou mikrobiální složkou.

Výzkumy ukázaly, že adsorpce neiontových surfaktantů v půdě obsahující organický materiál byla vyšší než v případě těch aniontových. Možné vysvětlení relativně vysokého vyluhovací potenciálu u aniontových surfaktantů v jílu je odpor záporně nabitých částic. Neiontové surfaktanty se tedy snadněji sorbují na půdní povrch než aniontové (Huang, 2007).

1.2 Zelené střechy

Zelené střechy v současné době nabízí řešení, jak částečně vrátit zastavěné ploše její funkci zadržovat vodu v území a zároveň plnit klimatizační funkci. Existují dva základní druhy zelených střech – extenzivní a intenzivní. První vyjmenovaná s relativně tenkou vrstvou substrátu osázená místně přizpůsobenou vegetační formou. Vrstva půdy se pohybuje od 6 do 15, resp. 20 cm. Intenzivní střecha s vyšší vrstvou substrátu poskytuje půdu pro růst keřů, menších stromů i trávy. Vrstva půdního média zde dosahuje hodnot od 15 do 200 cm (Šimečková a Večeřová, 2010). Někdy se lze na těchto střechách setkat i s pěstováním menších plodin.

Jiné zdroje uvádí ještě třetí druh zelené střechy, který označují jako „jednoduchou intenzivní“. Vzhledem k výšce substrátu lze zařadit právě mezi zelené střechy extenzivní a intenzivní. Další variantou zelené střechy je tzv. biodiverzní střecha, která má za úkol přímo poskytnout srovnatelné životní prostředí pro faunu a floru,

kterým byl jejich původní habitat vytlačen výstavbou. U těchto struktur lze očekávat tloušťku vrstvy půdního média v závislosti na vybraných rostlinách (Catalano, 2018).

Kromě zmiňovaných střech je možné se setkat též s pojmem zelená fasáda, která funguje na stejném principu, byť s nižší efektivitou úpravy vody, než v případě zelené střechy. Prodanovic a kol. (2018) ve svém článku poukazují na výhodu zelených stěn oproti zeleným střechám či mokřadům vzhledem k menší ploše, kterou jejich konstrukce zabírá.

1.3 Závlaha zelených střech šedou vodou

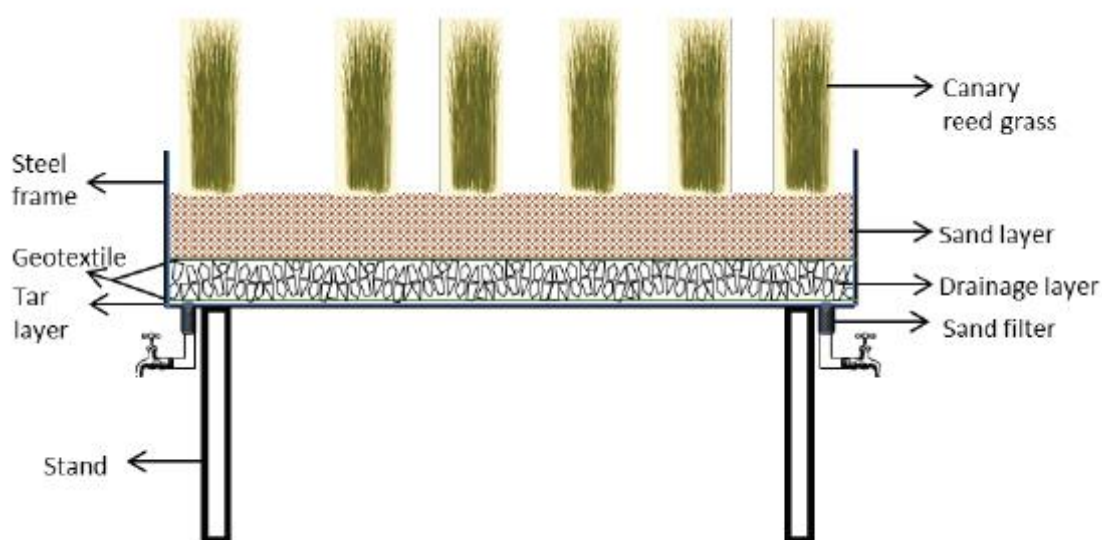
Čištění odpadních vod lze s ohledem na umístění rozdělit na dvě hlavní odvětví. Pokud voda z umyvadel, sprch či záchodů odtéká do kanalizačního systému a dále na čistírnu odpadních vod, mluvíme o centralizovaném systému. Je-li odpadní voda zachycována v blízkosti jejího zdroje např. do septiku, nebo je přímo čištěna některou z forem domovní čistírny, označujeme tuto soustavu jako decentralizovanou (Pollert, 2018). Vzhledem k udržitelnosti a nižším nákladům ale ještě více vítané oproti čištění či předčištění odpadní vody její znovuvyužití. Tedy možnost odpadní vodu uplatnit např. k závlaze nebo ke splachování. Jednou z možností odbourání nežádoucích látek z čištěné, resp. závlahové vody, je biologická cesta, kde mají významnou roli rostliny. Ty totiž některé prvky v šedé vodě procesem kapilárního zdvihu přijímají jako živiny. Vegetace rostoucí na zelených střechách může tak hrát hlavní roli v odbourání nutrientů, a tedy v biologickém čištění odpadní vody.

Závlaha zelených střech šedými vodami představuje na našem území poměrně nový způsob nakládání s odpadní vodou. Nicméně v poslední době všeobecného zájmu o udržitelnost zdrojů a zvyšování enviromentálních kvality je to podstatný bod, který nabízí možnost čistit, resp. využívat odpadní vodu přímo u zdroje (Anwar, 2011; Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010).

Před samotnou závlahou zelené střechy je vhodné zařadit do procesu alespoň hrubé předčištění odpadní vody, aby došlo například k primární sedimentaci či fil-

traci rozptýlených částic, které by mohly mít vliv např. na funkci čerpadel pro distribuci ŠV. K usazování částic může též dojít při skladování ŠV. Oh (2018) doporučuje ŠV skladovat vodu nejdéle 48 h. Následně totiž dochází k exponenciálnímu nárůstu množství bakterií a spotřebování kyslíku vede k tomu, že voda mění svou barvu a zapáchá.

Odstraňování organických i anorganických polutantů rostlinami a substrátem zahrnuje škálu procesů, jimiž mohou být sedimentace, adsorpce, filtrace a srážení. Na odbourávání patogenů se také podílí jak rostliny, tak samotná půda, ve které makrofyta, resp. vyšší rostliny, koření. Pro odbourávání látek je tedy klíčový průtok na jednotku plochy. Skrze půdu probíhá transport atmosférického kyslíku, který napomáhá při některých výše zmíněných procesech (Pradhan a kol., 2019).



Obrázek 1.1 – model zelené střechy
(Zdroj: Chowdhury a Abaya, 2018)

Chowdhury a Abaya (2018) se zabývali využitím ŠV na závlahu zelených střech. K jejich experimentální studii použili čtyři modely zelených střech – dvě extenzivní a dvě intenzivní. Kromě výšky půdního profilu byly modely střech totožné. Dno vany modelu bylo pokryto hydroizolačním asfaltovým pásem tak, aby mohla závlahová voda odtékat do dvou výpustí s kohoutky opatřených pískovými filtry. Nejspodnější vrstvou byla dvojitá vrstva 2 mm geotextilie. Tu pokrývala zhruba 20 mm vrstva drenážní vrstvy šterku (zrna velikosti 2 a 5 mm). Tuto drenážní vrstvu pokrývala další vrstva geotextilie, na níž ležela 30-60 centimetrová vrstva písku. Dále model byly vysazeny trávy z čeledi lipnicovitých, které běžně rostou na vlhkých místech.

Rostlina má silný a poměrně hluboký kořenový systém. Na obrázku 1.1 je zobrazeno schéma modelu. Zdrojem ŠV byla prací voda. Modely byly zavlažovány denně (11 dní nepřetržitě) stejným množstvím surové šedé vody (6-7 litrů), přičemž koncový kohoutek byl po dobu závlahy otevřený, aby mohli být vzorky jímány bezprostředně po výtoku z modelu. Autoři experimentu sledovali pH, elektrickou vodivost, kal, celkové rozpuštěné pevné látky, oxidačně redukční potenciál, salinitu, ionty vápníku, sodíku a draslíku, dusičnany, chemickou spotřebu kyslíku a celkové koliformní bakterie. pH se pohybovalo v rozmezí 7.24 – 8.95 a nebyly zaznamenány významné rozdíly na výtoku u všech modelů, které spadají do rozmezí pH 6-8, které podle literatury vhodné pro neomezenou závlahu za použití recyklované vody. V první vlně experimentu hodnota pH vzrůstala od prvního do šestého dne, dokud celý modelový systém nebyl zasažen srážkou a písečnou bouří. Modely byly následně propláchnuty čistou vodou pro správnou funkci drenážního systému. Do té doby převyšovaly hodnoty pH měřené na výtoku hodnoty pH na vtoku. Tato situace se od proplachu obrátila a pH na vtoku bylo až do jedenáctého dne vyšší. Poté se kyselost, resp. zásaditost, vody vrátila do původního stavu $pH_{vtok} < pH_{výtok}$. Autoři tento fakt berou v potaz jako důkaz, že klimatické podmínky velmi ovlivňují systémy zelených střech. Hodnoty elektrické vodivosti extenzivní střechy byly vyšší v přibližně 20 %, což indikuje, že intenzivní systém zelených střech funguje v tomto případě lépe. Na začátku byla efektivita čištění intenzivního systému cca 70 %. Následkem promytí čistou vodou klesla hodnota efektivity čištění na nulu a pozitivní nárůst křivky efektivity přišel až ke konci experimentu (den 11). Nicméně, v článku je poukázáno na to, že hodnoty elektrické vodivosti pro oba systémy jsou hluboko pod přípustnou mezí pro užitkové vody. Salinita byla o přibližně 33 % vyšší u extenzivních střech než u systému intenzivních. Pro oba systémy byly i přes absenci konkrétních kritických hodnot, a tedy pouze na základě doporučující příručky, hodnoty salinity nezávadné pro vodní ekosystémy. Efektivita redukce celkových rozpuštěných látek byla přirozeně vyšší u modelu střechy intenzivní. Příčinou je samozřejmě vyšší půdní profil, který právě díky své výšce má vyšší procento úspěšnosti při zachycování rozpuštěných látek. Následkem zmiňovaného promytí významně klesla efektivita zachycení látek. V některých případech bylo množství rozpuštěných látek na výtoku dokonce vyšší než na vtoku. Důvodem bylo uvolnění dříve zachycených částic během vyplavování,

kteřé poté byly odnášeny odtékající vodou. Koncentrace celkových rozpuštěných látek byla veskrze pod maximálním mírou 1.5-2.0 g/L dle směrnice platné pro Austrálii.

Akumulace iontů vápníku byla pro intenzivní střechy v přibližně 19 % vyšší než u extenzivních střech, u iontů sodíku to bylo obdobné. Výzkumy prokázaly, že na začátku byla efektivita odstranění sodných iontů mnohem vyšší než na konci, kdy se číslo efektivita dostávala do záporných hodnot (na odtoku bylo množství sodných iontů vyšší než na vtoku). Počáteční redukce Na^+ byla způsobena patrně adsorpcí na půdní částice a nárůst množství sodíku na výtoku po výtopě s největší pravděpodobností způsoben právě uvolněním adsorbovaných iontů. Koncentrace Na^+ na vtoku překračovala australskou směrnici pro závlahovou vodu o 200 mg/l. Podobně jako u iontů Ca^+ i ionty K^+ byly lépe odstraňovány u extenzivních střech. Chemická spotřeba kyslíku (CHSK) byla lépe redukována u intenzivních střech. Efektivita redukce CHSK se pohybovala okolo 90 %. Pro extenzivní variantu to bylo zhruba 79 %, což ovšem nevyhovuje doporučeným hodnotám pro závlahu. CHSK bylo na výtoku překročeno o zhruba 150-200 mg/l. Ani u jednoho systému zelené střechy nebylo dosaženo dobrých výsledků v otázce redukce celkového množství koliformních bakterií. Neefektivnost zelených střech v redukování těchto mikroorganismů je způsobena zdržením ŠV v systému a též kvůli mělkému půdnímu profilu. Menší hloubka vede k menšímu celkovému povrchu částic a tedy k nižším adsorpčním schopnostem. Kvalita vody je vylepšena především filtračním procesem, adsorpcí na půdní médium, biologickými procesy odbourávání látek rostlinami a také skrze mikrobiální přeměnu. Vzhledem ke krátké době zdržení vody v systému nebyly některé z měřených hodnot v mezích směrnic poplatných pro Austrálii, kde experiment probíhal. Autoři předpokládají, že by se lepších hodnot na výtoku dosáhlo navýšením doby zdržení ŠV v modelu. Desinfikování vody je tedy podle nich nutné (Chowdhury a Abaya, 2018).

Ouldboukhité a kol. (2014) poukazují na spojitost závlahy ŠV a změnou evapotranspiračního procesu u rostlin a tepelným odporem zelené střechy. Výzkum prokazuje, že přítomnost zelené střechy může snižovat příchozí tok tepla. U vlhké střechy je proces snížení tepelného toku prokazatelně efektivnější. Dalším a vcelku

očekávaným faktem byl vyšší efekt chlazení u střech s vegetací než u zelených střech vyplněných pouze substrátem. Výsledky ukázaly, že tepelný odpor testovaných zelených střech bez rostlin byl okolo $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$. V případě osazení rostlinami se hodnota odporu pohybovala okolo $0,92 \text{ m}^2\text{K/W}$ a pro barvínek větší (*Vinca Major*) a v případě osazením jílkem vytrvalým (*Lolium Perenne*) dokonce $1,27 \text{ m}^2\text{K/W}$. Autor zmiňuje, že na počátku závlahy ŠV nebyly zasazené rostliny opticky nijak ovlivněny. Ovšem dlouhodobý vliv se u *Vinca Major* projevil na listech, které se po pěti měsících začaly vlnit a zhnědly jim okraje. U druhé testované rostliny nebyly zaznamenány žádné vizuální změny. Závěr testování nasvědčuje tomu, že závlaha ŠV významně redukuje tepelný odpor, a to přibližně o 30 %.

1.4 Substrát zelených střech a vegetace

Bližším studiem substrátů zelených střech se zabývali Prodanovic a kol. (2018). Testovali 6 různě namíchaných směsí, které se skládaly z perlitu a kokosových vláken v různých poměrech (4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3). Substrát byl testován laboratorně, ne tedy na modelu zelené střechy. K experimentu byla využita syntetická ŠV včetně polutantu (*E. coli*). Prodanovic a kol. (2018) provedli test závislosti nasycené hydraulické vodivosti na pórovém objemu. V otázce hydraulických vlastností směsí vyšlo najevo, že je lze dělit na dvě skupiny. První skupina hydraulicky „pomalých“ směsí zahrnovala kombinace perlitu a kokosových vláken v poměrech 1:3 až 2:1. Nasycená hydraulická vodivost těchto směsí se pohybovala okolo hodnot 2500 mm/h . V případě směsí s poměry 4:1 a 3:1, dosahovala vodivost hodnot až 7000 mm/h .

Pradhan (2019) provedl experiment s dvěma druhy půdních substrátů bez zasazených rostlin, přičemž hlavním rozdílem mezi oběma médii byla nasycená hydraulická vodivost. Autor zmiňuje, že půdní média s malou nasycenou hydraulickou vodivostí dosahují sice lepších výsledků v rámci odbourávání látek, dochází ovšem k ucpávání vzhledem k malým velikostem pórů a proto nejsou tyto substráty příliš vhodné pro závlahu šedými vodami. Substráty s vyšší filtrační rychlostí sice nepřispívají k odbourávání látek v takové míře, jako při nižších filtračních rychlostech, ale problémy s ucpáváním jsou zanedbatelné. Bylo zjištěno, že perlit je vhodným kandidátem ze skupiny „rychle filtrujících“ médií a na druhé straně kokosové vlákno ze

skupiny pomalých. Z této studie tedy vyplývá, že pro recyklaci ŠV zelenými střechami je vhodné kombinovat výše uvedené materiály. Proces nakládání s ŠV závisí nejen na substrátu, ale i na zasazených rostlinách. Na odstranění BSK₅, CHSK, dusíku a fosforu v umělých mokřadech se z 90 % podílí kořeny rostlin, které se dají připodobnit k systémům zelených střech. ŠV je mnohdy zpracována procesem fyto-remediace v mokřadu. K těmto účelům jsou vhodné například tyto rostliny – netík (*Adiantum raddianum*), difenbachie (*Chrysanthemum morifolium dieffenbachia spp.*), dracena (*Dracaena godseffiana*), šplhavník (*Epipremnum aureum*), břečťan popínavý (*Hedera helix*), ledviník (*Nephrolepis exaltata*), rododendron (*Rhododendron obtusum*), sansevieria (*Sansevieria trifasciata*), lopatkovec (*Spathiphyllum maunahoa*) a vrísea (*Vriesea splendens*). Autor též vymezuje konkrétní rostliny, které jsou vhodné pro odbourávání určitých prvků či látek, jak lze vidět na obrázku 1.2.

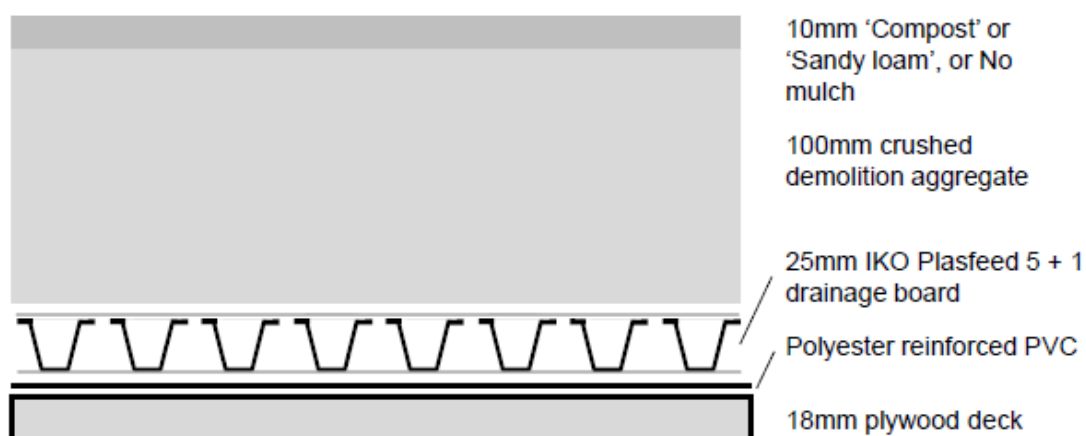
Types of plant	Removal of pollutants
• <i>Ipomea alpina</i> and <i>Arabidopsis thaliana</i>	Cu
• <i>Thlaspi caerulescens</i> , <i>Corydalis pterygopetala</i> , <i>Sedum alfredii</i> , <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Arabidopsis halleri</i>	Zn
• <i>Corydalis pterygopetala</i> , <i>Sedum alfredii</i> and <i>Viola calaminaria</i>	Pb
• <i>Thlaspi caerulescens</i> , <i>Brassica oleracea</i> , <i>Corydalis pterygopetala</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Helianthus anus</i> and <i>Viola calaminaria</i>	Cd
• <i>Helianthus anus</i> , <i>Thlaspi goesingens</i> , <i>Alyssum bertolonii</i> and <i>Stackhousia tryonii</i>	Co
• <i>Sebertia acuminata</i> , <i>Sebertia acuminata</i> and <i>Helianthus anus</i>	Ni and Cr
• <i>Astragalus racemosus</i> , <i>Genus astragalus</i> , and <i>Astragalus bisulcatus</i>	Se
• <i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Hemidesmus indicus</i> and <i>Sedum alfredii</i>	Mn
• <i>Pteris vittata</i>	As
• <i>Phragmites australis</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> , <i>Typha augustifolia</i> , <i>Lemna</i> , <i>Elodea canadensis</i> , <i>Nuphar lutea</i> , <i>Carex sp.</i> , <i>Acorus sp.</i> , <i>Sparganium sp.</i> and <i>Juncus sp.</i>	SS, BOD, phosphates, nitrates, Ammonia, organo-phosphates and heavy metals

Obrázek 1.2 – rostliny vhodné pro odbourávání určitých látek
(Zdroj: Pradhan, 2019)

Pradhan (2019) zmiňuje, že za možné obtíže spojené se závlahou ŠV lze pokládat alergie a infekce pocházející z vyšší produkce polutantů a houbovými, resp. plísňovými, sporami. Je tedy nutné zaměřit se především na volbu rostlin na zelenou střechu, jelikož jsou především ony rozhodujícím faktorem v efektivitě recyklace šedé vody. Rostliny je vhodné přizpůsobit charakteru ŠV například dle tabulky 1.2. Dále autor poukazuje na obdobnou důležitost při volbě substrátu. Je žádoucí vybrat takové médium, které se přímo podílí na odbourávání polutantů. Článek zmiňuje

například perlit, písek či jiná pórovitá směs, které jsou podle Prahdana (2019) vhodné k odbourávání polutantů a houbových spor.

Bates (2015) se zaměřuje na extenzivní zelené střechy, resp. hnědé střechy, které byly navrženy k revitalizaci brownfieldů (postindustriálních ploch). Volba vegetace hnědých střech se přímo odvíjí od hloubky, porozity a organického podílu substrátu. Dobře navržené hnědé střechy sdílejí mnoho vlastností substrátu původního habitatu, tedy brownfieldu, a proto je toto médium často vyrobené z recyklovaných materiálů demolovaných staveb a průmyslového odpadu. Struktura takového materiálu bývá často úlomkovitá, což může limitovat vodní kapacitu. To má vliv v suchých obdobích, kdy není dostatek vody pro rostliny, které mohou následně umírat. Experiment probíhal na tzv. mesokosmech, resp. modelech, které reprezentovaly reálné extenzivní střechy. Na obrázku 1.3 lze vidět skladbu modelu. Substrátem byl recyklovaný materiál pocházející z demoličních prací. Byl zbavený skla, barev či jiných dalších kontaminantů. Průměrné pH recyklátu bylo mírně alkalické, resp. se pohybovalo okolo hodnoty 8,2. Svrchní vrstva se variantně lišila pro jednotlivé modely a skládala ze tří možných materiálů. Buďto se jednalo v kompost, mulč nebo v písčitou hlínu. Přičemž kompost se skládal z písčité hlíny a zahradního kompostu.



Obrázek 1.3 – skladba modelu extenzivní střechy
(Zdroj: Bates, 2015)

Jako zásadní poznatek se jeví množství přidané organické složky do substrátu. V případě recyklovaného stavebního materiálu použitého pro tyto účely by mělo být

dle autorů velmi malé. Důležité je ovšem zachovávat druhovou rozmanitost zasazených rostlin, které nepodléhají náhlým suchým obdobím (Bates, 2015; Pradhan, 2019).

ŠV představují možný udržitelný zdroj závlahové vody a očekává se, že se tedy zelené střechy mohou přímo podílet na nakládání s odpadními vodami.

1.5 Umělé mokřadní systémy

Některé zdroje uvádí jako vhodný způsob čištění šedých vod využití umělých mokřadních systémů (Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010; Winward, 2008). V článcích jsou mokřady připodobňovány ke kořenovým čistírnám. Jiné jsou vykresleny jako soustava průtočných žlábků s různorodou flórou.

V umělých mokřadních systémech dochází k čištění odpadní vody na základě adsorpce některých látek na půdní substrát a navíc zde hrají roli rostliny, resp. jejich poptávka po nutrientech, které jsou různými procesy právě díky rostlinám z čištěné vody odbourávány (Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010; Winward, 2008).

Kivaisi (2000) popisuje mokřad jako přechodnou zónu mezi pevninou a vodní plochou. Od běžného půdního prostředí se liší vlhkými půdami, rostlinami, které jsou přizpůsobené těmto půdám, a hladinou vody v půdním sloupci, která zajišťuje tyto podmínky. Mokřady jsou charakteristické pro jejich vysokou akumulaci organického materiálu skrze vysoký stupeň primární produkce, resp. skrze velký přírůstek nové biomasy, a omezené rychlosti rozkladu vzhledem k anaerobní podmínkám. Nutrienty podporují růst vegetace, přičemž se chemické látky mění na organický materiál.

Umělé mokřadní systémy byly navrženy tak, aby napodobovaly funkci těch přírodních a využívaly tak mokřadní rostliny, půdu a s nimi asociované mikroorganismy k odstranění kontaminantů z odpadní vody. Mokřadní systémy se nabízejí jako levná varianta pro primární úpravu ŠV.

Aktivní reakční zónou umělých mokřadních systémů je kořenová zóna, tzv. rhizosféra. V těchto místech dochází k fyzikálně-chemickým a biologickým procesům vyvolaným vzájemným působením půdy, rostlin, mikroorganismů a polutantů. Primárním mechanismem odstraňování nutrientů z odpadní vody u umělých mokřadů jsou mikrobiologické procesy jako nitrifikace a denitrifikace stejně jako fyzikálně-chemické procesy jako fixace fosforu železem a hliníkem v půdě. Mimoto jsou rostliny schopny tolerovat vysoké koncentrace nutrientů a těžkých kovů. V některých případech dokonce akumulují určité množství do jejich tkání (Stottmeister a kol., 2003).

Vymazal (2010) naznačuje, že podélně protékané umělé mokřadní systémy jsou efektivní v odstraňování organické složky z vody skrze mikrobiální degradaci a usazování koloidních částic. Dusík je odstraněn především nitrifikací ve vodním sloupci a následnou denitrifikací v dnové vrstvě. Zachycení fosforu je obvykle nižší vzhledem k omezenému kontaktu vody s půdními částicemi, která adsorbují a srážejí, resp. usazují fosfor. Příjem rostlinami představuje pouze dočasnou zásobárnu, protože nutrienty jsou uvolněny zpět do vody s jejich rozpadem.

Autor zmiňuje, že nejdůležitějšími funkcemi rostlin v mokřadech je zajištění, resp. vyztužení, substrátu (kořeny a oddenky) pro růst zachycených bakterií, spotřeba kyslíku, zachycování nutrientů a také izolace dna v chladných obdobích (Vymazal 2002, 2005, 2010).

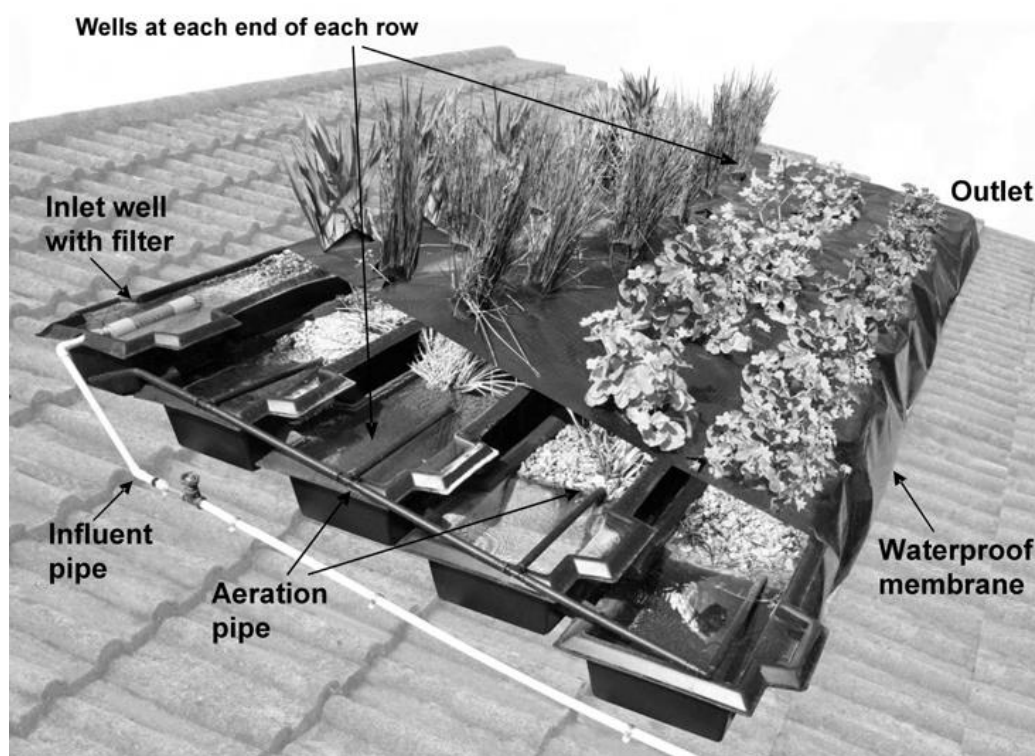
Kolektiv autorů popsal výsledky testování vytvořeného mokřadního systému na střechách a vlivu ŠV na biomasu v něm. Přesněji se jednalo v porovnání horizontálně protékaného umělého mokřadního prostředí s tzv. systémem GROW, který zahrnuje druhově rozmanité zastoupení rostlin v závislosti na estetičnosti a jejich vlivu při nakládání s ŠV. K experimentům byla použita ŠV z 18 studentských bytů. Jednalo se tedy produkt sprchování a koupání (Avery a kol., 2007). Na obrázku 1.4 je zobrazen systém GROW ve variantě umístění na střeše. Lze vidět nátok v horní části a soustavu pěti kaskádovitě průtočných korýtek, do kterých jsou zasazeny rostliny. Celý systém je zakrytý fólií, aby se procesu čištění ŠV neúčastnila dešťová voda. Autoři experimentem sledovali BSK₅ (biologickou spotřebu kyslíku pětidenní, angl.

BOD₅), CHSK (chemickou spotřebu kyslíku, angl. COD), rozptýlené látky (angl. SS), kal, teplotu vody, pH, rozpuštěný kyslík a organismy (koliformní bakterie *E.coli* a fekalní bakterie).

Článek poukazuje na to, že „čerstvá“ ŠV z mytí vykazovala vyšší hodnoty znečištění, než v případě nátoku na experimentální mokřady. To nasvědčuje tomu, že došlo k degradaci znečištění ve vodě přímo v potrubí. Autoři zmiňují, že po uplynutí doby 4 hodiny došlo k redukci BSK₅ na polovinu. Jímání vody do nádrží před dalším nakládáním tedy vedlo ke zlepšení kvality vody, způsobenému usazováním rozptýlených částic, též aerobním růstem mikrobiálních organismů a anaerobním zbavováním se rozpuštěného CHSK. Ukazatel CHSK ŠV ze studentských bytů byl tedy nižší v porovnání s hodnotami dostupnými z literatury, resp. s hodnotami z Anglických směrnic o odpadních vodách. Malý organický podíl byl způsoben zčásti naředěním ŠV vodou pitnou. Autoři též zaznamenali významný rozdíl v BSK na nátoku a výtoku z mokřadů. I v případě fekálních bakterií a *E.coli* došlo k významným změnám při průtoku ŠV mokřadní soustavou. Například fekální bakterie byly z 99 % redukovány po průchodu umělým mokřadem (Avery a kol., 2007).

Další studie testuje tři různé umělé mokřadní systémy (VFRB – vertikálně protékaný mokřadní systém, HFRB – horizontálně protékaný mokřadní systém, GROW – systém zelené střechy recyklující vodu), membránový bioreaktor a membránový chemický reaktor. Ze třech uvedených mokřadních systémů je vhodné zmínit především systém GROW, který je oproti ostatním vybaven aeračním zařízením. To sestává ze perforovaného potrubí na dně korýtek systému GROW a navíc je mokřad dotován vzduchem též přepadající vodou na konci korýtek. Mokřadní systémy byly zásobovány 460 l/d. Všechny tři mokřadní systémy snížili BSK v 86 % a více, tedy s koncentrací okolo 3 mg/l na výtoku. CHSK bylo redukováno na hodnoty okolo 20 mg/l pro VFRB a GROW, resp. okolo 30 mg/l pro HFRB. VFRB a GROW opět vykazovaly lepší hodnoty pro odstranění rozptýlených pevných částic (tj. okolo 90 %) u systému HFRB to bylo okolo 69 %. Systém GROW vykazoval navíc nejnižší hodnoty pro zákal (Avery a kol, 2007; Winward a kol., 2007).

Systém GROW tedy představuje vhodného kandidáta na čištění ŠV zelenými střechami, resp. závlahy zelených střech ŠV vzhledem k jeho konstrukci a výsledkům patrným ze studií autorů Winwarda a Avery (2008 a 2007). ElZein (2016) navíc doporučuje před biologickým procesem čištění kořenovou čistírnou, resp. umělým mokřadem, nechat odpadní vodu odstát v sedimentační nádrži. Dojde tak k primární sedimentaci rozptýlených částic a v surové šedé vodě navíc dojde k mikrobiálním procesům, které dopomáhají k rozkladu nežádoucích látek v ní.



Obrázek 1.4 – systém GROW
(Zdroj: Avery a kol., 2007)

1.6 Hydraulické charakteristiky

Bougoul a kol. (2005) ve svém článku měří hydraulickou vodivost komerčních produktů – minerálních vat určených pro pěstování. Navíc zmiňuje více než 200 různých vzorků minerálních vat s různorodou hustotou od 40 do 100 kg/m³. Hodnoty zkoumaných vzorků vat *Floriculture* a *Expert* se pohybují od 46 do 68 kg/m³. Autoři se zaměřovali na právě zmíněné komerční produkty s cílem zjistit jejich hydraulické parametry. U těchto výrobků změřili $K_s = 2,25 \cdot 10^{-3}$ m/s pro *Floriculture* a pro *Expert* $K_s = 6,50 \cdot 10^{-3}$ m/s. Kromě konkrétních hodnot nabízí autoři článku vzorce, resp. funkce křivek nasycených vodivostí, kde nezávislou proměnnou zastupuje hustota.

1.7 Hydraulické charakteristiky pórovitých materiálů

1.7.1 Retenční čára

Retenční čára je grafické znázornění rovnovážných vztahů mezi vlhkostí půdy a matriční potenciálem. Na jejím průběhu se přímo podílí zrnitostní a mineralogické složení, obsah humusu či zhutnění půdy. Na svislé ose se obvykle nachází tlaková výška, na ose vodorovné je to potom vlhkost půdy. Lze se také setkat s pojmem *hysterese*, neboli rozdílný průběh retenční čáry při odvodňování a zvlhčování půdy. Jedním z hlavních faktorů je kupříkladu uzavřený vzduch v pórech při zvlhčení (Kutílek a kol., 1993, 2000).

Existují dva hlavní přístupy k analytickému vyjádření funkce retenční čáry půdní vlhkosti. Tyto křivky jsou empiricky popisovány buďto vztahem podle Brokse-Coreyho či podle van Genuchtena. Těmito rovnicemi lze částečně vystihnout závislost půdní vlhkosti na tlakové výšce $\theta(h)$ (Kutílek a kol., 1993, 2000; Kozák a kol., 2008). K určení funkce se obvykle používá efektivní vlhkost (1.1).

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1.1)$$

Kde jsou jednotlivé koeficienty různými vlhkostrními stavy půdy a jsou definovány takto:

θ_E [-] je efektivní objemová vlhkost,

θ [cm³/cm³] je aktuální vlhkost,

θ_s [cm³/cm³] je nasycená vlhkost,

a θ_r [cm³/cm³] je reziduální vlhkost.

Podle van Genuchtena je efektivní objemová vlhkost definována následující rovnicí (1.2) (van Genuchten, 1980).

$$\theta_E = \frac{1}{(1 + (\alpha|h|^n))^m} \quad (1.2)$$

Zde jsou α , n a m empirické koeficienty, n se pohybuje v přibližném rozmezí od 1,5 do 6; m lze spočítat ze vztahu $m=1-1/n$. α koeficient lze nacházet v rozmezí od 10^{-3} do 10^{-2} . $|h|$ je absolutní hodnota tlakové výšky v délkových jednotkách (Kutílek a kol., 1993, 2000; van Genuchten, 1980).

Volba rovnice retenční čáry může značně ovlivnit matematické modelování. Rozdíl je patrný i v případě porovnání postupů Brooks-Coreyho a van Genuchtena. Tyto malé změny se týkají především oblasti se funkce vlhkosti $\theta(h)$ blíží nasycenému stavu, tedy nasycené vlhkosti θ_s . Z tohoto důvodu navíc ke standardní rovnici (1.3) zavádí Vogel a kol. (2000) modifikovanou formu van Genuchtenovy rovnice (1.4).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, & h < 0, \\ \theta_s, & h \geq 0. \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_m - \theta_r}{[1 + (-\alpha h)^n]^m}, & h < h_s, \\ \theta_s, & h \geq h_s, \end{cases} \quad (1.4)$$

V rovnici (1.4) se objevuje navíc člen θ_m , který lze stanovit následujícím vztahem (1.5). Lze ho však zjednodušit vztahem, kdy $\theta_m \approx \theta_s + 0,0001$ (Vogel a kol., 2000).

$$\theta_m = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (2\alpha)^n]^m \quad (1.5)$$

1.7.2 Nasycená hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost K vyjadřuje schopnost prostředí vést vodu. Je závislá na vlastnostech půdního, resp. porézního, prostředí, jako je zrnitost, tvar zrn a pórů nebo a též na vlastnostech kapalného média, především na jeho viskozitě a hustotě. Nasycená hydraulická vodivost K_s pak vyjadřuje schopnost vést vodu v plně nasyceném porézním prostředí (Kutílek a kol., 1993, 2000; Kozák a kol., 2008).

2. Cíle práce

V člancích jsou nabídnuty možnosti čistit ŠV pouze umělým mokřadem, případně s ní přímo zavlažovat s předřazeným filtrováním nebo bez dalších úprav. Nicméně z rešerše vyplývá, že žádný z autorů nenabízí možnost kombinace čištění ŠV zelenou střechou a umělým mokřadem zároveň. Vzhledem k tomu je vhodné se tímto způsobem nakládání s ŠV zabývat. Proto má tato práce za cíl navrhnout fyzikální model zelené střechy, na němž bude probíhat testování souvrství pro zelené střechy zavlažovaných ŠV. V rámci návrhu bude stanoveno přibližné množství ŠV, které bude na model, resp. zelenou střechu natékat. K tomu by měl dopomoci matematický model vytvořený ve veřejně dostupném softwaru pro simulace proměnlivě nasyceného proudění v půdě *Hydrus 1D* (Šimůnek a kol., 2008).

Dalším cílem je najít vhodnou variantu předčištění ŠV, než se bude distribuovat na experimentální střechu, která ji zbaví v ní rozptýlených pevných částic. Jiným podstatným bodem této práce je uvážení rovnoměrné distribuce závlahové vody. Je tedy vhodné navrhnout buďto systém závlahových trubek či přelivnou hranu, přes níž bude ŠV natékat na model zelené střechy. U přelivné hrany je nutné zohlednit výšku přepadajícího paprsku. Zde se uplatní základní hydraulické výpočty.

Dále musí práce doporučit provozní hodnoty průtoků a dalších parametrů spojených s užíváním experimentální plochy, mezi které patří například doba závlahy nebo doba napouštění modelu.

Dalším záměrem DP je nalezení hydraulických charakteristik substrátu a minerální vaty, které je nezbytné znát pro výpočty a tvorbu matematického modelu půdního profilu.

3. Praktická část

3.1 Hydraulická vodivost

3.1.1 Materiály

Laboratorně testovanými materiály v této práci byly minerální vata a substrát *ACRE*, který je vhodný pro použití na zelených střechách (ACRE, 2014). Obě média byla podrobena laboratornímu stanovení jejich půdních charakteristik. Vatu i substrát poskytla Fakulta stavební ČVUT v Praze.

3.1.2 Metody

Pro matematické modelování byly zjištěny charakteristiky půdního substrátu *ACRE* a minerální vaty. Stanovení proběhlo laboratorně prostřednictvím přístroje *KSAT* společnosti *METER* měřícího nasycenou hydraulickou vodivost K_s (METER Group, 2017a). Postup je popsán jak graficky, tak i textově na následujících řádcích.

Oba materiály byly nejdříve vloženy do kovových válečků a spolu s těmito válečky umístěny na pórovitou destičku do vody tak, aby došlo k plnému nasycení materiálu vodou. V případě minerální vaty byl kladen větší důraz na přesnou úpravu tvaru zkoumaného vzorku tak, aby se po umístění do válečku nevytvářely preferenční cesty proudění vody, které by znehodnotily měření.

Na obrázku 3.1 vlevo lze vidět materiál při nasycování vodou. Žlutý váleček s minerální vatou uprostřed je umístěn na pórovité destičce, která dovoluje nasycení materiálu. Vpravo na obrázku 3.1 je zachycen měřící přístroj a k němu náležící komponenty. Zařízení je napojeno na laptop, do kterého se výsledky měření ihned zapisují.

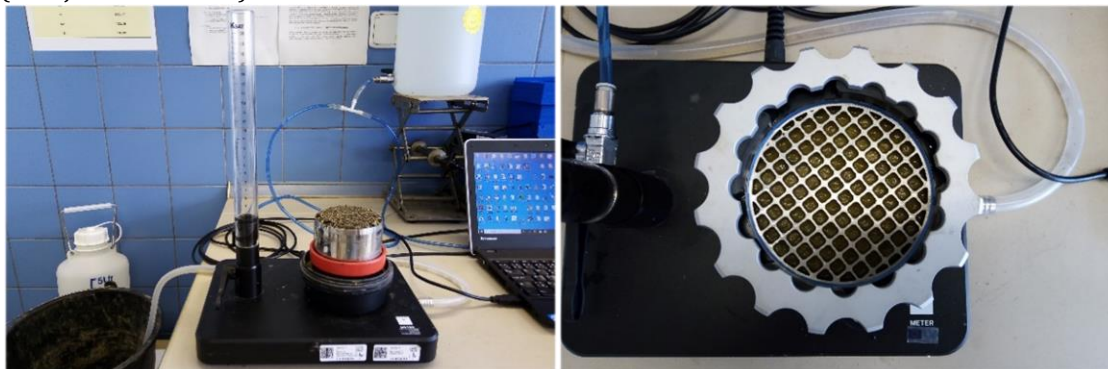
Proces měření začal stanovením nulového čtení na přístroji. Následovalo vynětí plně nasyceného vzorku z kádě s vodou a umístění do měřícího zařízení (obrázek 3.2 vlevo). Vrchní část vzorku byla zakryta víkem s mřížkou, kudy přetékala voda při procesu měření. Aby nedocházelo k přetékání vody v místech, kde to není žádoucí, vzorek byl upevněn na přístroj hliníkovým víkem (obrázek 3.2 vpravo). Ještě, než začalo samotné měření, bylo třeba docílit protečením určitého množství vody,

Praktická část

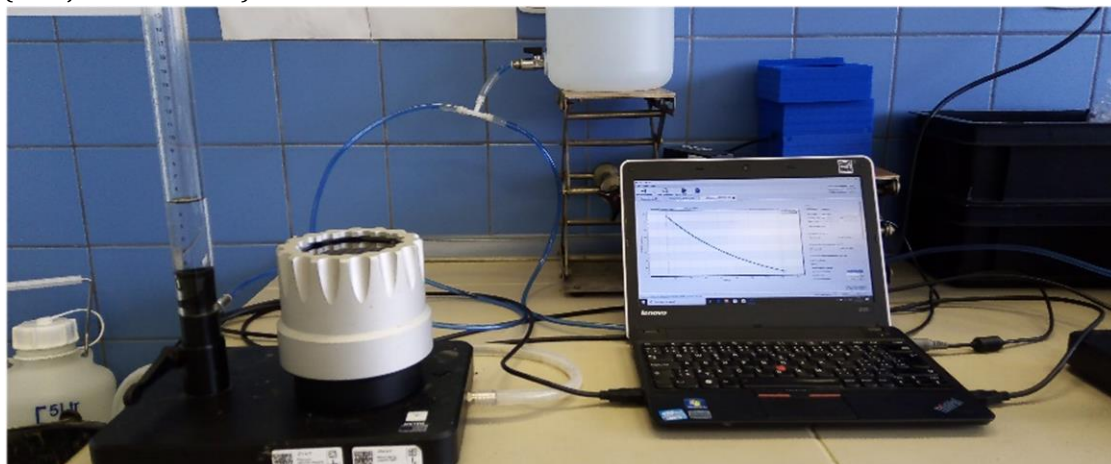
aby se na vrchní části vzorku ustálila malá vrstva vody. To totiž zaručuje plné nasycení i během procesu měření. Dále následovala série několika měření pro oba vzorky – substrát *ACRE* a minerální vatu. Výsledky se prakticky ihned zapisovaly do laptopu, na který byl napojen měřicí přístroj, jak je zachyceno na obrázku 3.3. Postup při zjišťování hodnot byl následovný. Nejprve bylo nutné naplnit skleněný váleček vodou. Na PC bylo spuštěno měření a páčkou v levé části přístroje bylo umožněno vodě protékat skrz vzorek.



Obrázek 3.1 – vzorek minerální vlny a laboratorní sestava
(Zdroj: vlastní archiv)



Obrázek 3.2 – sestava s umístěným vzorkem a upevnění vzorku
(Zdroj: vlastní archiv)



Obrázek 3.3 – vzorek a laboratorní sestava KSAT při měření
(Zdroj: vlastní archiv)

Objemová hmotnost minerální vaty silně ovlivňuje hydraulické charakteristiky minerální vaty. Výrobky, tedy desky minerální vaty, nevykazují homogenní hustotu v celém objemu desky. Protože tato veličina přímo ovlivňuje i hydraulickou vodivost, bylo možné očekávat rozdílné hodnoty K_s pro jednotlivá měření.

3.1.3 Výsledky

Jak lze vidět v tabulce 3.1 změřené charakteristiky vykazovaly i řádově rozdílné hodnoty pro minerální vatu. Nicméně i přes tento fakt lze konstatovat, že některé hodnoty jsou tedy platné a dále použitelné pro matematické modelování v softwaru *Hydrus 1D* (Šimůnek a kol., 2008). Ze souboru dat byla vyloučena extrémní hodnota na základě statistických pravidel (Katedra analytické chemie, 2019). Ty říkají, že pokud číslo převyšuje aritmetický průměr 3x, lze ho považovat za netypické a bez dalšího uvážení vyloučit. Tento postup vyloučení je dostatečný i vzhledem k malému souboru změřených dat K_s .

Pro přibližné stanovení závlahového množství programem *Hydrus 1D* proběhlo navíc zprůměrování změřených hodnot pro oba materiály. Nasycená hydraulická vodivost při teplotě $T = 24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ pro substrát *ACRE* se uvažuje jako $K_{s_ACRE} = 419 \text{ cm/d}$ a pro minerální vatu $K_{s_vata} = 6018 \text{ cm/d}$, resp. jako $K_{s_ACRE} = 278 \text{ cm/d}$ a $K_{s_vata} = 5007 \text{ cm/d}$ při teplotě $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 3.1 – změřené nasycené hydraulické vodivosti

	K_s [cm/d], $T = 24,2 \text{ }^\circ\text{C}$	K_s [cm/d], $T = 10,0 \text{ }^\circ\text{C}$	K_s [mm/s], $T = 24,2 \text{ }^\circ\text{C}$	K_s [mm/s], $T = 10,0 \text{ }^\circ\text{C}$
ACRE	589	355	0.068	0.041
	351	244	0.041	0.028
	355	247	0.041	0.029
Minerální vata Vzorek č. 1	8590	5910	0.994	0.684
	10980	7540	1.271	0.873
	6440	4420	0.745	0.512
	11490	7670	1.330	0.888
Minerální vata Vzorek č. 2	2730	2420	0.316	0.280
	7810	7300	0.904	0.845
	7730	7210	0.895	0.834
	5210	4740	0.603	0.549
Bougoul Floriculture	-	19440	-	2,250
Bougoul Expert	-	56160	-	6,500

3.2 Retenční křivka a stanovení hydraulických charakteristik

3.2.1 Metody

Ke stanovení funkce retenční čáry v dostupných laboratorních podmínkách byla použit přístroj *HYPROP* společnosti *Meter Environment* (METER Group, 2017b). Tato měřící soustava sledované veličiny zapisuje do připojeného počítače. Za pomoci softwaru téže společnosti lze tato data vyhodnotit. *HYPROP FIT*, jak ho *Meter* nazývají, poskytuje možnost na základě změřených dat vytvořit například retenční čáru. Tento program pracuje na základě vyjádření efektivní vlhkosti podle van Genuchtena (1.2) (van Genuchten, 1980).

Další práce v laboratoři tedy spočívala ve zjištění retenčních křivek obou zmíněných materiálů, tedy půdního substrátu *ACRE* a minerální vaty. K měření byl využit přístroj *HYPROP* společnosti *Meter Environment*, který pracuje na principu závislosti odpařené vody v čase, tedy vlhkosti vzorku, na změnách tlaků (METER Group, 2017b). Jde tedy o funkci tlakové výšky závislé na vlhkosti vzorku. Přístroj měří v intervalech 10 vteřin hmotnost sledovaného vzorku, čímž zjišťuje změny vlhkosti, a dále sleduje ve spodní části vzorku tlakový výška dvěma tenzometry, které lze vidět na obrázku 3.4. Stříbrný vzorkovací váleček je na fotce prázdný. Získané hodnoty zapisuje přístroj do softwaru, resp. souboru, na připojeném počítači.

Měřící set sestává z váhy, vzorkovacího válečku, PC a kabelů nutných k propojení všech zmíněných položek. Celou sestavu je možné vidět na obrázku 3.5. Obrázek reprezentuje měřící zařízení *HYPROP* připravené zaznamenávat změny hodnot vlhkosti, resp. váhy vzorku, a tlakové výšky. Na obou vahách jsou zobrazeny počáteční hmotnosti obou vzorků. Oba materiály byly před procesem měření plně nasyceny. Naplněný váleček byl tak ponechán částečně pod hladinou vody tak, aby se substrát, resp. vata, plně satureovaly.

Jedním ze vstupních parametrů pro měření, které *HYPROP* nezaznamená, je váha kovového válečku. Proto je obou válečcích vygravírována hmotnost s přesností 0,1 g. Před umístěním vzorků, jak je tomu na obrázku 3.5, bylo provedeno několik nezbytných procesů pro maximalizaci přesnosti měření. Stručný popis je zmíněn bodově takto:

Praktická část

- 1) Nasycení obou tenzometrů demineralizovanou vodou (vodu je žádoucí nejdříve též tzv. odplyňovat),
- 2) nasycení obou čidel pod tenzometry demineralizovanou vodou,
- 3) vynulování obou vah (uvažováno bez vzorku a měřícího podstavce s tenzometry),
- 4) vynětí plně nasycených vzorků z vody,
- 5) vyvrtání otvorů pro tenzometry do obou vzorků (1 mělčí a 1 hlubší otvor pro každý z měřených materiálů),
- 6) umístění vzorků na měřící podstavec s tenzometry,
- 7) propojení celého systému s PC.



Obrázek 3.4 – vzorkovací váleček na podstavci s tenzometry
(Zdroj: METER Group, 2017)



Obrázek 3.5 – sestava měřícího zařízení HYPROP včetně propojení s laptopem
(Zdroj: vlastní archiv)

Vzorek na obrázku 3.5 umístěný na pravé váze je substrát pro zelené střechy *ACRE*. Vlevo je minerální vata.

Celé měření trvalo 19 dní, kdy se ze vzorků odpařovala voda, a tak se měnily tlaková výška a hmotnost vzorku. Tyto hodnoty *HYPROP* v intervalech zaznamenával a ukládal na harddisk propojeného laptopu. Během měření došlo k hardwarové chybě a počítač přibližně po dobu jednoho týdne data nezapisoval.

3.2.2 Výsledky

Software *HYPROP FIT* poskytuje přehledný přístup ke změřeným datům a slouží též k jejich zpracování. Během procesu měření došlo k několikadennímu přerušení měření kvůli neočekávanému selhání hardwaru. Počítač byl několik dní vypnutý. Nicméně software je schopen chybějící data „ignorovat“ a neúplnou řadu změřených bodů, neboli rovnovážných stavů tlakových výšek a půdní vlhkosti, i přes jejich absenci proložit retenční čarou.

V tabulce 3.2 se nachází empirické koeficienty rovnice van Genuchtena pro oba materiály. Pro přesné stanovení těchto hodnot byly oba vzorky nejdříve vysušeny v peci po dobu jednoho dne při teplotě 105°C.

Tabulka 3.2 – parametry van Genuchtenovy rovnice

	θ_r [mm ³ /mm ³]	θ_s [mm ³ /mm ³]	α_{VG} [1/mm]	n_{VG} [-]	K_s [mm/s]
Minerální vata	0.0250	0.8550	0.00435	5.079	0.580
ACRE	0.346	0.729	0.01255	1.220	0.048

Kvůli zmíněné hardwarové chybě, při které bylo přerušeno měření, jsou navíc v tabulce 3.3 zavedeny hodnoty pro substrát z článku zabývající podobnou tématikou jako tato práce, a tedy segmentem zelené střechy pro sledování tepelných a hydrologických charakteristik u antropogenních půdních systémů. Tabulka je navíc doplněna o hodnotu nasycené hydraulické vodivosti K_s , která je nezbytná pro matematické modelování v *Hydrus 1D*. Hodnoty empirických koeficientů pro minerální vatu nejsou známy jinak než z vlastního měření.

Tabulka 3.3 – parametry van Genuchtenovy rovnice pro Optigreen Extensive

	θ_r [mm ³ /mm ³]	θ_s [mm ³ /mm ³]	α_{VG} [1/mm]	n_{VG} [-]	K_s [mm/s]
Substrát pro zelené střechy	0.050	0.350	0.004	1.362	0.036

(Zdroj: Jelínková a kol., 2016)

Vzhledem k nejistotě ohledně správnosti změřených a vyhodnocených dat pro substrát *ACRE* bylo rozhodnuto pro další postup brát v úvahu data pro Optigreen Extensive z tabulky 3.3.

Výpočetní software *Hydrus 1D* nabízí možnost využít oba přístupy, resp. obě rovnice, pro vyjádření retenční čáry. Vzhledem k datům, která poskytuje software *HYPROP FIT*, tedy empirické koeficienty van Genuchtena, byl pro následné matematické modelování zvolen právě jeho přístup.

3.3 Model experimentální zelené střechy

Cílem této práce bylo navrhnout a optimalizovat experimentální model zelené střechy, který má posloužit k pozorování a vyhodnocování vlivu na půdní charakteristiky závlahy zelených střech ŠV. Při návrhu modelu experimentální zelené střechy byl kladen důraz na širokou možnost regulace a variabilitu. Jak se lze dočíst v rešerši, ŠV bude mít jistý vliv na hydraulické charakteristiky substrátu. Jedním z doporučení pro snížení biologické aktivity je nechat surovou vodu nejdříve odstát např. v nádrži (ElZein, 2016). Dojde zde k biologickým reakcím, které vedou k rozkladu nežádoucích látek. Navíc ve vodě sedimentují rozptýlené částice, které se díky tomuto procesu nebudou podílet na zanášení modelu, resp. substrátu. Pro experimentální zelenou střechu, resp. pro předčištění ŠV, byla uvažováno umístění zásobní nádrže, která bude navíc plnit funkci hrubého předčištění v podobě sedimentace. Dalším benefitem skladování může být i biologický rozklad některých látek tak. Pro tyto účely lze doporučit například nádrž IBC. Nádrž je vhodná i vzhledem k typizovaným rozměrům. IBC může být umístěna na europaletu, což zajišťuje snadnou přepravu vysokozdvížným vozíkem apod.

Některé studie zmiňují jako vhodné kandidáty k decentralizovanému čištění šedých vod umělé mokřadní systémy (Avery a kol., 2007; Vymazal, 2002, 2005, 2010; Winward, 2008). ŠV by neměla v případě řešeného modelu být na zelené střeše přímo čištěna, ale sloužit jako závlahové médium. Proto bylo pro model uvažováno se začleněním předčištění v podobě umělého mokřadu, z něhož bude voda přetékat přelivnou hranou zmiňovanou v následující kapitole 3.4.

Model bude umístěn venku. Tak bylo rozhodnuto z toho důvodu, aby se co nejvíce experiment podobal procesům a přírodním podmínkám na reálné zelené střeše. Bylo tedy žádoucí tvar i materiál modelu přizpůsobit povětrnostním vlivům. Vana experimentální zelené střechy a musí odolávat korozi, resp. rezavění, a proto byl zvolen materiál korozivzdorná ocel, neboli nerezová ocel. Model bude pro snadnější obsluhu stát na nízkém podstavci z extrudovaného polystyrenu (XPS). Vrchní díl podstavce musí být zkosený v 5% sklonu, aby model odpovídal tvaru a dispozici skutečné zelené střechy. Trh nabízí spádové klíny z EPS polystyrenu, tedy ve variantě pěnového polystyrenu. Jelikož jsou oba typy polystyrenu částečně nasákavé, pro vyšší odolnost vůči povětrnostním vlivům bude podstavec obložen cementotřískovými deskami CETRIS, které se běžně používají jako fasádní systém pro budovy a jsou tedy velmi vhodné pro použití venku.

Experimentální zelená střecha sestává ze dvou hlavních částí – umělý mokřad a samotná zelená střecha. První verze modelu (příloha 1 a příloha 2) navíc uvažovala podstavec v podobě plastové nádrže, která měla zároveň sloužit ke skladování ŠV. Nicméně tato možnost byla nakonec zavrhnuta na základě osobní konzultace s odborníkem na svářečské práce, který podotýkal, že svářením plastových prvků by u navrženého provedení docházelo k příliš velkým deformacím (Kro, 2019).

Další úpravy modelu, resp. výkresů experimentální střechy proběhly na základě konzultací s odborníky. Ti doporučili rozdělit model na dva segmenty, a to na část zelené střechy a na část umělého mokřadu. kvůli snadnější manipulaci s celým modelem, zjednodušení svářečských prací a výhledově i z důvodu možnosti uplatnit řešení experimentální zelené střechy na střechu reálnou, byl celek rozdělen na dvě samostatné nerezové vany, jak lze vidět v přílohách 4 a 5. Vpravo je zobrazena menší nerezová nádoba umělého mokřadního systému. Zbytek pokrývá větší ze dvou částí, tedy extenzivní zelená střecha, do níž je na zároveň umístěn umělý mokřad.

Kompletní sestava experimentální střechy včetně souvrství a podstavce je znázorněna v příloze 5. V horní části lze vidět obě nerezové vany. Menší (umělý mokřad) vyčnívá. Sestava, jak je popsáno výše, je umístěna na podstavci z lepených XPS

Praktická část

polystyrenů včetně EPS klínu. Oba materiály včetně obložení z CETRIS desek jsou znázorněny růžovou barvou. Šedá barva symbolizuje záchytný žlab na konci modelu. Z něj bude téct na překlopný průtokoměr, který bude zaznamenávat množství vody vyteklé ze zelené střechy.

Funkce modelu je zřejmé ze schématu na obrázku 3.6, kde je popsán průběh závlahy experimentální střechy. Průběh v bodech vypadá takto:

- 1) Voda je čerpána z IBC nádrže a vytlačována do modelu,
- 2) ŠV natéká do umělého mokřadu, kde je částečně předčištěna procesy, kterých se přímo účastní vysazené rostliny,
- 3) z umělého mokřadu přetéká přelivnou hranu do malého zásobního prostoru pro předčištěnou vodu,
- 4) odtud voda přetéká přelivnou hranou s trojúhelníkovými zářezy a dvěma otvory ve stěně dál na část zelené střechy,
- 5) voda nasycuje půdní prostředí a minerální vatu,
- 6) voda postupuje ve spádu modelu až na úplný konec vany opatřený okapničkou (jedná se o ohnutý prodloužený kus dna větší vany),
- 7) voda přetéká do sběrného žlabu,
- 8) na výtoku ze žlabu je umístěn překlopný průtokoměr pro měření množství proteklé vody.

3.4 Výpočet výšky přepadového paprsku a přelivná hrana

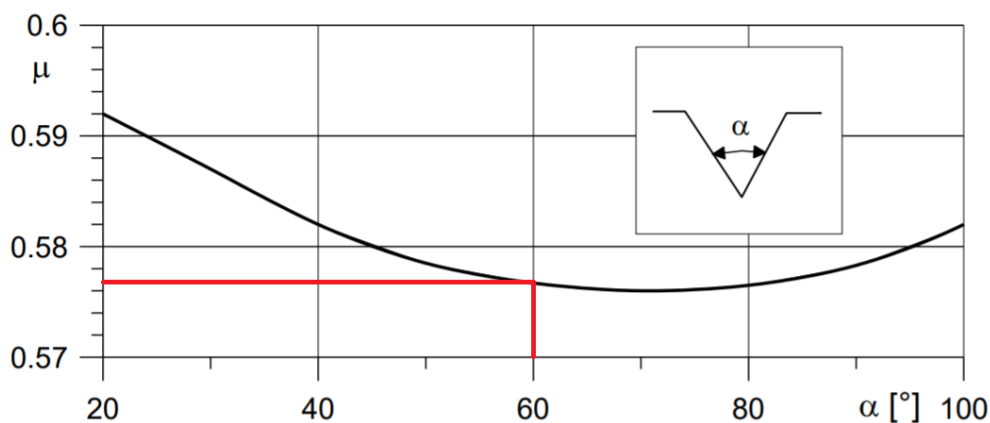
3.4.1 Metody

Nátok ŠV z mokřadního systému předčištění na zelenou střechu musí probíhat co možná nejvíce rovnoměrně tak, aby došlo k zavlažení celé plochy na modelu zelené střechy. Proto byla zvolena přelivná hrana s trojúhelníkovými výřezy. Důvodem této volby byla příliš nízká výška přepadového paprsku při uvažování rovné přelivné hrany. To by se v praxi mohlo projevit tak, že by voda stékala po stěně, čemuž je vhodné se v případě tohoto modelu vyhnout, aby se půdní profil zavlažil shora.

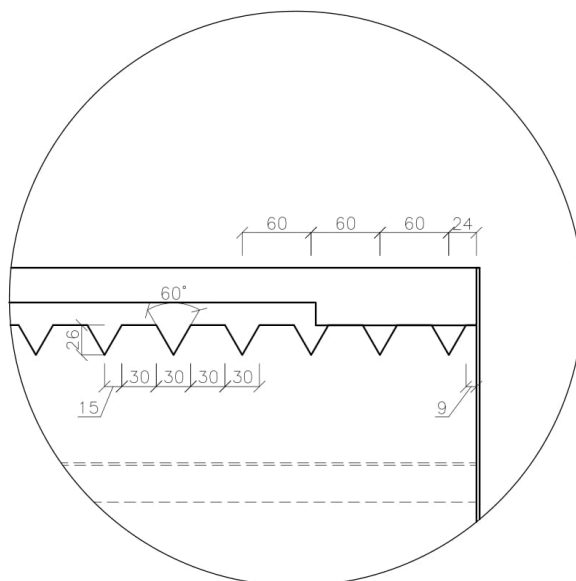
Dále bylo nutné zvážit konkrétní rozměry a počet trojúhelníkových výřezů. K tomu posloužily následující hydraulické výpočty pro přelivnou hranu trojúhelníkového tvaru (3.1) (Havlík a Pícek, 2017).

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_e^{5/2} \quad (3.1)$$

Aby bylo možné spočítat výšku přepadu přes trojúhelníkový přeliv, je nezbytné předem znát množství protékané vody. Průtok byl uvažován jako rozpětí hodnot od 160 do 460 dm³/d s dobami zdržení 2,33 d a 18,6 h, na základě hodnot pro umělé mokřadní systémy uváděných v Averyně (2007) článku. Přelivná hrana, jak je zřejmé z detailu na obrázku 3.8, byla navržena jako soustava několika rovnostranných trojúhelníků o délce strany 60 mm. Z toho je jasné, že strany svírají úhly 60°. Podle obrázku 3.7 a zmíněného úhlu byl zvolen součinitel přelivné hrany 0,577.



Obrázek 3.7– graf součinitele přepadu (doplněno)
(Zdroj: Havlík a Pícek, 2017)



Obrázek 3.8 – rozměry přelivné hrany
(Zdroj: vlastní archiv)

V softwaru Microsoft Office Excel byly dopočteny dvě hodnoty přepadové výšky h_e v závislosti na výše zmiňovaných průtocích umělými mokřadními systémy. Postup výpočtu je patrný v následující tabulce 3.3. Řešitel pracuje na iteračním principu, kdy se volbou čísel snaží dosáhnout co největší shody mezi zadaným a hledaným číslem. V tomto případě šlo o průtoky převzaté z článku. A tak právě touto funkcí došlo k nalezení požadovaných hodnot. Nadpis kapitoly je záměrně zvolený jako *Výpočet výšky přepadového paprsku a přelivná hrana*, protože přepadová výška zde hraje rozhodující roli, nicméně hledanou hodnotou byl počet přelivných trojúhelníků. Postup měl tedy zajistit takové množství, kdy se výška přepadového paprsku bude blížit k 10 mm, k čemuž došlo podle tabulky 3.3.

3.4.2 Výsledky

Tabulka 3.4 – tabelární výpočet výšky přepadového paprsku

Průtok 1			Průtok 2		
Q =	160	dm ³ /d	Q =	460	dm ³ /d
Q =	1852	mm ³ /s	Q =	5324	mm ³ /s
Q =	1.85E-06	m ³ /s	Q =	5.32E-06	m ³ /s
μ =	0.577	-	μ =	0.577	-
α =	60	°	α =	60	°
h_e =	7.2	mm	h_e =	11.0	mm
Q/17 =	109	mm ³ /s	Q/17 =	313	mm ³ /s
Q =	1852	mm ³ /s	Q =	5324	mm ³ /s

Na základě výpočtu z tabulky 3.4 bylo určeno množství a rozměry trojúhelníků přelivné hrany z menší vany mokřadního systému do větší vany modelu zelené střechy. Pro obě hodnoty průtoků umělým mokřadem jsme došli k přibližné hodnotě přepadové výšky (h_e) 10 mm při uvážení 17 rovnostranných trojúhelníkových přelivů s délkou strany 60 mm. Jejich rozmístění na přelivné hraně je symetrické.

3.5 Stanovení závlahového množství

3.5.1 Metody

Výpočet závlahového množství proběhl prostřednictvím matematického modelování v softwaru *Hydrus 1D*, který slouží k tvorbě modelu proudění v půdních profilech.

Zkoumanou část si lze představit jako nekonečně malý úsek půdního profilu s určitou výškou. V případě stanovení závlahového množství experimentálního modelu zelené střechy byl zvolen postup, který uvažuje plné nasycení minerální vaty. Ta zde slouží jako akumulární médium vody, které jí v případě potřeby poskytuje nenasyčené půdě.

Matematický model – Hydrus 1D

Využitím tohoto programu lze na základě hydraulických charakteristik půdního média a minerální vaty, na níž bude substrát uložený, dopočítat takové závlahové množství, kdy bude vata plně nasycená, a voda se bude distribuovat v substrátu dál ve směru spádu střechy. Od tohoto průtokového množství se odvíjí volba čerpadla, závlahové dávky či dispozice modelu.

Tento stav byl namodelován za známého předpokladu, tedy nulové tlakové výšky na spodním okraji minerální vaty. S touto podmínkou bylo uvažováno v horní části vany zelené střechy, resp. pod přelivnou hranou umělého mokřadního systému. Postup tvorby matematického modelu je zřetelný na obrázku 3.9, kde je vlevo zobrazeno schéma nátoky vody na umělý mokřad, výtok otvory a přepad na zelenou střechu přes přelivnou hranu. Vzhledem k tomu, jak již napovídá samotný název softwaru *Hydrus 1D*, že je matematický model v tomto případě řešitelný pouze

v jedné dimenzi, bylo nutné stanovit určitou plochu půdního profilu, kterou vydělíme průtok vytékající ze zdrže umělého mokřadu na povrch půdy. Tato plocha byla stanovena v závislosti na rozměrech vany experimentální střechy jako obdélník 497x30 mm.

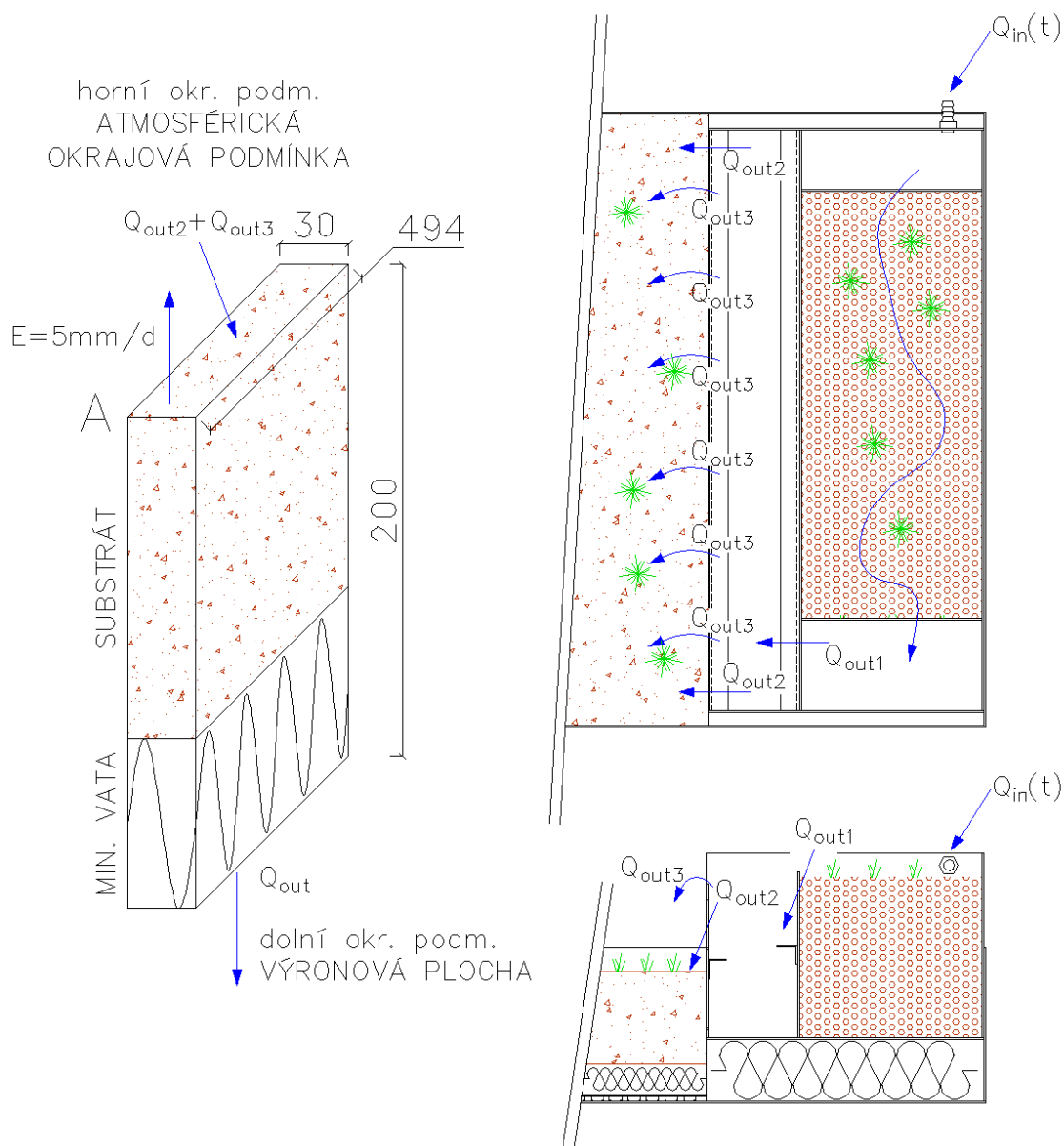
Hledanými hodnotami jsou tedy průtok $Q_{in}(t)$, kdy nastane na spodním okraji profilu zelené střechy nulová tlaková výška $h = 0 \text{ mm}$, a také čas, při kterém tato podmínka nastane. Na horní okraj půdního profilu přitéká množství $Q_{out2} + Q_{out3}$. Tyto průtoky reprezentují přepad přes přelivnou hranu a výtok dvěma otvory v nerezové vaně umělého mokřadního systému. V pravé části obrázku se můžete navíc setkat s průtokem Q_{out1} , který reprezentuje přepad z umělého mokřadu do zdrže, ze které vytéká právě jako Q_{out2} a Q_{out3} , které zde reprezentují výtok otvorem a přepad přes přelivnou hranu.

Řešení proběhlo pro dva stavy, a to pro suchou půdu s hodnotou tlakové výšky na bodu vadnutí $h = 150\,000 \text{ mm}$ a pro polní vodní kapacitu, tedy $h = 3300 \text{ mm}$.

Druhou hledanou hodnotou bylo právě takové množství vody W v jednotkách milimetrů, kdy nebude ze souvrství experimentální střechy nic vytékat. Jde tedy o takové množství vody, které se v půdě a vatě udrží pouze kapilárními silami. Tento stav byl namodelován za předpokladu volné drenáže na spodním okraji nižší vrstvy půdního profilu. Parametry modelu byly shodné se situací pro stanovení průtoku a času nasycení minerální vaty. Výpočet množství vody W je rozdíl mezi množstvím vody v plně nasyceném souvrství a v souvrství s hodnotou tlakové výšky na bodu vadnutí, resp. polní vodní kapacitě.

Nezbytnými parametry popisující vrstvy modelu experimentální zelené střechy byly empirické koeficienty van Genuchtena z tabulek 3.2 a 3.3. Do modelu byly zvoleny materiály substrát *Optigreen* tl. 150 mm a na spodní vrstvu v tl. 50 mm minerální vata. První zmíněný byl zvolen na základě řádové podobnosti s měřeným substrátem *ACRE*. Vata pak slouží jako akumulární médium vody. Modelová jednotka času byla sekunda a v případě rozměrů se jednalo o milimetry. Sledovaným místem byla spodní bod souvrství zelené střechy. Horní okrajovou podmínkou byl atmosférický tlak, dolní podmínku reprezentovala výronová plocha. Tento stav je

možné vidět na obrázku 3.9. Dalším vstupem byla evaporace 5 mm/d. 360 hodnot objemové toku q_{out} a času, kdy ke konkrétním tokům došlo, bylo vstupním souborem dat pro zjištění času, kdy dojde k nasycení spodního okraje minerální vaty, čímž nastane situace nulové tlakové výšky $h = 0$ mm.



Obrázek 3.9- schéma matematického modelu
(Zdroj: vlastní archiv)

Matematický model - Microsoft Excel

Protože *Hydrus 1D* nabízí možnost modelování pouze v rámci půdního profilu, bylo nutné vytvořit matematický popis plnění umělého mokřadu a přepadu vody na zelenou střechu. K tomu došlo v softwaru *Microsoft Office Excel*. Postup respek-

tuje hydraulické výpočty a uvažované rozměry modelu. Ze známých dimenzí modelu byly sestaveny vzorce pro plnění jednotlivých částí umělého mokřadu pro přepad vody pře dvě rozdílné přelivné hrany a pro výtok otvorem.

Pro větší přehlednost je postup v Excelu popsán bodově následně a dále jsou podrobněji vysvětleny jednotlivé vzorce:

- 1) Čas po krok po 60 sekundách t [s],
- 2) $Q_{in}(t)$, vstupní průtok, jehož množství je možné regulovat vlevo a vpravo je množství vyteklé vody, při které se čerpadlo vypne,
- 3) objem vody nateklý do umělého mokřadního systému V_{UM} [dm³] spočtený podle vzorce (3.2),
- 4) výška vody v umělém mokřadu h_1 [mm] ze vzorce (3.2),
- 5) přepadový součinitel v závislosti na přepadové výšce podle hydraulického výpočtu (3.3) m_1 [-],
- 6) průtok přes menší přelivnou hranu Q_{out1} [dm³/s] (3.3),
- 7) objem ve zdrži před přepadem na zelenou střechu $V_{před}$ [dm³] (3.4),
- 8) výtok otvory ve stěně (vzorec 3.5) zdrže s osou ve výšce 145 mm a o průměru 2,98 mm Q_{out2} [dm³/s],
- 9) průtok přes soustavu trojúhelníkových přelivných hran za zdrží umělého mokřadu Q_{out3} [dm³/s] na základě rovnice (3.6),
- 10) veškerý výtok z mokřadního systému do vany zelené střechy $2Q_{out2}+Q_{out3}$ [mm³/s],
- 11) objem nateklé vody V_{za_UM} [dm³] spočtený podle vzorce (3.7)
- 12) tok q [mm/s] získaný rovnicí (3.8), vstupní hodnota do softwaru Hydrus 1D.

Plocha A (v bodě 12) reprezentuje malý úsek (30 x 494 mm) půdy pod přelivnou hranou umělého mokřadu, která je též patrná ve schématu na obrázku 3.9 vlevo nahoře. Sešit v softwaru *Microsoft Excel* je přiložen na CD nosiči v této práci.

Průtok byl v *Excelu* naprogramován tak, aby ve chvíli, kdy dojde k výtoku na experimentální střechu, resp. k naplnění samostatné vany umělého mokřadu po spodní okraj otvoru, byla jeho hodnota snížena na hodnotu v rozmezí od 160 do

460 dm³/d zmiňovaném v Averyně (2007) článku. Další naprogramovanou podmínkou bylo vypnutí čerpadla po dosažení konkrétního množství vody nateklého na model, které lze definovat jako objemový tok násobený časovým úsekem. Jakmile tato suma dosáhla hodnoty W , čerpadlo se zastavilo a do modelu už nepřitékala žádná voda.

Soustava nádržek a přelivů byla namodelována hydraulickými a geometrickými výpočty. Vstupní část umělého mokřadního systému, mokřad naplněný keramzitem s celkovou pórovitostí $p_{keramzit} = 45,6 \%$ podle Lury (2005) a zdrž před menší přelivnou hranou byly reprezentovány objemem V_{UM} , z něhož bylo možné dopočítat, jak vystoupala hladina h_1 vody v čase v závislosti na zvoleném průtoku na model experimentální střechy. Výpočet je patrný z následujícího vzorce (3.2).

$$\begin{aligned} V_{UM} &= V_1 + V_2 + V_3 = l_1 \cdot b \cdot h_1 + l_2 \cdot b \cdot h_1 \cdot p_{keramzit} + l_3 \cdot b \cdot h_1 \\ &= h_1 \cdot (l_1 \cdot b + l_2 \cdot b \cdot p_{keramzit} + l_3 \cdot b) = Q_{in} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$h_1 = \frac{Q_{in} \cdot \Delta t}{(l_1 \cdot b + l_2 \cdot b \cdot p_{keramzit} + l_3 \cdot b)}$$

Na základě podmínky, zda hladina dosahuje k hraně obdélníkového přelivu byl spočten první přepadový průtok Q_{out1} . Pro výpočet byl použit hydraulický výpočet přepadu přes obdélníkový přeliv (3.3) (Havlík a Pícek, 2017).

$$Q_{out1} = m_1 \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h^3}; \quad m_1 = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \cdot \left[1 + 0,55 \cdot \left(\frac{h}{h+s}\right)^2\right] \quad (3.3)$$

Koeficient b reprezentuje šířku přelivu, h je potom přepadová výška a s je výška hrany přelivu ode dna nádržky. g je gravitační zrychlení.

Dle objemu, který přepadl přes přelivnou hranu do větší zdrže před přelivnou hranou navrženou v kapitole 3.4 byla odvozena hloubka vody h_2 v této nádržce (3.4).

$$V_{před} = b \cdot l \cdot h_2 = Q_{out} \cdot \Delta t \Rightarrow h_2 = \frac{Q_{out} \cdot \Delta t}{b \cdot l} \quad (3.4)$$

Dalšími situacemi popsanými hydraulickými vzorci byly výtok otvorem (3.5) a přepad přes soustavu trojúhelníkových přelivných hran (3.6) (Havlík a Pícek, 2017). Oba jevy byly ošetřeny podmínkou IF , která v *Excelu* zajišťuje spuštění jejich výpočtu až za určitého předpokladu. Zde ve chvíli, kdy hladina vystoupá až k hraně otvoru, resp. k hraně trojúhelníkového přelivu.

$$Q_{out2} = \frac{2}{3} \mu_v \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(h_{E2}^{\frac{3}{2}} - h_{E1}^{\frac{3}{2}} \right) \approx \frac{2}{3} \mu_v \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}} \right) \quad (3.5)$$

$$Q_{out3} = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_e^{5/2} \quad (3.6)$$

V případě obou hydraulických vzorců je μ součinitel přepadu, resp. výtoku otvorem. h nebo h_e zastupují přepadové výšky a b je šířka výtokového otvoru. α je úhel přilehlý ke spodnímu vrcholu trojúhelníku a g je gravitační zrychlení.

Objem vody vyteklý dvěma otvory a přepadlý přes soustavu trojúhelníkových přelivů je pak definován vzorcem (3.7).

$$V_{za_UM} = (2Q_{out2} + Q_{out3}) \cdot \Delta t \quad (3.7)$$

Vstupní hodnotou do matematického modelování v programu *Hydrus 1D* je objemový tok q_{out} . Je spočten jako podíl součtu výtoků dvěma otvory a přepadu přes přelivnou hranu (3.8).

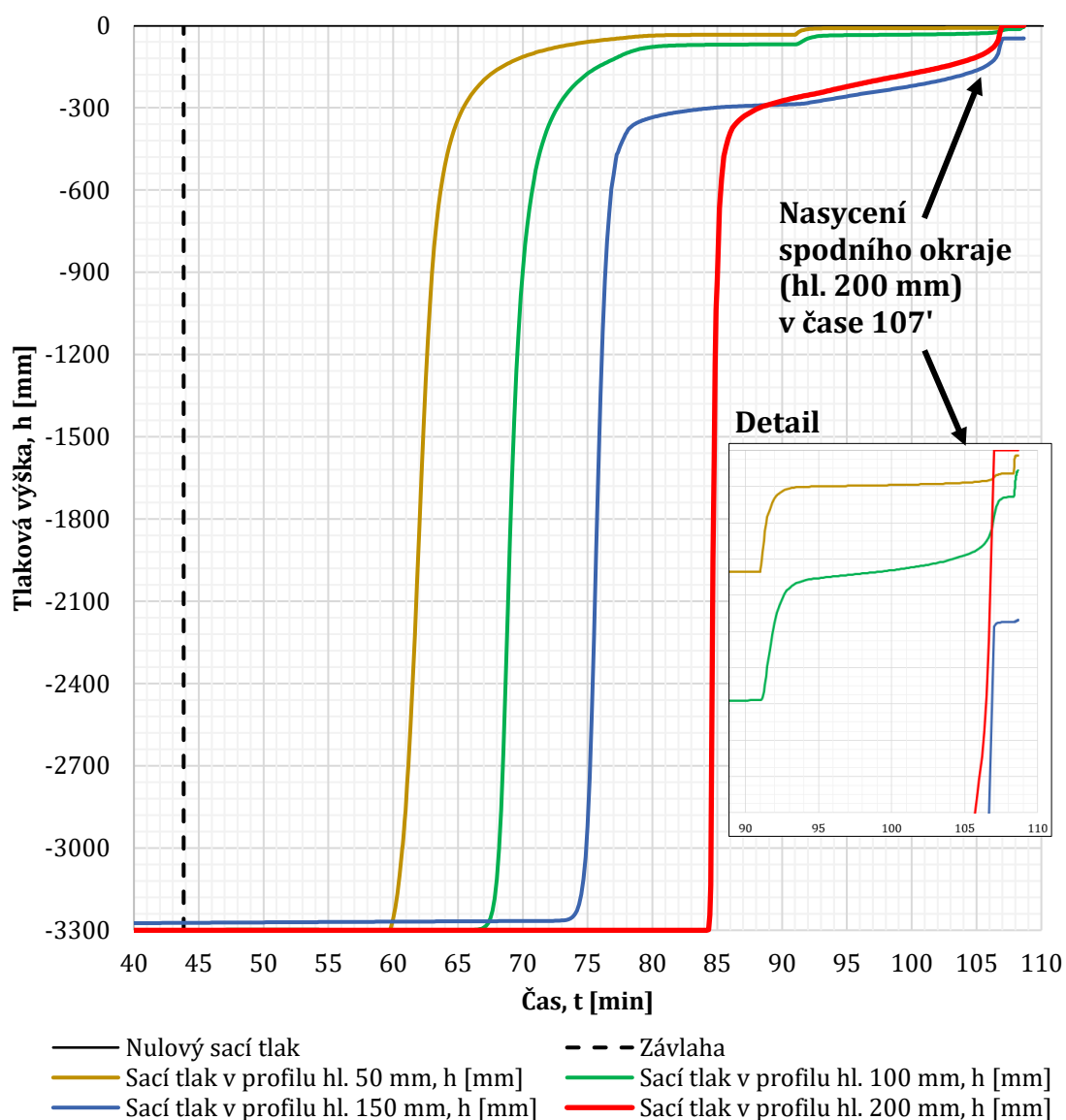
$$q_{out\ i} = \frac{2Q_{out2} + Q_{out3}}{A_i} \quad (3.8)$$

3.5.2 Výsledky

Množství vody, které se udrží v souvrství kapilárními silami bylo určeno pro dva stavy. Prvním z nich bylo pro souvrství experimentální zelené střechy s počáteční podmínkou polní vodní kapacity a druhý byl reprezentován okrajovou podmínkou bodu vadnutí. Množství vody W pro obě situace lze nalézt v tabulce 3.5.

Tabulka 3.5 – množství vody udržené kapilárními silami

	$\Sigma W_1 + W_2$ [mm]	W_1 Substrát [mm]	W_2 Minerální vata [mm]
A Nasycené souvrství	92.22	48.28	43.95
B Polní vodní kapacita	26.50	25.05	1.45
C Bod vadnutí	13.22	11.87	1.36
$W_{P.V.K.} = A - B$	65.72	23.22	42.50
$W_{B.V.} = A - C$	79.00	36.41	42.59

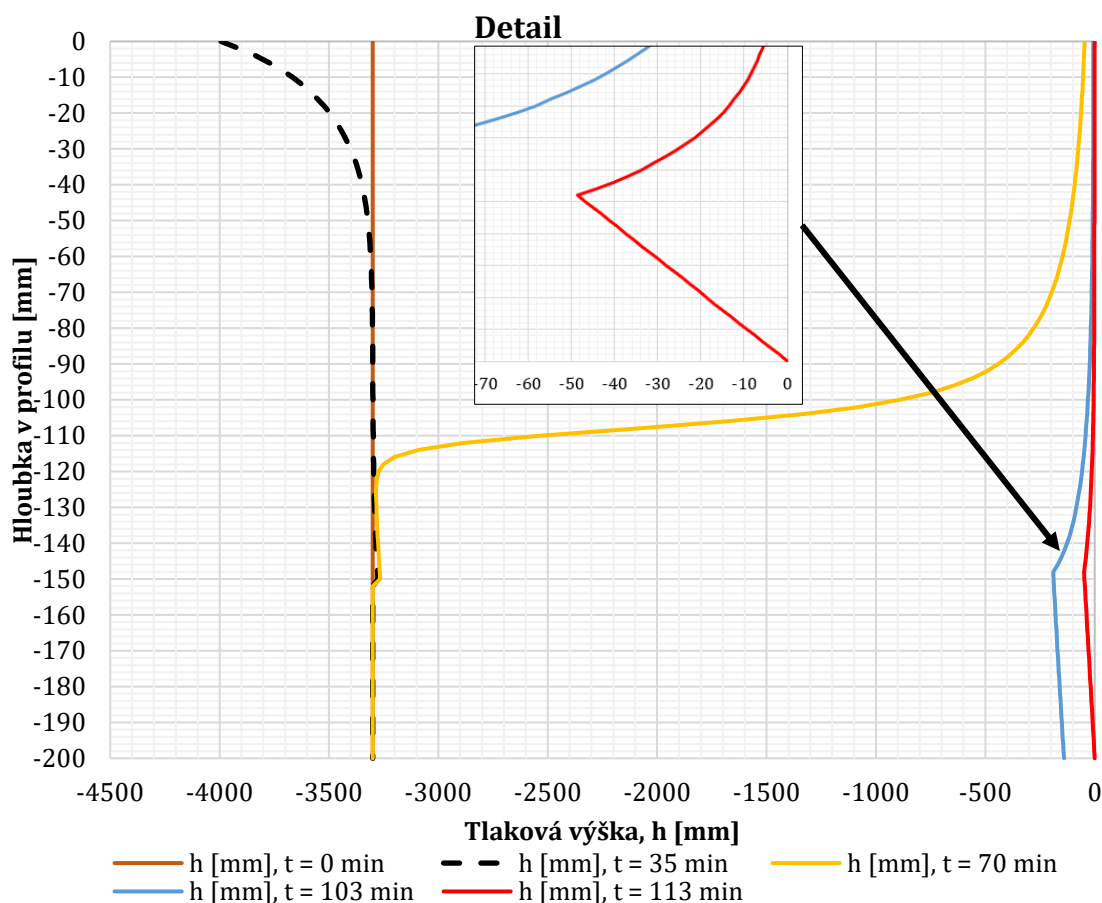


Obrázek 3.11 – průběh tlakových výšek v pozorovacích bodech
 (Zdroj: vlastní archiv)

Praktická část

Množství vody **A** reprezentuje nasyceného souvrství po volné drenáži. **B** je množství vody poutané kapilárními silami při hodnotě tlakové výšky na polní vodní kapacitě a dále **C** pro bod vadnutí. Rozdíl W_{PVK} , resp. $W_{B.V.}$ odpovídá množství vody, které můžeme do souvrství napustit bez odečtení spodním okrajem.

Obrázek 3.11 zachycuje průběh tlakových výšek v čase. V grafu jsou zobrazeny křivky pro čtyři pozorovací body v různých hloubkách souvrství 50, 100, 150 a 200 mm. Z obrázku je patrné, že k plnému nasycení spodního okraje z počáteční podmínky polní vodní kapacity a tedy k nulové tlakové výšce dochází v čase 98 minut a 50 vteřin. Červená křivka zachycuje průběh nasycení na spodním okraji minerální vaty v hloubce 200 mm.



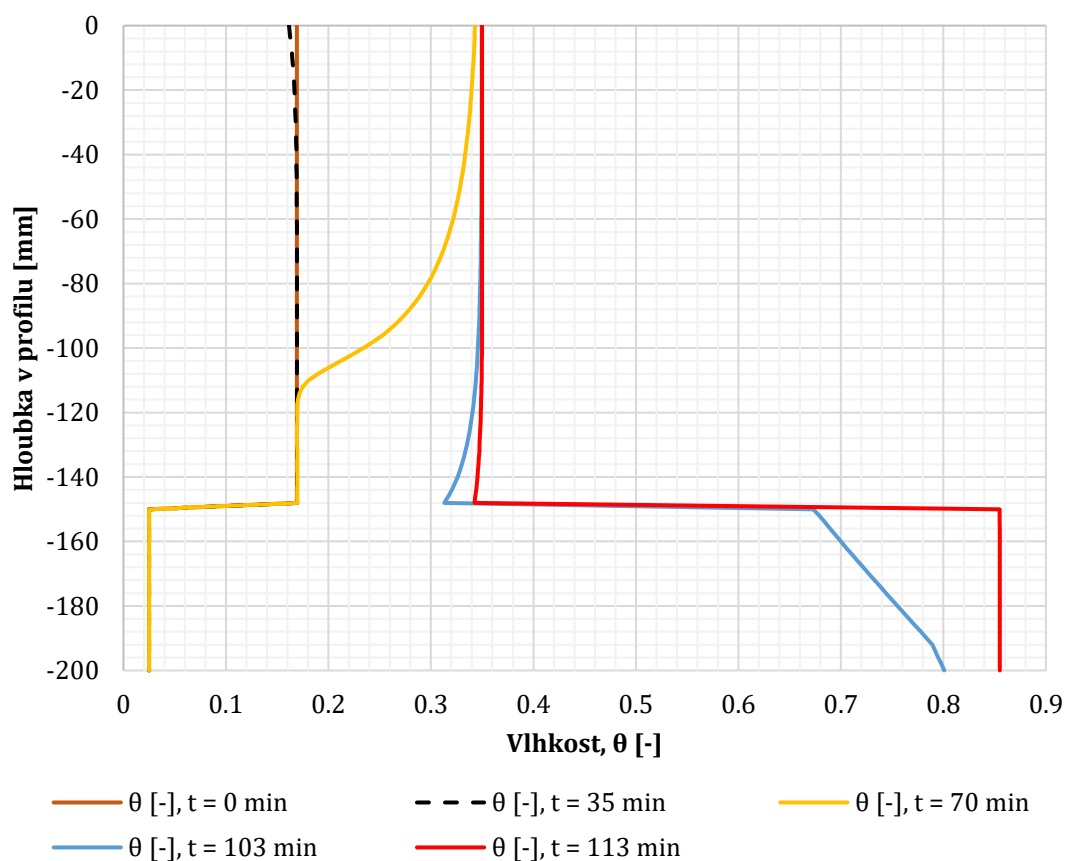
Obrázek 3.12 – průběh tlakové výšky v profilu pro různé časy od začátku čerpání
(Zdroj: vlastní archiv)

Na obrázku 3.12 je zobrazen průběh tlakové výšky v profilu substrátu a minerální vlny při stejných počátečních podmínkách v různých časech 0, 35, 70, 103 a 113 minut. Na počátku je tlaková výška v celém profilu rovna hodnotě 3300 mm, tedy hodnotě tlakové výšky pro polní vodní kapacitu. Je zřejmé, že v přibližném

Praktická část

čase 113 minut (červená křivka na obrázku 3.12) dochází k nasycení téměř celého profilu až na menší místo styku vaty se substrátem v hloubce 150 mm až ke spodnímu okraji, kam klesá tlaková výška až k hodnotě 0 mm.

Další graf na obrázku 3.13 zobrazuje průběh vlhkosti v okamžicích shodných s profily tlakové výšky, a tedy v časech 0, 35, 70, 103 a 113 min. Počáteční vlhkost profilu je zobrazena hnědou čarou. Konečný stav je znázorněn křivkou červené barvy. Z obrázků 3.12 a 3.13 je zjevný vliv evaporace z povrchu. V případě čárkované křivky v čase 35 min dochází v horních několika milimetrech nejdříve k poklesu hodnot tlakové výšky a vlhkosti. V případě červené čáry v čase 113 min lze vidět, že se blíží hodnotám nasycené vlhkosti známé z tabulky



Obrázek 3.13 – průběh vlhkosti v profilu pro různé časy od začátku čerpání (Zdroj: vlastní archiv)

Konkrétní hodnoty pro vynesení grafů na obrázcích 3.11, 3.12 a 3.13 jsou k nalezení na CD nosiči přiloženém v této práci.

V případě závlahy souvrství ze stavu na bodu vadnutí došlo k nasycení spodního bodu minerální vaty v čase 112 min. Průběhy zvlhčování a tlakových výšek byly veskrze obdobné jako v případě závlahy z počáteční podmínky polní vodní kapacity.

Hodnota průtoku, kterým bylo docíleno obou stavů nasycení byla 0.0031 l/s. Je nezbytné brát v úvahu, že časy nasycení byly uvažovány včetně předchozího napouštění jednotlivých zdrží umělého mokřadu průtokem 0,02 l/s. K samotné závlaze souvrství experimentální zelené střechy došlo až v čase přibližně 54 min po naplněný umělého mokřadního systému po okraj otvorů, resp. soustavy trojúhelníkových přelivů. Toto množství představuje objem ŠV v modelové části umělého mokřadu přibližně 64 l. Přehledné shrnutí všech hledaných hodnot se nachází v následující tabulce 3.6.

Tabulka 3.6 – shrnutí výsledků

POPIS STAVU	POČÁTEČNÍ PODMÍNKA	
	<i>Bod vadnutí</i>	<i>Polní vodní kapacita</i>
<i>Napouštění vany</i>	$Q_{in} = 0.0200 \text{ l/s}$	$Q_{in} = 0.0200 \text{ l/s}$
<i>Závlahový průtok</i>	$Q_{in} = 0.0031 \text{ l/s}$	$Q_{in} = 0.0031 \text{ l/s}$
<i>Doba nasycení vč. napouštění</i>	$t = 112 \text{ min}$	$t = 107 \text{ min}$
<i>Doba nasycení</i>	$t = 59 \text{ min}$	$t = 53 \text{ min}$
<i>Množství vody, které po závlaze neodteče</i>	$W = 79 \text{ mm}$	$W = 66 \text{ mm}$

3.6 Počet závlahových dávek

Z článku Avery a kol. (2007) je zřejmé, že ŠV může být částečně předčištěna pouze při dodržení určité doby zdržení v umělém mokřadu. Autoři stanovují tuto dobu jako interval v závislosti na průtoku 18,6 h až 2,33 d pro systém *GROW* při kontinuálním průtoku 460 l/d až 160 l/d a objemu mokřadního systému přibližně 8 m³. Pro případ mokřadu modelu řešeného v této práci vyplněného keramzitem je v tabulce 3.7 znázorněn tabelární výpočet počtu závlahových dávek provedený v softwaru *Microsoft Excel*. Výpočet uvažoval průměrnou dobu zdržení 1,3 dne jako průměr doporučených hodnot z článku Avery a kol. (2007) a průtoková množství pro napouštění umělého mokřadu a závlahu experimentální zelené střechy.

Z tabulky 3.7 je zjevné, že počet impulzů, na které je potřeba rozdělit závlahovou dávku. Při zavlažovacím průtoku $Q_{in} = 0,003$ l/s právě 10 dávek. Trvání jedné dávky je 15 minut. Pauzy mezi impulzy by se měly pohybovat okolo 186 minut. Tímto způsobem by mělo dojít k čištění šedé vody systémem umělého mokřadu srovnatelnému s článkem Avery a kol. (2007).

Tabulka 3.7 – počet závlahových dávek pro závlahový průtok

p_{keramzit}	0.456	-	$T_{\text{model}}=V_{p_{\text{keramzit}}}/Q_{\text{model}}$	<i>za jak dlouho se vymění V_p</i>
l_{model}	694	mm	T_{model}	0.1 d <i>doba zdržení v modelu</i>
h_{model}	300	mm	T_{GROW}	1.3 d <i>doba zdržení v systému GROW</i>
b_{model}	297	mm	n	10 - <i>kolikrát denně se vymění V_p</i>
V_{model}	6.2E+07	mm ³	n	13 - <i>kolikrát se vymění V_p vzhledem ke GROW</i>
V_{model}	61.835	dm ³	$t_{\text{plnění_UM}}$	0.02 d <i>doba plnění UM</i>
Q_{model}	271	dm ³ /d	$t_{\text{plnění_UM}}$	150 min <i>doba plnění UM</i>
Q_{model}	3140	mm ³ /s		
Q_{model}	0.00314	l/s	n	10 - <i>počet impulzů</i>
$V_{p_{\text{keramzit}}}$	2.8E+07	mm ³	$t_{\text{plnění_dávka}}$	15 min <i>doba jednoho impulzu</i>
$V_{p_{\text{keramzit}}}$	28.2	dm ³	t_{pauza}	186 min <i>pauza mezi impulzy</i>

Pro případ napouštění nádržky umělého mokřadu je uvážen vyšší než závlahový průtok a tedy 0,02 l/s. Pro tuto situaci je z tabulky 3.8 zřejmé, že se prodleva mezi impulzy prodlouží na téměř 200 min a doba napouštění se naopak zkrátí na 2 min.

Tabulka 3.7 – počet závlahových dávek pro napouštění

p_{keramzit}	0.456	-	$T_{\text{model}}=V_{p_{\text{keramzit}}}/Q_{\text{model}}$	<i>za jak dlouho se vymění V_p</i>
l_{model}	694	mm	T_{model}	0.1 d <i>doba zdržení v modelu</i>
h_{model}	300	mm	T_{GROW}	1.3 d <i>doba zdržení v systému GROW</i>
b_{model}	297	mm	n	10 - <i>kolikrát denně se vymění V_p</i>
V_{model}	61835400	mm ³	n	13 - <i>kolikrát se vymění V_p vzhledem ke GROW</i>
V_{model}	61.8354	dm ³	$t_{\text{plnění_UM}}$	0.03 d <i>doba plnění UM</i>
Q_{model}	271.2932	dm ³ /d	$t_{\text{plnění_UM}}$	23 min <i>doba plnění UM</i>
Q_{model}	3139.9676	mm ³ /s		
Q_{model}	0.02	l/s	n	10 - <i>počet impulzů</i>
$V_{p_{\text{keramzit}}}$	28196942	mm ³	$t_{\text{plnění_dávka}}$	2 min <i>doba jednoho impulzu</i>
$V_{p_{\text{keramzit}}}$	28.196942	dm ³	t_{pauza}	199 min <i>pauza mezi impulzy</i>

3.7 Doporučení pro provoz experimentální střechy

Aby byl zajištěn bezporuchový provoz modelu, je třeba během na něm prováděných experimentů dodržovat některá pravidla. Zásadními hodnotami při manipulaci s modelem jsou především průtoková množství. Průtok při napouštění modelu by se měl pohybovat okolo 0,020 l/s, při zavlažování, resp. při přepadání vody z umělého mokřadu na segment extenzivní zelené střechy, by množství nemělo přesáhnout 0,003 l/s. Respektování stanovených hodnot zabezpečuje bezpečný a bezporuchový provoz experimentální plochy. V rámci napouštění jde zejména o dodržení hodnoty blízko hodnoty 0,020 l/s, jinak může dojít k přelití vody mimo hranice modelu. Průtokem 0,003 l/s je zajištěno správné nasycení půdního profilu během doby stanovené na 53 min pro závlahu z polní vodní kapacity, resp. 59 min při závlaze suché extenzivní střechy.

Pokud má být ŠV předčištěna v systému umělého mokřadu, je třeba respektovat dobu zdržení v tomto místě. Doporučená doba zdržení je při průtoku 0,003 l/s 1,3 dne. Je tedy nutné závlahový a napouštěcí průtok rozdělit do deseti impulzů, mezi nimiž je žádoucí dodržet pauzy. Napouštění je rozděleno do 10 impulzů trvajících 2 min s pauzami 199 min. Závlahový průtok je taktéž rozdělen do 10 impulzů. V tomto případě jeden impulz trvá 15 min a pauzy 186 min.

Na základě výsledků z předchozích kapitol bylo dosaženo konečné verze modelu experimentální střechy, jehož výkres se nachází v této práci jako přílohy 4 a 5. Závlahové médium bude skladováno v IBC nádrži, z něhož bude vytlačováno čerpadlem na model. Nátok z nádrže bude probíhat hadicí připojenou na hadicový trn ½". Na výtoku z modelu bude probíhat měření překlopným průtokoměrem. Čerpání ŠV z IBC nádrže bude ošetřeno regulací průtoku. Výtlačné potrubí by mělo být zkonstruováno tak, aby docházelo k tzv. škrcení, tedy k umělému navýšení hydraulických ztrát, kterým se sníží průtokové množství.

4. Diskuse

V rámci DP proběhlo měření půdních charakteristik v laboratoři, které s sebou přináší nejistoty způsobené především chybami při měření. Z článku Bougoula a kol. (2005) a osobních zkušeností vychází, že i v rámci jednoho vzorku minerální vaty může dojít ke změření značně rozdílných hodnot. Měření prokázalo, že stanovení nasycené hydraulické vodivosti u jednoho vzorku minerální vaty může vykazovat i řádově jiné výsledky. Právě proto byl pro porovnání a alespoň minimální potvrzení správnosti laboratorně změřených hodnot vybrán Bougoulův článek. Tímto srovnáním bylo potvrzeno, že průměr změřených hodnot nasycených hydraulických vodivostí ošetřených statistickým vyloučením extrémů se příliš neliší od měření v článku Bougoula a kol. (2005).

Rozměry experimentální plochy řešené touto prací jsou v porovnání s dostupnými zdroji řádově menší. Mokřadní segment experimentální zelené střechy je přibližně 0,06 m³. Avery a kol. (2007) zmiňují systém GROW, který je řešením podobný mokřadní části experimentální zelené střechy, s objemem bezmála 8,00 m³ s průměrnou dobou zdržení 1,3 dne. DP nalézá řešení v rozdělení průtoku při napouštění, resp. při závlaze, na jednotlivé impulzy. Vzhledem ke značnému rozdílu v objemech umělých mokřadních systémů v této práci a článku Avery a kol. (2007) je navíc vhodné zvážit volbu obměny pórovitého kameniva po určité době testování na experimentální zelené střeše vzhledem k možnému zanášení, na které ve svém článku poukazují Avery a kol. (2007) a Pradhan (2019).

Řešení mokřadní části experimentální zelené střechy se částečně shoduje s řešením zmíněným článku Avery a kol. (2007). Konstrukce zelené střechy se podobá modelům, které uvádí Chowdhury a Abaya (2018), a souvrství koresponduje s článkem Batese (2015). Lze tedy očekávat, že experimentální plocha bude funkčním nástrojem k měření vlivu závlahy ŠV na půdní charakteristiky. Nicméně nelze přímo porovnat výsledky měření na experimentální zelené střeše vzhledem k tomu, že testování fyzikálního modelu proběhne, až po dokončení této práce.

Matematický model proudění vody v porézním prostředí v této práci byl sestaven s volbou neznečištěné vody jako kapalného média. Pro přesnější počítání bylo vhodnější sestavit vlastní kód, který by zahrnoval jiné vlastnosti ŠV. Protože vlastnosti kapalného média (viskozita a hustota) ovlivňují hydraulickou vodivost podle Kutílka a kol. (1993, 2000) a Kozáka a kol (2008). Z tohoto poznatku je zřejmé, že i laboratorní testování mělo pro zpřesnění výsledků proběhnout s použitím ŠV jako kapalného média, případně bylo vhodné napodobit jeho charakteristiky.

Modelování v *Hydrus 1D* poskytuje náhled pouze v jedné dimenzi. Jedná se tedy o hrubou aproximaci řešeného úseku, kterou vzniká nepřesnost vycházející z faktu, že v případě 2D, resp. 3D modelu by se médium distribuovalo nejen ve směru vertikálním, ale i v horizontálním. Pro bližší studium proudění v porézním prostředí je tedy vhodné použít software řešící tuto problematiku v plošném či prostorovém rozměru. To by obsahově mohla být samostatně řešená úloha, a tedy možný námět na další diplomovou práci.

Není zcela jasné, jaký vliv bude mít skladování ŠV v IBC nádrži na její vlastnosti. Autoři se rozcházejí v názorech na tuto problematiku. Avery a kol. (2007) a ElZein (2016) vnímají skladování pozitivně. Dochází podle nich k usazování rozptýlených částic a redukci některých ukazatelů znečištění. Oh (2018) naopak zmiňuje nárůst množství bakterií při skladování, vyšší spotřebu kyslíku a výsledné zapáchání ŠV.

DP nabízí více variant navrhovaného modelu experimentální zelené střechy. Nicméně některé byly například z důvodu nákladné výroby nebo kvůli pravděpodobným deformacím při sváření shledány jako nevhodné. Je ale možné, že by se mohly uplatnit při obdobných či navazujících výzkumech.

Závěr

Rešerše nabízí širší pohled na nakládání s odpadními vodami decentralizovanými systémy čištění na zelených střechách nebo na umělých mokřadech. Autoři se veskrze shodují na závěru, že v dnešní době snahy o všeobecnou udržitelnost zdrojů a o udržitelnost vody v krajině je možnost čištění ŠV touto cestou velmi vítaná. Některé poznatky zjištěné rešerší jsou navíc vhodným podkladem pro budoucí experimenty na fyzikálním modelu řešeném v této práci.

Cílem práce bylo navrhnout experimentální model zelené střechy. Ten sestává ze dvou nerezových van. První menší nádrž reprezentuje předčištění umělým mokřadem vyplněným pórovitým kamenivem, které spolu s vysazenými rostlinami přispívá k odbourávání některých látek v ŠV. Umělý mokřad je navržen jako systém nádržek, otvorů a přelivů, které v konečné fázi zajišťují rovnoměrnou distribuci vody na část zelené střechy. Hydraulickými výpočty byly spočteny přepady přes přelivné hrany a výtoky otvory v závislosti na určitém průtoku a hladině v umělém mokřadním systému. Druhý segment představuje zelenou střechu. Souvrství střechy sestává z podkladu v podobě geotextilie a nopové folie, na němž je umístěno akumulární médium ŠV – minerální vata. Svrchní vrstvou je pak substrát, který bude na modelu testován. Experimentální plocha je situována ve sklonu 5 %, aby docházelo k soustředění odtoku jedním směrem. Na níže položeném konci modelu je umístěna okapnička a žlábkový svod, ze kterého voda natéká na překlopný průtokoměr, jímž budou zaznamenávány odtokové poměry.

Pro sestavení matematického modelu bylo nutné zjistit některé půdní charakteristiky materiálů v souvrství experimentální zelené střechy. Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti a koeficienty rovnice retenční čáry byly zjištěny laboratorně. Změřená nasycená hydraulická vodivost minerální vaty se pohybovala okolo $K_{s_min_vata} = 5000 \text{ cm/d}$. V případě testovaného substrátu *ACRE* byla naměřená hodnota přibližně $K_{s_ACRE} = 278 \text{ cm/d}$.

Navržený závlahový průtok byl testován matematickým modelem plnění segmentů experimentální plochy a 1D modelem proudění vody v porézním prostředí

pro dvě počáteční situace – souvrství nasycené na polní vodní kapacitu a souvrství vysušené na bod vadnutí. 1D model je zjednodušením zkoumané části, která vzhledem k jednodimenzionálnímu rozměru podhodnocuje množství vody, které je možné do systému načerpat. Byla zjištěna dvě průtoková množství, která by měla být během provozu experimentální střechy dodržena. Průtok 0,020 l/s, kterým bude voda vytlačována do modelu až do chvíle napuštění segmentu umělého mokřadu až po spodní hranu výtokových otvorů a závlahové průtočné množství 0,003 l/s, které má za cíl rovnoměrně zavlažit část extenzivní střechy a dle počátečního stavu a doby trvání závlahy nasytit půdní profil. V případě zavlažování souvrství z polní vodní kapacity trvá nasycení spodní hrany minerální vaty 107 minut včetně plnění vany umělého mokřad, 53 minut za předpokladu naplněné vany. Nasycení souvrství z bodu vadnutí trvalo přibližně 112 minut, resp. 59 min, pokud byl umělý mokřad předem naplněn vodou množstvím okolo 42 l ŠV. Oba výše zmíněné průtoky byly vzhledem k respektování doby zdržení ŠV v umělém mokřadu $T \approx 1,3$ d rozděleny na 10 impulzů. Při napouštění je prodleva mezi jednotlivými impulzy 199 min při trvání impulzu 2 min a při závlaze je pauza mezi dávkami 186 min při 15 minut dlouhém impulzu.

Přílohami této práce je výkresová dokumentace modelu zahrnující dílenskou dokumentaci pro ke zhotovení modelu a dále také jiné varianty, které vznikly během řešení.

DP je podkladem pro zhotovení fyzikálního modelu experimentální zelené střechy, který je součástí dílčího projektu REVOZIM v rámci Centra pokročilých materiálů a efektivních budov, NCK CAMEB, podpořeného Technologickou agenturou České republiky. Tým vědců bude na navržené experimentální ploše sledovat vliv závlahy ŠV na zelené střechy. Práce může být navíc podnětem pro další bádání v oblasti čištění ŠV umělými mokřady a zelenými střechami.

Seznam zdrojů

Literatura

- [1] ACRE [online]. Praha: ACRE, 2014 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.acre.cz/cs/menu/produkty/material-pro-zelene-strechy/stresni-substrat/>
- [2] ANWAR, F. 2011. *Effect of Greywater Irrigation on Soil Characteristics*, In Saji Baby and Li Xuan (ed), 2011 International Conference on Environmental Science and Development (ICESD 2011), Jan 7 2011, pp. 15-18. Mumbai, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [3] APH - přednáška. *Hydrology* [online]. Praha: ČVUT FSv, 2015 [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydrology/vyuka/APH/APH.htm>
- [4] AVERY, Lisa M., Ronnie A.D. FRAZER-WILLIAMS, Gideon WINWARD, Chris SHIRLEY-SMITH, Shuming LIU, Fayyaz A. MEMON a Bruce JEFFERSON. *Constructed wetlands for grey water treatment*. 2007, 7(3-4), 191-200. DOI: 10.1016/S1642-3593(07)70101-5. ISSN 16423593. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1642359307701015>
- [5] BATES, Adam J., Jon P. SADLER, Richard B. GRESWELL a Rae MACKAY. *Effects of varying organic matter content on the development of green roof vegetation: A six year experiment*. *Ecological Engineering*. 2015, 82, 301-310. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.102. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857415300082>
- [6] BOUGOUL, S., S. RUY, F. DE GROOT a T. BOULARD. *Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture*. *Scientia Horticulturae*. 2005, 104(4), 391-405. DOI: 10.1016/j.scienta.2005.01.018. ISSN 03044238. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423805000415>
- [7] CATALANO, Chiara, Vito Armando LAUDICINA, Luigi BADALUCCO a Riccardo GUARINO. *Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter?* *Ecological Engineering*. 2018, 115, 15-26. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.01.006. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857418300065>
- [8] ELZEIN, Z., A. ABDYOU a I. Abd ELGAWAD. *Constructed Wetlands as a Sustainable Wastewater Treatment Method in Communities*. *Procedia Environmental Sciences*. 2016, 34, 605-617. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.053. ISSN 18780296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029616300755>
- [9] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. Přepady. In: *Hydraulika.fsv* [online]. Praha: ČVUT FSv, 2017 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf
- [10] Hodnocení analytických výsledků. *Katedra analytické chemie* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/ucebnice/hodnoceni2.htm>
- [11] HUANG, Zhaohua. *Fate And Transport Of Surfactants In Greywater When Applied to Soil*. Fort Collins, Colorado, 2013. Diplomová práce. Colorado State University. Vedoucí práce Sybil Sharvelle.
- [12] CHOWDHURY, Rezaul a Jameelu S. ABAYA. *An Experimental Study of Greywater Irrigated Green Roof Systems in an Arid Climate*. *Journal of Water Management Modeling*. 2018. DOI: 10.14796/JWMM.C437. ISSN 22926062. Dostupné také z: <https://www.chijournal.org/C437>
- [13] JELÍNKOVÁ, V., M. DOHNAL a T. PICEK. *A green roof segment for monitoring the hydrological and thermal behaviour of anthropogenic soil systems*. *Soil and Water Research*. 2016, 10(4), 262-270. DOI: 10.17221/17/2015-SWR. ISSN 18015395.

Seznam zdrojů

- [14] KIVAISI, Amelia K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*. 2001, 16(4), 545-560. DOI: 10.1016/S0925-8574(00)00113-0. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857400001130>
- [15] KOZÁK, Josef, Jan NĚMEČEK, Svatopluk MATULA, Miloš VALL a Luboš BORŮVKA. *Pedologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-0907-4.
- [16] KOŽEŠNÍK ET AL., Encyklopedický institut ČSAV. *Ilustrovaný encyklopedický slovník*. Praha: Academia, 1982. ISBN 505-21-856. S. 957.
- [17] KRO Michal, 2019. *Rozhovor o plastové nádrži, je profesionálem v oboru záměrných a svářčských prací*. Praha 6. 10.
- [18] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie. Dot. 1. vyd.* Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-010-0956-4.
- [19] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie 10. Vyd. 2. přeprac.* Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02237-4.
- [20] LI, Fangyue, Knut WICHMANN a Ralf OTTERPOHL. *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. Science of The Total Environment*. 2009, 407(11), 3439-3449. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.02.004. ISSN 00489697. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969709001594>
- [21] LURA, Pietro. Internal water curing with Liapor aggregates. *HERON*. 2005, 50(1), 20. ISSN 1574-4078.
- [22] MINKE, Gernot. *Zelené střechy*. Ostrava: HEL, 2001. 92 s. ISBN 80-86167-17-8.
- [23] POLLERT, Jaroslav. *Decentralizovaný systém Domovní ČOV [přednáška]*. Praha: Fakulta stavební ČVUT, 11. 12. 2018.
- [24] Povrchově aktivní látky. *Masarykova Univerzita* [online]. Brno: Masarykova Univerzita, 2014 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1411/podzim2014/BLKLC011p/um/Povrchove_aktivni_latky.pdf
- [25] PRADHAN, Snigdhendubala, Sami G. AL-GHAMDI a Hamish R. MACKEY. *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. Science of The Total Environment*. 2019, 652, 330-344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.226. ISSN 00489697. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718341226>
- [26] PRODANOVIC, Veljko, Kefeng ZHANG, Belinda HATT, David MCCARTHY a Ana DELETIC. *Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse. Building and Environment*. 2018, 131, 99-107. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.015. ISSN 03601323. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318300210>
- [27] OH, Kai Siang, Janet Yip Cheng LEONG, Phaik Eong POH, Meng Nan CHONG a Ee Von LAU. *A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia. Journal of Cleaner Production*. 2018, 171, 17-29. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.267. ISSN 09596526. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617322710>
- [28] OULDBOUKHITINE, Salah-Eddine, Graig SPOLEK a Rafik BELARBI. *Impact of plants transpiration, grey and clean water irrigation on the thermal resistance of green roofs. Ecological Engineering*. 2014, 67, 60-66. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.052. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857414001128>
- [29] SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN THE LAB [online]. München: METER Group, Inc. USA, 2017a [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/hyprop-2/>

- [30] SOIL MOISTURE RELEASE CURVES [online]. München: METER Group, Inc. USA, 2017b [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/hyprop-2/>
- [31] SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací : měsíčník. 2012, 21(2). ISSN 1210-3039.
- [32] STOTTMEISTER, U., A. WIEßNER, P. KUSCHK, U. KAPPELMEYER, M. KÄSTNER, O. BEDERSKI, R.A. MÜLLER a H. MOORMANN. *Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. Biotechnology Advances*. 2003, 22(1-2), 93-117. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2003.08.010. ISSN 07349750. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975003001319>
- [33] ŠIMEČKOVÁ, Jana a Irena VEČEŘOVÁ, ed. *Zelené střechy - naděje pro budoucnost*. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně, 2010. ISBN 978-80-254-9123-2.
- [34] ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA, H. SAITO, M. SAKAI a M. Th. VAN GENUCHTEN. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. [online]. PCProgress, 2008 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: http://www.pcprogress.com/Downloads/Pgm_Hydrus1D/HYDRUS1_4.pdf
- [35] VAN GENUCHTEN, M. Th. *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. Soil Science Society of America Journal* [online]. 1980, 44(5) [cit. 2019-12-19]. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x. ISSN 0361-5995. Dostupné z: <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/44/5/SS0440050892>
- [36] VINTER, Vladimír. *Rostliny pod mikroskopem; základy anatomie cévnatých rostlin. 2. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-1972-5.
- [37] VOGEL, T., M.Th. VAN GENUCHTEN a M. CISLEROVA. *Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. Advances in Water Resources* [online]. 2000, 24(2), 133-144 [cit. 2019-12-19]. DOI: 10.1016/S0309-1708(00)00037-3. ISSN 03091708. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170800000373>
- [38] VYMAZAL, Jan. *The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. Ecological Engineering*. 2002, 18(5), 633-646. DOI: 10.1016/S0925-8574(02)00025-3. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857402000253>
- [39] VYMAZAL, Jan. *Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment: 10 years experience. Ecological Engineering*. 2005, 25(5), 478-490. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2005.07.010. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857405001588>
- [40] VYMAZAL, Jan. *Constructed wetlands for wastewater treatment. Ecological Engineering*. 2010, 25(5), 475-477. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2005.07.002. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857405001473>
- [41] WINWARD, Gideon P., Lisa M. AVERY, Ronnie FRAZER-WILLIAMS, Marc PIDOU, Paul JEFFREY, Tom STEPHENSON a Bruce JEFFERSON. *A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. Ecological Engineering*. 2008, 32(2), 187-197. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.11.001. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092585740700211X>

Obrázky

- [1] AVERY, Lisa M., Ronnie A.D. FRAZER-WILLIAMS, Gideon WINWARD, Chris SHIRLEY-SMITH, Shuming LIU, Fayyaz A. MEMON a Bruce JEFFERSON. *Constructed wetlands for grey water treatment*. 2007, 7(3-4), 191-200. DOI: 10.1016/S1642-3593(07)70101-5. ISSN 16423593. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1642359307701015>

Seznam zdrojů

-
- [2] BATES, Adam J., Jon P. SADLER, Richard B. GRESWELL a Rae MACKAY. *Effects of varying organic matter content on the development of green roof vegetation: A six year experiment. Ecological Engineering*. 2015, 82, 301-310. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.102. ISSN 09258574. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857415300082>
- [3] CHOWDHURY, Rezaul a Jameelu S. ABAYA. *An Experimental Study of Greywater Irrigated Green Roof Systems in an Arid Climate. Journal of Water Management Modeling*. 2018. DOI: 10.14796/JWMM.C437. ISSN 22926062. Dostupné také z: <https://www.chijournal.org/C437>
- [4] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. Přepady. In: *Hydraulika.fsv* [online]. Praha: ČVUT FSv, 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf
- [5] METER-HYPROP. In: Meter Group [online]. München: METER Group, Inc. USA, 2017 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/app/uploads/2016/10/METER-HYPROP-3-1600x633.jpg>
- [6] PRADHAN, Snigdhendubala, Sami G. AL-GHAMDI a Hamish R. MACKEY. *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. Science of The Total Environment*. 2019, 652, 330-344. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.226. ISSN 00489697. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896971834122>

Seznam příloh

- Příloha 1 – první verze modelu
- Příloha 2 – nádrž první verze modelu
- Příloha 3 – podstavec modelu
- Příloha 4 – dílenská dokumentace modelu M 1:10
- Příloha 5 – výkres celého modelu M 1:10
- Příloha 6 – CD s výpočty a měřenými daty