

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Fyzikální a hydraulické vlastnosti technogenní půdy pro dešťové zahrady

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D.

Praha, 2018

Bc. Petra Hečková



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hečková	Jméno: Petra	Osobní číslo: 409818
Zadávající katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Fyzikální a hydraulické charakteristiky technogenní půdy pro dešťové zahrady	
Název diplomové práce anglicky: Physical and hydraulic properties of technogenic soil for rain garden construction	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši odborné literatury na téma zasakovacích průlehlů a dešťových zahrad se zaměřením na jejich vodní režim a infiltraci srážkové vody. V pilotní studii provedené na malém zkušebním poli zjistíte změny hydraulických charakteristik půdy určené pro dešťovou zahradu v prvních měsících po osázení rostlinami. Na vzorcích půdy odebrané těsně po nasypání zeminy a po zakořenění rostlin proveďte infiltrační experimenty a vyhodnoťte změnu infiltrační schopnosti v důsledku rozvoje vegetace. Vyhodnoťte časovou změnu půdní struktury v prvních měsících po osázení zeminy rostlinami a vyhodnoťte vliv změny půdní struktury na infiltraci vody. Výsledky diskutujte a doporučte skladbu rostlin pro osázení zasakovacího průlehu typu dešťová zahrada.	
Seznam doporučené literatury: 1) Články v časopisech indexovaných v databázích WOS a SCOPUS. 2) TNV 75 9011, Hospodaření se srážkovými vodami	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 27.7.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá posouzením změny půdní struktury a hydraulických charakteristik člověkem vytvořených půd používaných v zasakovacích zařízeních typu dešťová zahrada. Dešťové zahrady se nedávno staly populární jako prostředek pro nakládání se srážkovými vodami. Tento prvek zelené infrastruktury využívá proces filtrace vody přes půdu a kořenovou zónu k čištění a zadržování vody.

Cílem práce bylo posoudit vývoj půdní struktury a hydraulických charakteristik vzorků odebraných na pilotních plochách simulujících dešťové zahrady. Na těchto plochách byly vysazeny rostliny vybrané s ohledem na podmínky přítomné v dešťových zahradách. Byla sledována jejich vhodnost a na základě analýzy výsledků byl vytvořen osevní plán pro experimentální dešťovou zahradu.

V pilotních plochách byla použita 30 cm silná půdní vrstva. Filtrační vrstva se skládá z 50 % písku, 30 % kompostu a 20 % ornice. O tomto složení bylo rozhodnuto na základě laboratorních měření. Povrch byl pokryt mulčovací vrstvou šterku o tloušťce 5 cm a osázen trvalkami, určenými do dešťové zahrady. V první ploše byla zasázena *Molinia caerulea* a *Hemerocallis Lemon Bells*, zatímco druhá byla osázena *Euphorbia amygdaloides* a *Aster novae-angliae Purple dome*. Pilotní plochy byly zavlažovány jednou týdně, aby bylo dosaženo ekvivalentního množství srážky desetkrát většího než přirozený déšť. Půdní vzorky o objemu přibližně 33 cm³ byly odebrány z pilotních ploch po jejich založení a poté o dva měsíce později. Na vzorcích byly provedeny infiltrační experimenty za použití souběžného bimodálního rentgenového a neutronového snímkování.

Bylo zjištěno, že vzorky odebrané po dvou měsících obsahují velké makropóry. Důsledkem je snížená schopnost retence vody, tyto půdy dokáží zadržet pouze 5 cm³ vody, na rozdíl od vzorků z prvního odběru, které dokázaly zadržet přibližně 10 cm³. Jednoznačná identifikace kořenů nebyla prokazatelná, což může být způsobeno rozlišením snímků. Celkově byly zkoumané rostliny vyhodnoceny jako vhodné pro projekt dešťové zahrady, největšího růstu bylo dosaženo u *Aster novae-angliae*.

Práce je základem pro založení dvou experimentálních dešťových zahrad, které již byly postaveny v areálu UCEEB. Pro tyto plochy byl vytvořen osevní plán. Je plánováno dlouhodobé pozorování vývoje půdní struktury a vodního režimu těchto dešťových zahrad.

Klíčová slova

Dešťová zahrada, hospodaření s dešťovou vodou, nedestruktivní metody snímkování

Abstract

This diploma thesis deals with the assessment of changes in soil structure and hydraulic characteristics of man-made soils used in rainfall garden facilities. Rain gardens have recently become popular as a mean of stormwater management in urbanized areas. Rain garden uses a natural process of water filtration through soil and rhizosphere to clean and retain water.

The aim of the thesis was to evaluate the development of soil structure and hydraulic characteristics of samples taken on pilot areas simulating rain gardens. Selected plants were planted on pilot areas suitable to be grown in rain gardens looking for their applicability in the project. Based on the analyses of results a seed garden plan for the experimental rain garden was created.

For the pilot plots 30 cm thick soil layer was used. Filter layer consists of 50% sand, 30% compost and 20% of topsoil. This composition is based on the results of laboratory measurements. The surface was mulched with 5 cm layer of gravel and planted by perennials specifically suitable for rain gardens. The first plot was planted with *Molinia caerulea* and *Hemerocallis Lemon Bells*, while the second plot was planted with *Euphorbia amygdaloides* and *Aster novae-angliae* Purple Dome. Pilot plots were irrigated weekly to achieve an equivalent rainfall amount that is 10 times higher than the amount of natural rainfall. Soil samples of approximately 33 cubic centimeters were taken from pilot plots after foundation and then two months later. Infiltration experiments were performed on the samples simultaneously with parallel bimodal X-ray and neutron imaging.

It was found that samples taken after two months contained large macropores. This leads to the fact that only 5 cm³ of water can be retained by these soils, unlike the first taken samples that were able to hold about 10 cm³. The root system development was not uniquely identified due to image resolution. The plants were evaluated to be suitable for this rain garden project, the largest growth was achieved with *Aster novae-angliae*.

This work is the basis for the establishment of two experimental rain gardens that were already built in the UCEEB area. A seed plan has been created for these areas. A long-term observation of the development of the soil structure and water regime of these rain gardens is proposed.

Keywords

Rain garden, Stormwater management, Non-destructive imaging methods

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s pomocí odborných rad a vedení doc. Ing. Michala Sněhoty, Ph.D. Dále pomocí uvedených pramenů a odborné literatury.

V Praze, dne.....

podpis.....

Petra Hečková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Michalovi Sněhotovi Ph.D., za odbornou pomoc, spoustu cenných rad a ochotu mi kdykoliv věnovat svůj čas. Dále za jeho skvělé vedení po celou dobu mého výzkumu a získání mnoha nových příležitostí a zkušeností. Velké poděkování patří také studentovi doktorského studia Ing. Tomášovi Princovi, za jeho rady a ochotu mi být kdykoliv nápomocen.

Experimenty neutronového a rentgenového snímkovány byly provedeny ve Švýcarsku v Paul Scherrer Institute, na stanovišti ICON. Ráda bych poděkovala celému výzkumnému týmu, který tvořili: Dr. Anders Kaestner, doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D., Ing. Jan Šácha a Bc. Jitka Hanzlíková.

Tento výzkum byl podpořen projektem GAČR č. GA17-21011S: Transport vody, nerozpuštěných látek a tepla v člověkem vytvořených půdách městské zelené infrastruktury; a projektem SGS16/143/OHK1/2T/11.

Zejména bych chtěla poděkovat své rodině, která mi umožnila studium na této škole, a podporovala mě vždy za všech okolností.

1. ÚVOD	10
2. REŠERŠE LITERATURY	12
3. HOSPODAŘENÍ S DEŠŤOVOU VODOU (HDV)	17
3.1 Vodní režim a jeho změny vlivem urbanizace	18
3.1.1 Narušení hydrologického režimu	18
3.1.2 Změna kvality povrchového odtoku.....	19
3.2 Legislativa	19
3.2.1 Norma TNV 75 9011.....	20
3.2.2 Technická řešení zasakovacích prvků.....	20
4. DEŠŤOVÁ ZAHRAHA	23
4.1 Funkce dešťových zahrad	24
4.2 Návrh dešťové zahrady.....	25
4.2.1 Přítok vody	26
4.2.2 Hloubka zatopení	26
4.2.3 Mulčovací vrstva	26
4.2.4 Vegetace.....	26
4.2.5 Půdní směs	27
4.3 Návrh a dimenzování objektu HDV	28
4.3.1 Vstupní parametry	28
4.3.2 Stanovení retenčního objemu průlehu	29
4.3.3 Stanovení rozměrů podzemní rýhy	30
4.3.4 Kontrola správnosti navržených parametrů	31
4.4 Dešťové zahrady v areálu UCEED.....	32
5. METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY STANOVIŠTĚ	34
5.1.1 Meteostanice	34

5.1.2	Metodika a přístroje.....	34
5.2	Vyhodnocení meteorologických podmínek stanoviště	35
5.2.1	Srážky	35
5.2.2	Relativní vlhkost a teplota.....	36
5.2.3	Větná růžice	37
5.2.4	Průměrná teplota.....	37
6.	PILOTNÍ PLOCHY DEŠŤOVÉ ZAHRADY	38
6.1	Filtrační vrstva	38
6.2	Hydraulické charakteristiky materiálů.....	40
6.2.1	Retenční schopnost půd.....	40
6.2.2	Měření bodů retenční čáry	41
6.3	Hydraulická vodivost	44
6.3.1	Preferenční proudění	45
6.3.2	Měření hydraulické vodivosti.....	46
6.4	Stanovení čáry zrnitosti	47
6.5	Stanovení pH a konduktivity výluhu.....	49
6.6	Vegetace pilotních ploch	50
6.7	Založení pilotních ploch.....	50
6.8	Zavlažování	52
6.9	Infiltrační experiment na vzorcích z pilotních ploch	53
6.9.1	Odběr vzorků.....	54
6.9.2	Příprava vzorků	54
6.9.3	Popis experimentu	55
7.	SLEDOVÁNÍ CHARAKTERU PROUDĚNÍ VODY V MATERIÁLECH DEŠŤOVÉ ZAHRADY	56
7.1	Snímkování na pracovišti ICON	57
7.2	Zpracování snímků.....	58

7.2.1	Určení množství vody ve vzorku	59
7.2.2	Práce s programem MuhRec.....	61
7.3	Výsledky infiltračních experimentů.....	63
7.4	Struktura vzorků.....	69
8.	VYHODNOCENÍ PILOTNÍCH PLOCH	71
8.1.1	Výběr materiálů na základě hydraulických charakteristik	71
8.1.2	Vývoj vegetace testovacích ploch	71
8.1.3	Návrh osázení průlehů	73
9.	DISKUZE	75
10.	ZÁVĚR	76
11.	POUŽITÉ ZDROJE	77
11.1	Články	77
11.2	Skripta, knihy	78
11.3	Osobní konzultace	79
11.4	Normy, manuály	79
11.5	Webové stránky.....	79
11.6	Software	80

1. ÚVOD

Dešťové zahrady, které dnes bývají vytvořeny člověkem za účelem zlepšování mikroklimatu v urbanizovaných oblastech, nejsou ve skutečnosti v přirozeném prostředí nic neobvyklého a vyskytují se v našem okolí už dlouhou řadu let. První dešťové zahrady vytvořila sama příroda jako původní ekosystémy. V původních lesích, loukách a mokřadech se voda přirozeně filtrovala pomocí půdy, kořenů rostlin i rostlinami samotnými. Na tomto jednoduchém principu jsou dnes založeny uměle vytvořené dešťové zahrady, které se stávají ve světě čím dál populárnější. Poprvé se objevily ve státě Maryland v USA roku 1990, od té doby se jejich počet neustále zvyšuje (Kravčík, 2010).

V dnešní době vysoké míry urbanizace a velkého množství zpevněných ploch dochází k vysokému povrchovému odtoku. Voda je co nejrychleji odváděna do kanalizace, která nebývá dostatečně kapacitní, proto odtéká po povrchu. Voda nemůže skrz betonovou plochu infiltrovat ani se vypařovat, čímž je narušen přirozený koloběh vody v přírodě. Dalším negativním ovlivněním jsou jevy nazývané tepelné ostrovy, kdy je ve městech vyšší teplota než v okolí (Yu et al., 2018). Tyto negativní dopady je možné snížit správným hospodařením s dešťovou vodou a začleněním prvků zelené a modré infrastruktury do měst, jedná se např. o dešťové zahrady, které jsou hlavním tématem této diplomové práce.

V první části se tato práce zabývá výběrem vhodného materiálu filtrační vrstvy a výběrem rostlin pro zkušební projekt dešťových zahrad. Filtrační vrstvy jsou často uměle vytvořeny kombinací přírodních materiálů. Pro správné fungování musí dešťová zahrada splňovat dané podmínky, týkající se filtrační vrstvy i rostlin. Splnění těchto podmínek bylo ověřeno měřeními hydraulických charakteristik půdní vrstvy v laboratoři a pečlivým výběrem rostlin. Před projektem finálních dešťových zahrad byly testovány vybrané prvky na menších pilotních plochách.

Dalším cílem práce bylo zjistit, jak probíhá vývoj půdní struktury filtrační vrstvy. Důležitým prvkem zelené infrastruktury je totiž vegetace, která není inertním prvkem. Působením kořenů rostlin dochází k vývoji kořenové zóny v průběhu času, což má vliv na změnu půdní struktury, která se tak může v průběhu času měnit. V práci byly porovnávány vzorky, které reprezentovaly stav před rozvojem vegetace a stav po 2 měsících růstu rostlin. Na půdních vzorcích byly provedeny infiltrační experimenty a pro vizuální zachycení proudění vody byly použity nedestruktivní metody snímání rentgenovými a neutronovými paprsky. Z rekonstruovaných neutronových snímků je možné získat informaci o distribuci vody a jejím

výskytu. Rekonstrukce rentgenových snímků naopak zachycuje převážně půdní strukturu. Snímkování proběhlo ve Švýcarsku v institutu Paul Scherrer Institut u Villigenu na stanovišti ICON, které od roku 2015 specializuje na bimodální snímkování chladnými neutrony.

Jedná se o projekt, který by měl zohlednit dlouhodobé měřítko. Touto diplomovou prací byly vytvořeny základy, které nejsou konečným výsledkem celkové studie. Pro získání výsledků, které budou statisticky významné bude nutno pokračovat v odebrání vzorku a měření jejich charakteristik, a monitorování nově vytvořené dešťové zahrady na UCEEBU.

2. REŠERŠE LITERATURY

První část diplomové práce byla zpracována jako rešerše odborné literatury se zaměřením na téma zasakovacích průlehů a dešťových zahrad, jejich vodní režim a infiltrace srážkové vody.

Qin et al. (2013) provedli studii prvků Low impact development (LID) na urbanizovaném povodí v Číně. Byly zde testovány účinky tří technik LID, které mají zabránit městským povodním. Mezi posuzovanými prvky byly: vsakovací průleh, propustný chodník a zelená střecha. Všechna tři opatření se při více intenzivních a přívalových deštích prokázala jako účinnější než kanalizační systém. Jejich účinnost se liší podle polohy maximální intenzity deště. Při správném navrnutí a kombinaci jsou LID prvky vhodné pro městskou protipovodňovou ochranu.

Bioretence a dešťové zahrady se staly jedním z nejčastějších nástrojů pro nakládání s dešťovou vodou v urbanizovaném území, procesy zahrnují jak filtraci, tak infiltraci. Davis et al. (2009) prokazují, že tento systém podstatně snižuje objemy odtoků a špičkové průtoky. Další výzkum dokázal usazování pevných látek, živin, uhlovodíků a těžkých kovů v místě infiltrace. Bioretенční systémy tak můžou účinně snížit i další znečišťující látky, jako jsou patogenní bakterie a tepelné znečištění.

Boller (1997) se ve své studii zabývá přítomností těžkých kovů v městských odtocích. Byla zjišťována přítomnost kadmia, mědi, olova a zinku v odpadních vodách z domácností. Zjistilo se, že odtoky ze zpevněných ploch přispívají 50-80 % k celkovému odtoku. Při kombinovaném kanalizačním systému se tyto kovy hromadí v kalech, které se nadále používají v zemědělství a dostávají se tak do půdy. Pokud by byly použity přirozené infiltrační systémy, je možné tomuto znečištění předejít. Těžké kovy se usazují a hromadí v místech infiltrace.

Další vlastností bioretенčních nádrží je nejen zlepšení kvality povrchového odtoku dešťové vody, ale také jejich prokazatelný dopad na snížení objemu odtoku a času koncentrace. Jako filtrační a bioretенční prostředí zvolil Austin (2012) směs písčité jílovité půdy (54 % písku, 26 % kalu, 20 % jílu) a 12,2 % organické hmoty. Toto složení dokázalo odstranit většinu znečišťujících látek.

Cílem studie, kterou prováděli Xiao and McPherson (2011) bylo zhodnotit schopnost zasakovacího průlehu snížit povrchové odtoky, zatížení znečišťujícími látkami a podpořit růst

stromů. Porovnávána byla dvě místa, v obou případech se jednalo o parkoviště, na jednom z nich byl vytvořen zasakovací průleh a na obou stanovištích byl zasazen strom. Pozorovací období trvalo od února 2007 do října 2008, za tu dobu došlo k 50 srážkovým událostem a spadlo 563,8 mm srážek. Zasakovací průleh snížil povrchový odtok o 88,8 % a celkový obsah znečištěných látek o 95,5 % a byly prokázány lepší podmínky pro růst stromu.

Dešťové zahrady se stávají stále oblíbenější technologií pro úpravu dešťové vody. Infiltrace však může být časem snížena v důsledku ucpání a usazování sedimentů na povrchu. Experimenty byly provedeny na místech, které zahrnovaly jak vegetační, tak i nevegetační oblasti. Na základě experimentů bylo vyhodnoceno, že rostliny zvyšují míru infiltrace a zvyšují propustnost půdy. To naznačuje, že kolem kořenů rostlin se vytváří preferenční cesty. Virahsawmy et al. (2014) zjistili, že infiltrace kolem rostlin je nejméně o 50 mm/h vyšší.

Další studie Muthanna et al. (2007) řeší účinnost bioretenčních systémů při odstraňování znečištěných látek, které se hromadí ve sněhových pokrývkách. Došlo k zachycení k 89 až 99 % zinku, mědi, olova a kadmia a pokles odtoku v rozmezí 81-99 %. Ve svrchní mulčovací vrstvě bylo usazeno až 74 % zinku. Množství kovů zadržené kořeny rostlin se ukázalo být 2-8 %.

Výsledky této studie dokázaly, že lze zachovat funkce dešťových zahrad, a přitom dosáhnout užitku. Richards et al. (2015) zkoumali využití dešťových zahrad nejen ke snížení povrchového odtoku, ale také k pěstování zeleniny. Celkem byly vytvořeny dvě zahrádky o rozměrech 2,2×1,5×0,8 m. Voda byla přiváděna ze střechy přilehlé budovy o ploše 133 m². Jedna zahrádka, byla lemována PVC pláštěm, aby se zabránilo vsakování vody do podloží. Tento typ snížil povrchový odtok o 34 až 63 % a nebylo třeba v suchých obdobích zavlažovat. Druhý typ byl navržen tak, aby přirozeně podporoval infiltraci. Množství odtoku tak bylo sníženo o více než 90 %, zde však bylo nutné doplňkové zavlažování v suchých obdobích.

Reddy et al. (2014) ve svém výzkumu hodnotili potencionální využití biocharu jako filtračního media a jeho schopnost odstranění smíšených kontaminantů z odtoku dešťových vod. Biochar je pevná látka obohacená o uhlík a je vyrobena zplyňováním biomasy, v tomto případě byly zvoleny dřevěné peletky. Výsledky ukázaly, že tento filtr snížil TSS (množství celkové nerozpuštěné látky) o 86 % a koncentraci dusičnanů a fosfátů o 86 a 47 %. Dále byla snížena koncentrace Cd, Cr, Pb, Ni a Zn o 18, 19, 65, 75, 17 a 24 %. Úspěšně byl odstraněn fenanthren a naftalen až na 76 %. Biochar byl prokázán jako účinné filtrační medium.

Studie Kazemi et al. (2011) se zaměřila na bioretenční průlehy a zelené plochy z hlediska

poskytnutí útočiště pro živočišné druhy. Byla porovnáována biologická rozmanitost devíti bioretenčních průlehů a trávnickových zelených v ploch v Melbourne. V porovnání s trávnickovými plochami se u bioretenčních systémů se objevoval vyšší počet druhů a vyšší druhová rozmanitost.

Silniční odvodňovací příkopy se stávají čím dál populárnější, snižují a filtrují odtok vody a zachytávají pevné látky na povrchu. Ahmed et al. (2015) provedli 722 infiltračních měření v několika různých příkopech. Předpoklad byl, že infiltrace se zvyšuje vlivem kořenů rostlin. Hodnoty hydraulické vodivosti na svazích příkopů byly odlišné od hodnot na dně příkopů. To by mohlo být způsobeno sedimentací a ucpáním pórů na dně příkopů, ale také růstem vegetace na bočních svazích, a následným vytvářením makropórů. V práci je zmíněn článek Bevena a Germana (1982), kteří prokázali, že pouhým zvýšením prostoru makropórů o 0,002 % se zvýší infiltrace o 65 %.

Vlivem vzrůstající urbanizace dochází ke zvýšení teploty ve městech a vznikají tak tepelné ostrovy. Rahman et al. (2011) v této studii dokázali, že stromy, které jsou pěstovány v půdě, rostou téměř dvakrát rychleji než stromy rostoucí v chodnicích. Mají také lepší fyziologický výkon (stomatální vodivost, potenciál listové plochy a stav listů). Stromy také naznačovaly vyšší míru infiltrace a větší kořenovou vlhkost. Poskytují tak ochlazování ovzduší a zmírnění tepelných ostrovů vlivem evapotranspirace až 7 kW, což je pětikrát více než u stromů pěstovaných v chodnicích.

Bresson et al. (2001) studovali půdy severní pařížské pánve náchylné k degradaci povrchové struktury vedoucí k erozi, záplavám a znečištění. Do prachovité půdy byl vpraven kompost, vzniklý z biologicky rozložitelného komunálního odpadu. Plochy byly vystaveny srážkám 19 mm/h s dobou trvání 60 min. Došlo se k závěru, že aplikace kompostu zpomalila tvorbu půdního škraloupu a zabránila erozním procesům na rozdíl od půdy bez kompostu. Výsledkem byl i zpožděný povrchový odtok. Ve vysoce nestabilní půdě aplikace kompostu byla účinná proti degradaci povrchové struktury půdy a erozi. Koncentrace sedimentu v počátečním odtoku byla snížena z 36,4 na 11 g/l.

Al-Widyan et al. (2005) v Jordánsku zkoumali použití odpadu z lisování olivového oleje jako kompostového materiálu a jeho vliv na fyzikální vlastnosti půdy. Byly testovány dva typy půd jílovitá (S1) a hlinitá (S2) a přidání kompostu ve 2, 4 a 8 % hmotnosti směsi. Ve srovnání s kontrolní půdou bylo prokázáno výrazné zlepšení fyzikálních vlastností obou půd, zejména retenční a infiltrační. Při aplikování kompostu v množství 8 % hmotnosti směsi došlo ke

zlepšení retenční schopnosti půdy S1 o 16,5 % a půdy S2 o 10,3 %.

Další studie se zaměřuje na opatření proti neustále rostoucí urbanizaci a přibývání zpevněných ploch ve městech. Olson et al. (2013) zkoumá jednotlivé přísady a přidavku kompostu pro zlepšení infiltrace půdy v městském prostředí. Ošetření půdy bylo provedeno ve třech místech metropole. Každé místo bylo rozděleno na tři pozemky (obdělávané, obdělávané s přidavkem kompostu a kontrolní). Účinnost infiltrace byla zkoumána na vzorcích před a po ošetření, měřením hydraulické vodivosti. Místo s přidavkem kompostu lépe infiltrovalo srážkovou vodu a byl pozorován nižší povrchový odtok než u pozemku bez přidaného kompostu.

Další studií ukazující zlepšení infiltračních schopností půdy přidáním kompostového materiálu se zabývali Zeytin and Baran (2003). Prováděli pokusy v suché oblasti Turecka na jílovitohlinité a písčitohlinité půdě. Do půd aplikovali slupky lískových ořechů v množství 0, 1, 2, 4 a 8 % ve velikostech zrna menších než 0,84 mm, 0,84 - 2,38 mm a větších než 2,38 mm. Došlo ke zlepšení stability půdních agregátů ve vodě a zvýšení hydraulické vodivosti a pórovitosti. Největší zlepšení celkové pórovitosti a hydraulické vodivosti bylo dosaženo při aplikaci frakce o velikosti menší než 0,84 do jílovitohlinité půdy, z 62,5 % na 82,2 %.

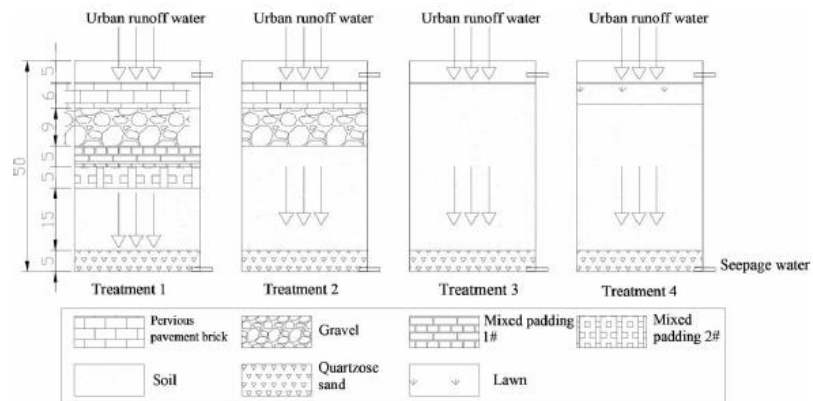
Tato studie se zabývá vhodným složením filtračního média bioretenčních ploch v městském prostředí. Thompson et al. (2008) zjistili, že dodáním kompostu do půdy se zlepšují fyzikální vlastnosti. Bylo hodnoceno 11 lokalit, jejichž půdní směsi se pohybovaly v objemových poměrech písku (30 - 70 %), písčité nebo prachové půdy (0 - 20 %) a organický kompost (20 až 70 %). Hodnota infiltrace na všech lokalitách se pohybovala od 87 do 178 cm/h. Bylo zjištěno, že infiltrační schopnost půdy se lineárně zvyšovala dodáním směsi kompostu a písku nebo kompostu oproti půdě písčitohlinité nebo hlinitopísčité bez dodaného kompostu.

Tahvonen (2018) provedl studii bioretenčních ploch ve Finsku, spočívala ve vhodném výběru půdního média dešťové zahrady. Byly testovány dvě filtrační vrstvy, písčité a půdní mix složený z písku, ornice a kompostu. Písčité vrstva umožnila efektivní zadržení vody během prvního roku, ale nepodařilo se zajistit růst rostlin. Půdní mix lépe podpořil růst vegetace. Obě experimentální plochy vykazovaly činnost v zimě i při jarním tání sněhu.

Ouattara et al. (2007) předpokládali hypotézu, že snížení frekvence orby z roční na dvouletou orbu a použití kompostu by lépe podpořilo její infiltrační schopnosti. Tyto účinky byly hodnoceny na dvou typech půdy Luvisolu a Lixisolu. Tento výzkum opět potvrdil

hypotézu, že přidáním kompostu do půdy se zlepšují její hydraulické vlastnosti, tedy i infiltrace.

Hou et al. (2013) v této studii navrhovali vícevrstvé infiltrační systémy a prováděli testování jejich účinnosti při odstraňování znečišťujících látek. Na obrázku 1 jsou uvedeny 4 experimentální sloupce s popsaným složením vrstev. Vícevrstvé infiltrační systémy účinně odstraňovaly většinu znečišťujících látek, a to včetně organických.



Obrázek 1: Testované vícevrstvé infiltrační systémy

Účinky odstraňování znečišťujících látek způsoby 2,3 a 4, které jsou běžnými formami vícevrstvých systémů, byly očekávány. V případě sloupce 1 byly předpokládány lepší účinky, než byly naměřeny, což mohla zavinit nedostatečná hloubka půdního mixu.

3. HOSPODAŘENÍ S DEŠŤOVOU VODOU (HDV)

V dnešní době rostoucí míry urbanizace je voda vnímána jako problém. Nejčastějším způsobem odvádění vody je konvenční odvodnění, kterým je buď kanalizace nebo vodní tok. Voda je tak co nejrychleji odváděna z povrchu do stokové sítě a nemá šanci se přirozeně zasáknout nebo odpařit (Vítek et al., 2015).

Nejčastější způsoby likvidace dešťové vody dle publikace Vítko et al. (2015):

1. Odvod vody kanalizací
2. Akumulace a regulovaný odtok
3. Akumulace pro další využití
4. Vsakování
5. Odpařování z volné hladiny
6. Odpařování z vegetace.

V minulosti při návrhu stokových sítí nebylo počítáno s tak vysokou mírou urbanizace, jakou můžeme pozorovat v současné době. Proto se dnes klasické způsoby pro odvodnění ukazují jako neudržitelné. Je třeba najít jinou cestu pro odvádění vody z povrchu. Základními technickými opatřeními hospodaření s dešťovou vodou jsou objekty a zařízení HDV. Zařízení HDV podporují výpar, vsakování a pomalý odtok srážkových vod. Technická zařízení podporující vsakování a retenci jsou uvedeny v normě TNV 75 9011 (2013).

Konvenční odvodnění není do budoucna řešením pro odvod srážkové vody. Neodstraňuje příčinu problému, pouze dopad přesune jinam. Při současném stavu urbanizace nedostatečně chrání zdraví a majetek obyvatel a dochází ke zbytečnému znečištění vodních toků. Hospodaření s dešťovou vodou je způsob odvodnění, kdy se snažíme o obnovení přirozeného hydrologického režimu v povodí a v urbanizovaných územích. Toho je možné docílit používáním decentrálních objektů pro zadržování dešťové vody, které podporují výpar, vsakování a filtraci srážkové vody.

Základní pravidla pro hospodaření s dešťovou vodou jsou:

- Redukce a transformace odtoku srážkové vody se děje na pozemku bez rychlého odvedení do stokové sítě
- Oddílná kanalizace pro splaškovou a srážkovou vodu
- Množství odtoku ze zastavěné parcely je stejné jako množství odtoku z přirozeného prostředí pokryté vegetačním krytem

Nejvhodnější řešení je decentrální způsob odvodnění, který řeší problémy, tam kde vznikly. Zmírňuje důsledky vysoké míry urbanizace, změny klimatu, chrání majetek a zdraví obyvatel před záplavami. Srážková voda není považována za problém a není snaha ji co nejrychleji odvést, nýbrž zadržet. V urbanizovaném území se snaží obnovit přirozený koloběh vody v přírodě a splňuje kritéria udržitelného rozvoje města a obcí.

3.1 Vodní režim a jeho změny vlivem urbanizace

Urbanizovaná území jsou specifická vysokým podílem nepropustných ploch, což narušuje přirozený koloběh vody v přírodě. Zpevněných ploch se v městských aglomeracích nachází přibližně 70 % i více. V takto zastavěných místech se vlivem urbanizace vyskytuje efekt tepelného ostrova, který se v krajině projevuje zdatelně vyššími teplotami ve městech než v jeho okolí. Dále dochází ke zhoršení kvality povrchových i podzemních vod. (Vítek et al., 2015)

3.1.1 Narušení hydrologického režimu

Vlivem vysoké míry urbanizace se nemůže dopadající dešťová voda přirozeně infiltrovat do podloží a dotovat podzemní vodu. Ve městech tak vzniká vyšší povrchový odtok než v přirozeném prostředí. Rovněž hodnota evapotranspirace se sníží. Na obrázku 2 lze vidět, jak se změní odtok srážkových vod v přirozeném a urbanizovaném povodí (Stránský et al., 2007).



Obrázek 2: Porovnání odtoku přirozeného a urbanizovaného povodí (Vítek et al., 2015)

V přirozeném povodí s vegetačním krytem se infiltruje až 50 % spadlých srážek a pouze 10 % tvoří povrchový odtok. V městském prostředí činí povrchový odtok až 55 % objemu spadlých srážek. V urbanizovaném území tak dochází i ke snížení evapotranspirace a nedochází k ochlazení klimatu ve městech, což podporuje tvorbu tepelných ostrovů.

V urbanizovaném povodí je většina objemu dešťové vody odváděna po zpevněném povrchu do dešťových vpustí a stokovou sítí pryč. Dochází k podstatnému urychlení povrchového odtoku, což se projevuje sníženou schopností transformace kulminačního průtoku. Důsledkem toho je narušení hydrologického režimu vodního toku, to se projevuje častějším výskytem lokálních povodní. Při přivalových deštích není stoková síť dostatečně kapacitní pro odvedení povrchového odtoku a znečištěná voda je odváděna do recipientu (Stránský et al., 2007).

3.1.2 Změna kvality povrchového odtoku

Na nepropustných plochách se z různých zdrojů a aktivit usazují polutanty. Ty jsou za deště povrchovým odtokem smývány do systému odvodnění, jehož prostřednictvím se transportují do povrchových vod. Výhodou prvků hospodaření s dešťovou vodou je, že se nejprve voda předčistí přes filtrační a mulčovací vrstvu a až poté se vsákne (Stránský et al., 2007).

3.2 Legislativa

Cílem současné legislativy „hospodaření se srážkovou vodou“ v České republice je přechod k decentrálnímu hospodaření s dešťovou vodou a tím zmírnění negativních dopadů výstavby (snížení hladiny podzemní vody, přetížení stokových sítí, vznik povodní atd.).

Hlavním právním předpisem v této oblasti je *Zákon č. 254/2001 Sb. O vodách a změně některých platných zákonů*. Tento zákon stanovuje povinnost pro stavebníky zajistit vsakování nebo zadržování odvádění srážkových vod při zakládání nových staveb, popřípadě změny využití. Mimo pozemek může být tedy odvedena srážková voda vypuštěná z regulovatelných odtoků nebo bezpečnostních přelivů.

Další zákon věnovaný této problematice je *Zákon č. 274/2001 Sb. O vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu*. Ukládá povinnost pro právnické osoby platit za odvádění srážkových vod do jedné kanalizace.

Priority pro nakládání se srážkovými vodami dle Vyhlášky č. 501/2006 Sb. (ve znění Vyhlášky č. 269/2009 Sb.) a Vyhlášky č. 268/2009 Sb. jsou:

1. Vsakování, pokud je to možné.
2. Zadržování a regulované odpouštění oddílnou kanalizací do vodního toku

3. Regulované odpouštění do jednotné kanalizace (Samek, 2013)

ČSN 75 9010 byla vydána v roce 2012, řeší návrh, výstavbu a provoz vsakovacích zařízení, včetně jejich dimenzování. Tato norma však není dostatečně komplexní při řešení nakládání s dešťovými vodami pro větší urbanizované celky a neřeší otázku, co se srážkovou vodou, pokud není možné vsakování. Nedostatky této normy řeší TNV 75 9011 Hospodaření se srážkovými vodami (Vítek et al., 2015).

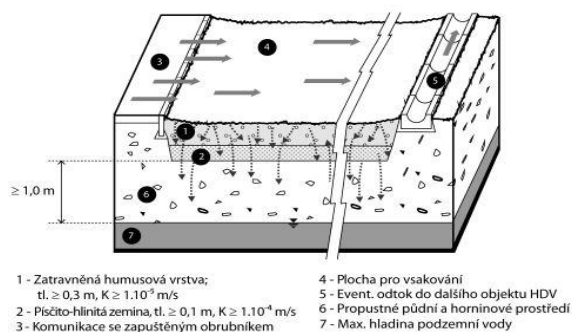
3.2.1 Norma TNV 75 9011

Tato norma Hospodaření se srážkovými vodami řeší nakládání s dešťovou vodou tak, aby byl vytvořen funkční systém odvodnění blízky k přírodě. Řeší zejména odvodnění na pozemku stavby, ale i centrální opatření. Norma obsahuje návod ke správné volbě příjemce srážkových vod a ke správnému technickému řešení pro zajištění co nejmenšího odtoku srážkové vody. Součástí normy jsou výpočetní postupy pro dimenzování objektů sloužící k odvodu dešťové vody (Vítek et al, 2015).

3.2.2 Technická řešení vsakovacích prvků

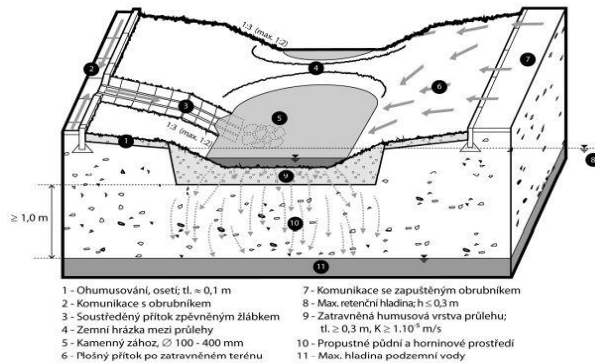
Pokud je to možné, jsou upřednostňována povrchová vsakovací zařízení, která jsou schopna vodu při vsakování filtrovat a zároveň podpořit evapotranspiraci. Pokud vrstva podloží nemá dostatečnou vsakovací schopnost je nutné povrchové vsakování kombinovat se vsakováním s regulovaným odtokem do povrchových vod či jednotné kanalizace. Technické řešení objektů HDV je podrobně popsáno TVN 75 9011 (2013).

U objektů plošného vsakování (obrázek 3) se vstupní plocha navrhuje jako zatravněná plocha obohacená humusem, její tloušťka je minimálně 30 cm. Srážková voda je do plochy přiváděna rovnoměrně s mírným sklonem. Je to vhodně řešení pro odvodnění parkovací plochy nebo liniové stavby.



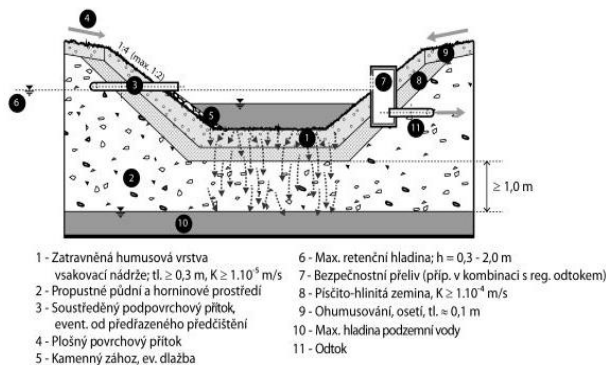
Obrázek 3: Objekt plošného vsakování (TVN 75 9011, 2013)

Vsakovací průleh (na obrázku 4) s površovým přítokem vody je mělké zařízení se zatravněnou humusovou plochou a dochází zde ke krátké retenci vody. Hloubka výtopy by neměla přesáhnout 30 cm. Jsou vhodné k bodovému odvodnění nebo odvodnění liniových staveb. U těchto zasakovacích typů je nutné zvážit předčištění přitékající vody, aby se zvýšila jeho filtrační schopnost.



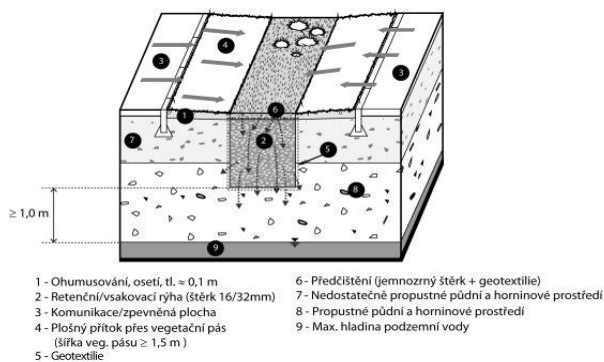
Obrázek 4: Vsakovací průleh s površovým přívodem vody (TVN 75 9011, 2013)

Vsakovací nádrž (obrázek 5) je objektem s výraznou retenční funkcí. Hloubky těchto nádrží se pohybují v rozmezí 0,3 až 2,0 m. Jsou vhodné pro odvodnění všech typů zpevněných povrchů jako jsou střechy, komunikace a parkoviště, nevyžadují velké nároky na místo. Může do nich být svedena voda z více ploch najednou.



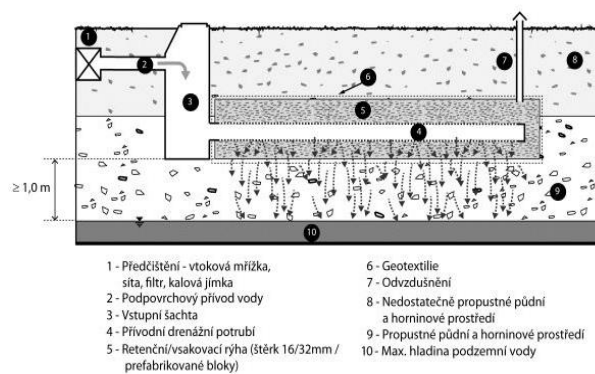
Obrázek 5: Vsakovací nádrž (TVN 75 9011, 2013)

Vsakovací rýha s površovým plošným odtokem (obrázek 6) je liniový objekt vhodný do míst, kde jsou omezené prostorové podmínky. Je vyplněn propustným štěrkovým materiálem s vysokou retencí a schopnosti vsakování do propustnějších ploch. Používá se zejména u liniových staveb nebo také po obvodu parkoviště. Přívod vody se doporučuje přes zatravněný pás z důvodu předčištění.



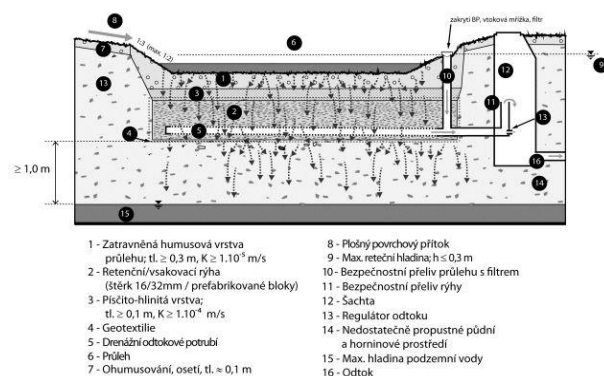
Obrázek 6: Vsakovací rýha s povrchovým plošným přítokem (TVN 75 9011, 2013)

Do vsakovací rýhy s podpovrchovým odtokem (obrázek 7) je voda přiváděna přes vstupní šachtu nebo vstupním otvorem, před tyto objekty je nutné umístit předčistění. Používá se v případech, kdy není možné provést povrchové zasakování.



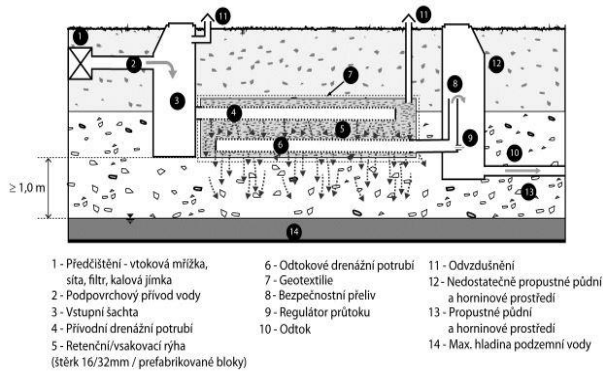
Obrázek 7: Vsakovací rýha s podpovrchovým přítokem (TVN 75 9011, 2013)

Další objekt je kombinací průlehu a rýhy (obrázek 8). Používá se při nedostatečně propustném podloží a má samostatný bezpečnostní přeliv jak pro průleh, tak pro rýhu. Srážková voda je vsakována povrchově.



Obrázek 8: Vsakovací průleh-rýha s regulovatelným odtokem (TVN 75 9011, 2013)

Vsakovací rýha s podpovrchovým přítokem (obrázek 9) se používá pro méně znečištěné zpevněné plochy. Součástí objektu je přívodní drenážní potrubí a drenážní odtokové potrubí, na které je napojený regulovaný odtok a bezpečnostní přeliv.



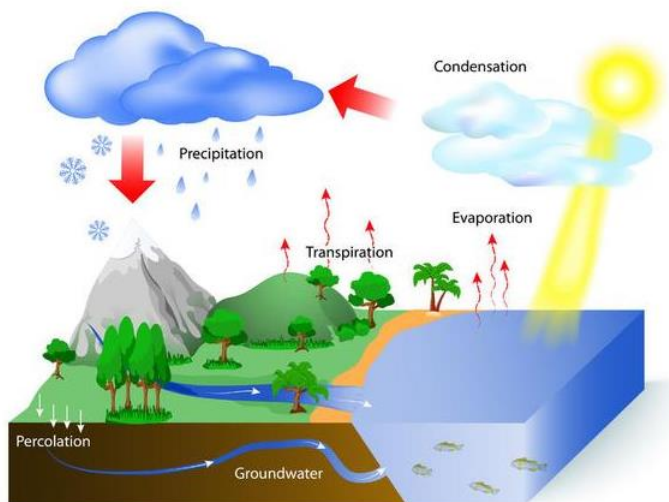
Obrázek 9: Vsakovací rýha s podpovrchovým přítokem a regulovatelným odtokem (TVN 75 9011, 2013)

4. DEŠŤOVÁ ZAHRADA

Dešťové zahrady jsou jedním z typů objektů hospodaření s dešťovou vodou. Jedná se o prohlubeň, do které je sváděna voda z okolí a zadržována na pozemku. Dešťové zahrady můžeme situovat na různá místa, od malých ploch, jako jsou trávníky rodinných domů až po rozsáhlé systémy umístěné u velkých budov, či na parkovištích (Kravčík, 2011).

Jsou také nazývány jako bioretenční systémy. Využívají chemické, biologické a fyzikální vlastnosti rostlin, mikrobů a půdy. Jedná se tedy o biologickou úpravu srážkové vody, kdy jako filtr slouží pouze přírodní prvky. Tento proces zajišťuje kontrolu jak nad kvalitou vody, tak i nad bezpečným množstvím vody na povrchu. Tyto bioretenční systémy mají několik funkcí a výhod (Dunnnett and Clayden, 2007).

Bioretence využívá jednoduchý model složený z přítoku, infiltrace, filtrace, retenčního prostoru a příjmu vody rostlinami. Hlavním cílem při kontrole množství vody je redukovat nebo eliminovat množství nadměrného odtoku z daného objektu. To zajišťují procesy intercepce, infiltrace, evapotranspirace a transpirace. Výsledná kvalita vody je zajišťována vsakováním přes filtrační vrstvu a kořeny rostlin. Čištění srážkové vody je založeno na usazování, filtraci, asimilaci a adsorpci. Dále na degradaci a rozkladu chemických a organických látek půdními organismy (Dunnnett and Clayden, 2007).



Obrázek 10: průběh srážkoodtokového procesu v přirozeném povodí (zdroj: <https://theberkey.com/blogs/water-filter/the-water-cycle-the-journey-of-water-and-our-lives>, navštíveno 10.4.2018)

4.1 Funkce dešťových zahrad

Dešťové zahrady jsou oblíbené zejména pro celou řadu jejich funkcí.

Urbanistická a krajinářská

Dešťové zahrady v urbanizovaných městech snižují procento zpevněných ploch a vytváří tak příjemnější prostor k životu. Nejen ve městech, ale i např. na zahradách rodinných domů vytváří významný estetický prvek.

Enviromentální a hydrologická

Snížením povrchového odtoku, retencí a infiltrací navrácí přirozený koloběh vody v přírodě. Vegetace slouží jako filtr znečištěných látek a kořenový systém zadržuje vodu a zvyšuje její infiltraci. Rostliny podporují a zabezpečují výpar, který ochlazuje okolní vzduch a dochází ke zlepšení mikroklimatických podmínek. Filtrační funkce zabraňuje, aby deštěm spláchnuté znečištěné vody pronikly do kanalizace, recipientu nebo do podzemních vod. Schopnost absorbovat kontaminanty dešťové zahrady je o 30–40 % než u běžných trávníků (Kalníková, 2017). Infiltrací dochází k dotaci podzemní vody a zvyšování její hladiny. To pomáhá eliminovat problémy s nedostatkem vody v období sucha. Další nezbytná funkce se týká především živočichů, kteří zde mohou najít nové útočiště, zejména v městských aglomeracích.

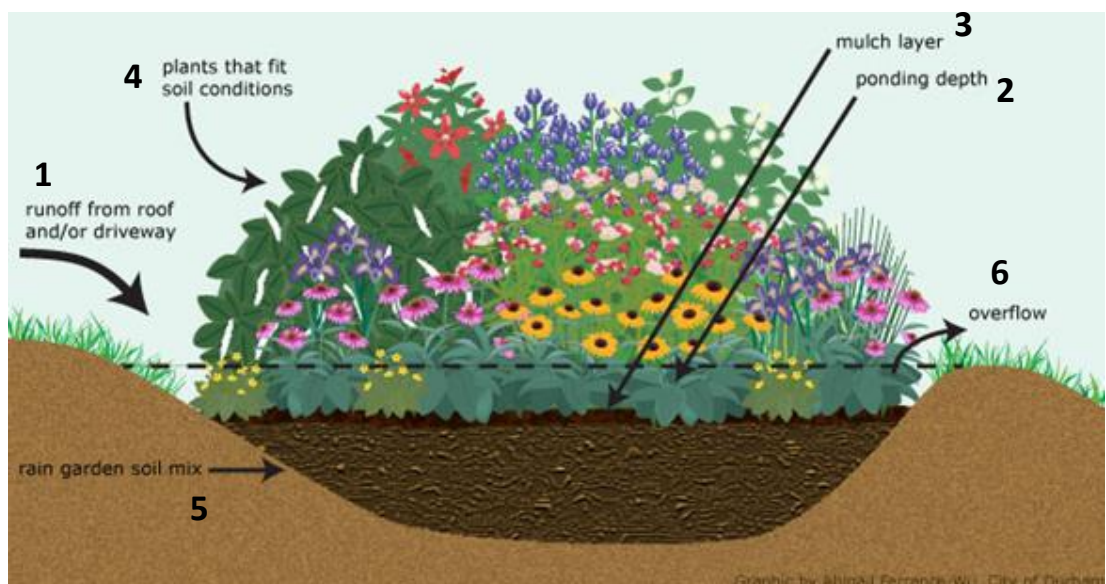
Ochranná a ekonomická

Vlivem urbanizace se zvyšuje povrchový odtok ze zpevněných ploch díky čemuž dochází i k větším kulminačním průtokům a následně k povodním (Vítek et al., 2015). V současné době jsou kanalizační sítě přetíženy, a tak jsme nuceni navrhovat sítě pro větší kulminační průtoky, což není výhodné z ekonomického hlediska. Díky vsakování a retenci dešťových srážek dojde k minimalizaci rychlého odtoku ze zpevněných ploch a předchází se tak negativním vlivům. Zadržanou dešťovou vodu lze využít na zalévání zahrad, splachování toalet aj. Při retenci je tak ušetřeno až 50 % spotřeby pitné vody v domácnosti (Samek, 2013).

4.2 Návrh dešťové zahrady

Při zakládání dešťových zahrádek je důležitá volba několika charakteristik. Informace o vhodných parametrech návrhu byly čerpány z manuálů (viz reference) a osobní konzultace se zahradními architektkami. Základní parametry při navrhování jsou zobrazeny na obrázku 11.

1. Přítok vody
2. Hloubka zatopení
3. Mulčovací vrstva
4. Vegetace
5. Půdní substrát
6. Bezpečnostní přeliv.



Obrázek 11: Řez dešťovou zahradou s vyznačenými parametry (zdroj: <https://durhamnc.gov/787/Rain-Gardens>, navštíveno dne 26.1. 2018)

4.2.1 Přítok vody

Voda může být přiváděna do dešťové zahrady například ze střechy, komunikací, parkovišť. Voda může být sváděna do jednoho bodu dešťové zahrady nebo rovnoměrně distribuována po celé vsakovací ploše. Popřípadě, pokud je vsakovací zařízení podél liniové stavby voda přitéká po celé délce jedné strany.

4.2.2 Hloubka zatopení

Hloubka zatopení se volí taková, aby se voda stihla zasáknout do 24 hodin. Dle manuálu Iowa (2008) pro zakládání a navrhování dešťových zahrad je ideální hloubka zatopení v rozmezí 20-30 cm.

4.2.3 Mulčovací vrstva

Mulčovací vrstva je svrchní vrstva dešťové zahrady. Její hloubka se volí v rozmezí 2-8 cm. Vhodným materiálem pro tuto vrstvu je štěrk s frakcí 16/32. Je možné použít i organické materiály, ale jejich výběr není moc vhodný pro jejich malou hmotnost, díky čemuž by při výtopě plavaly na hladině. Zcela nevhodným materiálem jsou například plastové folie, netkaná textilie a syntetické koberce.

Mulčovací vrstva slouží jako filtr znečištěných látek. Chrání půdu před vysušením a erozí. V zimě a v létě vyrovnává teplotní výkyvy.

4.2.4 Vegetace

Jak již bylo zmíněno, rostliny slouží jako filtr, pomáhají zadržovat vodu a podporují výpar. Jsou voleny takové rostliny, které jsou schopny snášet jak období sucha, tak i stav zamokření. Výběr rostlin závisí na klimatických, půdních a geografických podmínkách, pro každou oblast jsou vhodné jiné rostliny.

Nejvhodnější je osazovat dešťové zahrady původními rostlinami, které se lépe přizpůsobí klimatickým podmínkám a podporují hlubkové kořenové systémy. Dlouhé kořeny jsou tak schopny v období sucha najít zdroj vody v nižších vrstvách a zlepšují poréznost půdy. K osazení se používají zejména stromy, keře, traviny, trvalky, je však možné vytvořit užitek dešťové zahrady.

Pokud vsakovací plocha nemá rovné dno a jedná se prohlubeň, pak je při volbě rostlin nutné rozlišovat 3 zóny (mokrú, střední a přechodová). Mokrú zóna se nachází uprostřed

vsakovací plochy, zde se udrží nejvíce vody, rostliny jsou nejdéle zamokřené. Přechodová zóna se nachází po obvodu dešťové zahrady, rostliny zde nemusejí snášet tak velké zamokření jako v mokré zóně. Střední zóna se nachází mezi mokrou a přechodovou zónou (Danko, 2017).

Mezi vhodné rostliny patří například: denivka, kakost, hvězdice, rozrazil, koniklec, bezkoleneček, prýšec, kostřava.

4.2.5 Půdní směs

Tato vrstva je nejdůležitějším prvkem dešťových zahrad, jedná se o filtrační vrstvu, pro kterou se používají písčité půdy obohacené humusem. Zadržují vodu a poutají živiny. Jsou provzdušněné, výhřevné a po dešti rychle osychají a netvoří se na nich škraloup, který by bránil dalšímu vsakování. Při vsakování přes půdu obohacenou humusem dochází k filtraci nerozpuštěných látek.

Směs je složena z písku, ornice a kompostu. Velmi důležité je zvolit správný poměr těchto složek. V tabulce 1 jsou uvedeny informace z různých zdrojů o doporučení procentuálního zastoupení jednotlivých složek ve filtrační směsi. Ideální tloušťka filtrační směsi je doporučována v rozmezí 30 až 60 cm.

Tabulka 1: Procentuální zastoupení složek písku, ornice a kompostu ve filtrační směsi

Zastoupení jednotlivých složek ve filtrační směsi (%)			Zdroj	
Písek	Ornice	Kompost		
50	25	25	http://www.stormwater.allianceforthebay.org/take-action/installations/rain-gardens	Web
30	30-40	30	http://raingardenalliance.org/right/soil	Web
50	20-30	20-30	http://www.dnr.sc.gov/marine/NERR/present/RaingardenWorkshop/RainGardenSoils.pdf	Web
50-60	30-40	10-20	https://www.go-gba.org/resources/green-building-methods/rain-gardens-2/	Web
50-60	20-30	20-30	http://wildones.org/download/rainclay/rainclay.html	Web
47,4	40,4	12,2	Austin et al., 2012	Článek
50	20	30	Couling et al., 2016	Manuál
50	20	30	Dyke et al., 2009	Manuál

Při výběru půdního složení je důležité zohlednit, aby bylo dosaženo požadované hodnoty nasycené hydraulické vodivosti filtrační vrstvy. Pokud by půda byla příliš propustná, voda by se infiltrovala rychle bez dostatečného pročištění. Naopak, pro nízkou hodnotu hydraulické vodivosti se voda nestihne včas zasáknout a většina vody odeče přes bezpečnostní přeliv. Dle TVN 75 9011 (2013) by měla být hydraulická vodivost filtrační vrstvy větší než 10^{-5} m/s.

4.3 Návrh a dimenzování objektu HDV

Návrh a dimenzování objektů je popsáno v normě TVN 75 9011 (2013), která doplňuje ČSN 75 9010 (2012), jelikož ta se nezabývá návrhem objektů HDV tak komplexně. Pro návrh byl vybrán průleh, vytvořený v Univerzitním centru energeticky efektivních budov, jedná se o vsakovací průleh-rýhu s regulovatelným odtokem.

Klíčové parametry pro navrhování:

- Specifický odtok: maximálně $3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}$
- Četnost překročení kapacity: maximálně jednou za 5 let ($p=0,2 \text{ rok}^{-1}$)
- Doba prázdnění: Maximálně 24 hod

Maximální hodnota specifického odtoku je určena proto, aby bylo dosaženo přirozeného odtoku. Pro každou oblast je tento parametr odlišný. Maximální dobu prázdnění uvádí norma ČSN 75 9010 (2012) jako 72 hodin. Z důvodu zvyšujícího se počtu přívalových srážek je tato doba riskantní, proto norma TVN 75 9011 (2013) uvádí maximální dobu prázdnění 24 hodin.

4.3.1 Vstupní parametry

$$A_{\text{red}} = A \cdot \psi_m = 39,9 \cdot 1,0 = 39,9 \text{ m}^2$$

Redukovaná odvodňovaná plocha

$$k_{v,p} = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Koeficient vsaku průlehu

$$k_v = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Koeficient vsaku

$$p = 0,2 \text{ rok}^{-1}$$

Periodicita přetížení retenčního objemu

$$q_c = 3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}$$

Specifický odtok

$$k_v = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Koeficient vsaku rostlé zeminy

$$Q_c = A \cdot q_c = 0,039 \cdot 3 = 0,1197 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Přípustný odtok z odvodňované plochy

$$A_{vsak,p} = 0,1 \cdot A_{red} = 0,1 \cdot 39,9 = 4,0 \text{ m}^2$$

Vsakovací plocha průlehu

Zvolené hodnoty:

$$b_t = 2,4 \text{ m}$$

Šířka průlehu

$$h_r = 0,57 \text{ m}$$

Hloubka podzemní rýhy

$$A_{vsak,p} = 0,1 \cdot A_{red} = 0,1 \cdot 39,9 = 4,0 \text{ m}^2$$

Vsakovací plocha průlehu

$$Q_o = Q_c$$

Regulovaný odtok

$$m = 0,45$$

Pórovitost materiálu výplně rýhy

4.3.2 Stanovení retenčního objemu průlehu

Prvním krokem při navrhování je určení retenčního objemu samotného průlehu. Hydrologická bilance je dána rovnicí:

$$i \cdot (A_{red} + A_{vsak}) \cdot \frac{t}{1000} = 3600 \cdot Q_{vsak,p} \cdot t + V_p \quad (1)$$

Po vyjádření retenčního objemu průlehu V_p :

$$V_p = i \cdot (A_{red} + A_{vsak}) \cdot \frac{t}{1000} - 3600 \cdot Q_{vsak,p} \cdot t \quad (2)$$

Kde $Q_{vsak,p}$ se vypočte dle:

$$Q_{vsak,p} = \frac{k_{vp} \cdot A_o}{f} = \frac{7,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3,99}{2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

Hodnota součinitele bezpečnosti vsaku f je doporučována volit větší nebo rovná 2. Retenční objem průlehu se dimenzuje na nejnepříznivější srážku o době trvání t a intenzitě i , viz tabulka č. 2.

Tabulka 2: Výpočet retenčního objemu pro různé doby trvání srážek

Doba trvání srážek t_c (min)	Návrhové úhrny srážek h_d (mm)	i (mm/h)	V_p
5	12	144.00	0.481
10	18	108.00	0.700
15	21	84.00	0.787

Doba trvání srážek t_c (min)	Návrhové úhrny srážek h_d (mm)	i (mm/h)	V_p
20	23	69.00	0.829
30	25	50.00	0.827
40	27	40.50	0.825
60	29	29.00	0.733
120	35	17.50	0.456
240	39	9.75	-0.448
360	44	7.33	-1.309

Pro dimenzování retenčního objemu bude použita srážka o intenzitě 69 mm/h a dobrou trvání 20 min.

4.3.3 Stanovení rozměrů podzemní rýhy

Dalším parametrem je stanovení rozměrů podzemní rýhy.

Nejprve je třeba určit rozšířenou pórovitost m_{DR} , kde je zahrnut i prostor drenážního potrubí. Stanoví se z následující rovnice:

$$m_{DR} = \frac{m}{b_R \cdot h_R} \cdot \left[b_R \cdot h_R + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

Průměr drenážního potrubí d je 100 mm.

Pro výpočet objemu podzemní rýhy platí:

$$V_r = V - V_p \quad (5)$$

$$V_r = b_R \cdot h_R \cdot l_R \cdot m$$

Kombinací rovnice pro vsakovaný odtok (3) a rovnice výpočtu retenčního objemu (2) a rovnice (5) se stanoví potřebná délka průlehu:

$$l_R = \frac{i \cdot \frac{A_{red} + A_{vsak,p}}{1000} - 3600 \cdot Q_R - \frac{V_p}{t}}{\frac{b_R \cdot h_R \cdot m_{DR}}{t} + \frac{3600}{f} \cdot k_V \cdot \left(b_R + \frac{h_R}{2} \right)} \quad (6)$$

Výsledná délka se určí opět dle nejnepříznivější srážky. Z tabulky 3 lze vidět, že navrhaná délka podzemní rýhy je 3,74 m.

Tabulka 3: Stanovení délky rýhy

t_c (h)	h_d (mm)	i (mm/h)	l_r (m)
1	29	29.00	1.31
2	35	17.5	2.07
4	39	9.75	2.51
6	44	7.33	3.06
8	49	6.13	3.60
10	50	5.00	3.63
12	51	4.25	3.66
18	54	3.00	3.74
24	54	2.25	3.45

4.3.4 Kontrola správnosti navržených parametrů

Je nutné posoudit, zda je navržený retenční objem průlehu splňuje dané podmínky.

Stanovené parametry:

$$V_p = 0,83 \text{ m}$$

Retenční objem průlehu

$$b_R = 2,4 \text{ m}$$

Šířka průlehu a rýhy

$$l_R = 4,0 \text{ m}$$

Délka průlehu a rýhy

- a) Podmínka hloubky nadržení vody v průlehu musí být menší nebo rovna 0,30 m.

$$h_p = \frac{V_p}{b_R \cdot l_R} \quad (7)$$

$$h_p = \frac{0,83}{2,4 \cdot 4} = 0,09 \text{ m}$$

- b) Plochy vsakování musí být menší než 200 m²

$$A_{vsak,p} = b_R \cdot l_R \quad (8)$$

$$A_{vsak,p} = 4,0 \cdot 2,4 = 2 \text{ m}^2$$

- c) Doba prázdnění musí být menší než 24 hodin

$$T_{pr} = \frac{h_p}{\frac{1}{f} k_v} \quad (9)$$

$$T_{pr} = \frac{2 \cdot 0,09}{7,5 \cdot 10^{-5}} = 2400 \text{ s} = 0,4 \text{ h}$$

Všechny podmínky byly splněny.

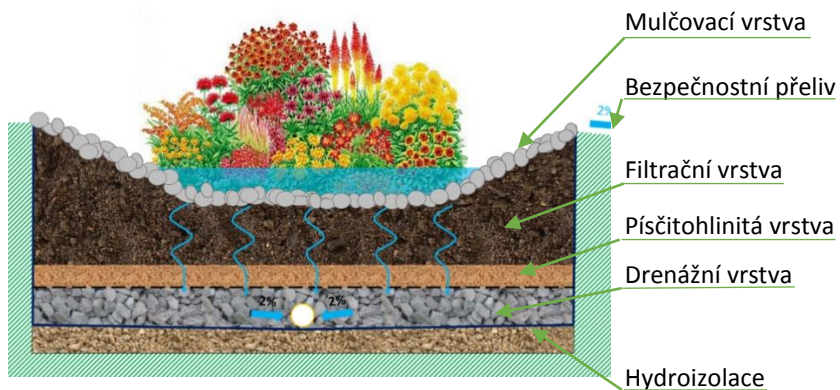
4.4 Dešťové zahrady v areálu UCEEB

Na základě této studie byly v prosinci minulého roku v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) vybudovány dva experimentální průlehy typu dešťová zahrada. Jejich funkčnost byla předem zkoumána na dvou testovacích pilotních plochách, jak bude popsáno dále.

První průleh odvodňuje vodu ze střechy z experimentální budovy Crawl Space, která má plochu přibližně 40 m². Druhý průleh bude sloužit jako kontrolní, bude do něj přiváděna voda ze zásobní nádrže, objem vody bude stejný jako v průlehu 1. Srážkové události budou monitorovány pomocí nainstalované kamery. Dešťové zahrady byly zhotoveny jako vsakovací průleh-rýha s regulovaným odtokem. Skládá se ze tří vzájemně propojených částí: nadzemní retenční část, filtrační vrstva a retenční rýha.

Průleh je široký 2,4 m a jeho délka činí 4 m. Je opatřený bezpečnostním přelivem, který ústí do trativodu, maximální hloubka výtopy je 0,3 m. Mulčovací vrstva je tvořena štěrkem frakce 16/32, tloušťka 5 cm. Filtrační vrstva je tvořena stejnou zeminou jako pilotní plochy dešťové zahrady, viz kapitola Metody a materiál. Vrstva je hluboká 0,3 m. Drenážní vrstvu tvoří štěrk frakce 16/32 s drenážním potrubím s průměrem DN100 uprostřed, její tloušťka je 0,27 cm. Mezi drenážní vrstvou a filtrační vrstvou je 100 mm tlustá písčitohlinitá vrstva pro zachycení jemných částic.

Mezi průlehy je umístěna šachta z betonové skruže, do které je odváděna voda z drenážní trubky. Konce drenážních trubek jsou vedeny do průtokoměrů, které měří odtok. Aby bylo zajištěno měření veškerého odtoku z dešťové zahrady, je celý objekt od okolního prostředí hydraulicky odizolován. Průlehy budou osázeny trvalkami, druhy byly zvoleny stejné jako v pilotních plochách. Řez dešťovou zahradou je zobrazen na obrázku 12. Na obrázcích 13 a 14 jsou fotografie současného stavu.



Obrázek 12: Řez dešťovou zahradou v areálu UCEEB

Do obou průlehů byly aplikovány tenzometry a MPS čidla pro měření půdního potenciálu. Pro určení vlhkosti byla aplikována TDR čidla. Pro měření výšky hladiny byla nad průlehy umístěna ultrazvuková čidla. Pomocí srážkoměru a průtokoměru bude možné určit vodní režim průlehů. Dále budou odebírány vzorky půdy pro sledování vývoje půdní struktury. Pro zjištění filtrační schopnosti půdy budou odebírány vzorky vody pro posouzení kvality a čistící schopnosti průlehu.



Obrázek 13: Dešťová zahrada s přítokem ze zásobní nádrže



Obrázek 14: Dešťová zahrada s přítokem vody ze střechy

5. METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY STANOVIŠTĚ

Zahrádky byly umístěny vedle pozemní meteostanice, kde jsou měřeny srážky a další meteorologické veličiny, které byly pro dané místo zpracovány. Ze získaných dat srážkoměru bylo tedy možné získat informaci o množství spadlých srážek a provést závlahu zahrádek s desetkrát vyšší intenzitou a simulovat tak podmínky pro dešťovou zahradu.









5.1.1 Meteostanice

Pozemní meteostanice se nachází v severovýchodní části areálu na zatravněném terénu v nadmořské výšce 357 m. Je v provozu od 4. září 2014. Stanoviště této meteostanice může být považováno jako referenční plocha s nízkým vlivem okolní zástavby.

5.1.2 Metodika a přístroje

Na severovýchodní meteostanici probíhá měření srážek, rychlosti a směru větru, teploty ve výškách 7 a 200 cm nad terénem a vlhkosti vzduchu. Na obrázku 15 jsou uvedena čidla použitá pro měření hydraulických veličin označená číslem 3 pro pozemní severovýchodní meteostanici. Pro popis jednotlivých přístrojů meteostanic byl použit podklad zpracovaný Sněhotou et al. (2015).

Data jsou zálohována každých 15 minut na virtuálním serveru v serverech UCEEB. Odtud jsou dvakrát denně publikována na web pomocí programu Vista Data Vison dostupné na adrese <http://147.32.99.42/vdv/vdv.php> pod přístupovým heslem. Aktuální počasí je možné sledovat online na webu Univerzitého centra energeticky efektivních budov.

Veličina	Specifikace čidla	
Srážky ^{1,2,3}	Překlopný srážkoměr 52202 (R M Young), vyhříváný, měření dešťových i sněhových srážek, plocha 200 cm ² , rozlišení 0.1 mm	
Teplota vzduchu (≈7cm) ^{1,2,3}	UV odolné, vodotěsné, univerzální teplotní čidlo CS107 s operační teplotou v rozmezí od -55°C do +70°C a přesností 0.08°C, s radiačním krytem MET20	
Radiace ^{1,4}	Komponentní CNR4 Net radiometr (Kipp & Zonen) vybavený dvojicí pyranometrů pro měření krátkovlnného dopadajícího a odraženého záření a dvojicí pyrgeometrů pro měření dlouhovlnného dopadajícího a vyzářeného záření, spektrální rozsah pyranometrů 300 – 2800 nm, pyrgeometrů 4500 – 42000 nm	
Radiace ¹	Snímač globální radiace pyranometr CMP11 (spektrální rozsah 285 – 2800 nm) se stínícím prstencem CM121 (Kipp & Zonen) pro stínění umístěného čidla od přímého záření během roku umožňující exaktní měření difúzního záření	
Radiace ^{2,3}	Net radiometr NR Lite 2 (Kipp & Zonen) pro přímé měření čisté radiace	
Směr a rychlost větru ^{1,2,3}	Anemometr A100R s větrnou směrovou korouhví W200P (Vector Instruments Ltd.)	
Teplota a vlhkost vzduchu (2m) ^{1,2,3}	Univerzální čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu CS215 s radiačním krytem MET20	
Barometrický tlak ¹	Čidlo barometrického tlaku CS100 včetně pouzdra pro měření v rozmezí tlaků 600 – 1100 mb	

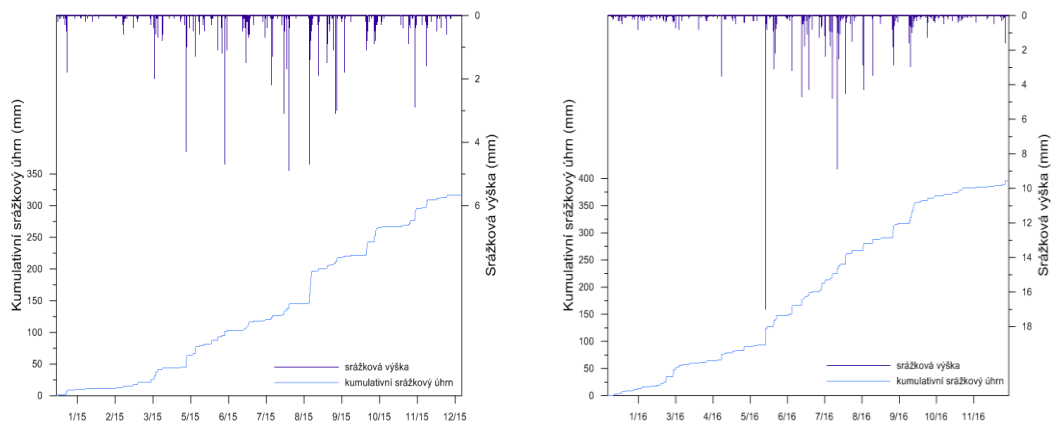
Obrázek 15: Použité přístroje pro měření hydraulických veličin Sněhota et al. (2015)

5.2 Vyhodnocení meteorologických podmínek stanoviště

V následujících grafech jsou prezentovány výsledky naměřených dat za rok 2015 a 2016 na severovýchodní meteostanici. Měření probíhá kontinuálně od jejich zprovoznění. Data jsou poskytována pro výzkumné účely pracovním skupinám UCEEB. Pro porovnání naměřených hodnot byly použity veřejně dostupné informace poskytnuté Českým meteorologickým ústavem.

5.2.1 Srážky

V následujících grafech je znázorněna srážková výška v časovém kroku měření 15 min a kumulativní srážkový úhrn. Srážky jsou zaznamenávány s minutovým intervalem a rozlišením 0,1 mm.

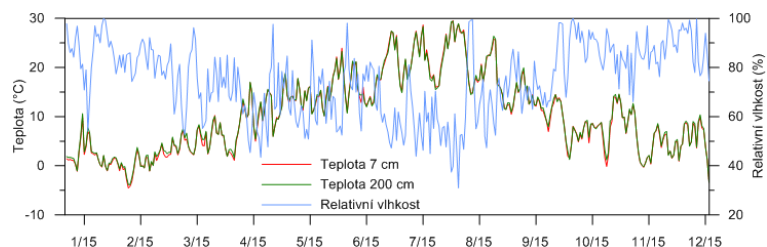


Obrázek 16: Množství srážek za rok 2015 (vlevo) a 2016 (vpravo)

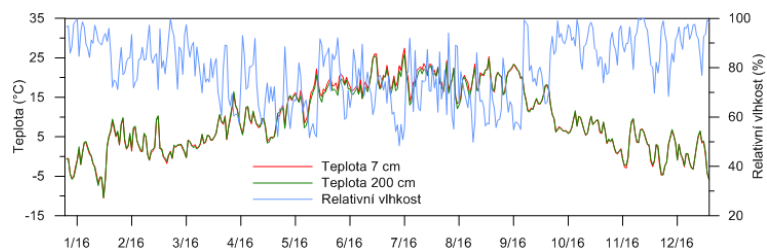
Dle Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) je průměrný roční úhrn srážek pro Prahu a Středočeský kraj 459 mm za rok 2015 a 535 mm v roce 2016. Pro celou Českou republiku hodnoty činí 532 mm v roce 2015 a 637 v roce 2016. V našem případě jsou srážky pod průměrem.

5.2.2 Relativní vlhkost a teplota

Na levé ose jsou znázorněné průměrné denní teploty měřené 200 cm a 7 cm nad terénem. Pravá osa představuje hodnoty průměrné denní relativní vlhkosti. Relativní vlhkost je měřena 200 cm nad terénem.



Obrázek 17: Průběh relativní vlhkosti a průměrné denní teploty v roce 2015

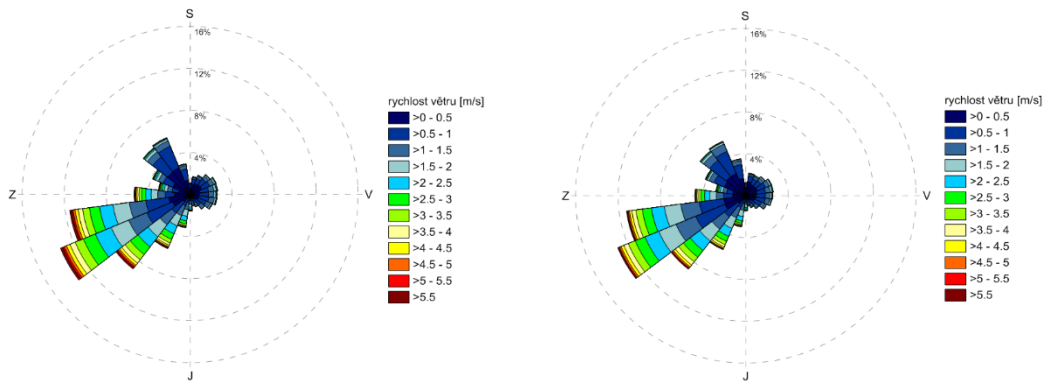


Obrázek 18: Průběh relativní vlhkosti a průměrné denní teploty v roce 2016

V roce 2016 dosahovala relativní vlhkost vyšších hodnot, příčinou je vyšší srážkový úhrn v tomto roce.

5.2.3 Větrná růžice

Rychlost větru a směr jsou zaznamenávány v minutových intervalech. Tyto výsledky jsou prezentovány formou větrné růžice. Ta vyjadřuje četnosti výskytu větru daným směrem a jeho velikostí. Růžice je rozdělena do 24 směrů a rychlost větru je rozlišena barevnou škálou.

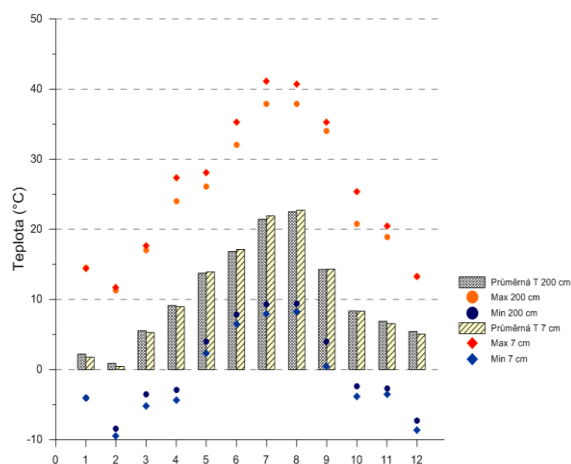


Obrázek 19: Větrná růžice pro rok 2015 (vlevo) a 2016 (vpravo)

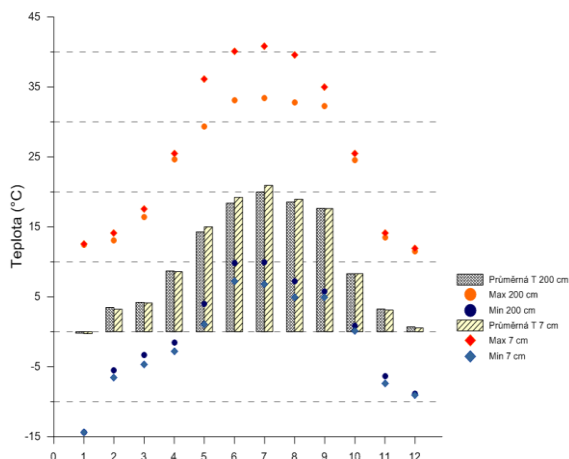
Na obou růžicích je převládající směr větru jihozápadní.

5.2.4 Průměrná teplota

V následujících obrázcích jsou znázorněny průměrné měsíční teploty a jejich maximální a minimální hodnoty. Pro porovnání jsou v tabulkách uvedeny průměrné měsíční teploty pro celou Českou republiku a pro Středočeský kraj i Prahu. Historická data jsou veřejně dostupná na internetových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu na adrese <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace>.



Obrázek 20: Průměrné a denní teploty pro severovýchodní meteostanici v roce 2015



Obrázek 21: Průměrné a denní teploty pro severovýchodní meteostanici v roce 2016

Pro porovnání jsou v tabulce 4 uvedeny průměrné hodnoty pro Českou republiku a Středočeský kraj včetně Prahy. Průměrné teploty získané z meteostanice jsou v obou případech porovnání vyšší.

Tabulka 4: Průměrné měsíční teploty pro ČR a Středočeský kraj včetně Prahy v roce 2015 a 2016

	Meteostanice severovýchod	ČR	Středočeský kraj a Praha
Průměrná teplota v roce 2015	10,7	9,4	10,1
Průměrná teplota v roce 2016	9,8	8,7	9,4

6. PILOTNÍ PLOCHY DEŠŤOVÉ ZAHRADY

Pilotní plošky předcházejí založení dvou zasakovacích zařízení typu dešťové zahrady, které byly vybudovány na pozemku UCEEB v prosinci minulého roku. Pro správnou funkci bylo nutné vybrat vhodné složení filtrační vrstvy, tzn. vhodné zvolení poměru směsi písku, ornice a kompostu. Dalším důležitým faktorem pro dešťové zahrady je výběr rostlin. V našem případě byly zvoleny jako testovací rostliny trvalky, které odolají požadovaným podmínkám.

6.1 Filtrační vrstva

Nejdůležitějším prvkem pro zasakovací zařízení je zvolení vhodné zeminy pro filtrační vrstvu. Půdní materiály lze definovat pomocí hydraulických charakteristik, které ukazují, jak půda interaguje s vodou. Mezi základní hydraulické charakteristiky patří hydraulická vodivost a retenční čára.

Hydraulická vodivost filtrační vrstvy musí mít optimální hodnotu, aby nedocházelo k rychlému zasáknutí bez filtrace vody, a naopak k příliš pomalému vsakování vody. Bylo nutné zjistit správný poměr složek písku, ornice a kompostu.

Pro správné zvolení poměru písku, ornice a kompostu byly namíchány tři různé směsi písku, ornice a kompostu, na kterých byla změřena hydraulická vodivost. Na obrázku 22 je vyfocena použitá ornice, kompost a písek, před vytvářením vzorků byly přirozeně vysušeny.



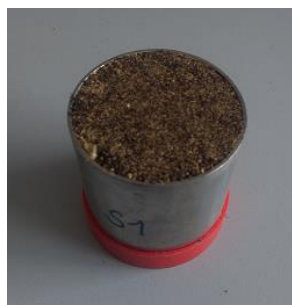
Obrázek 22: Popis zleva: Ornice, kompost, písek

V tabulce 5 je uvedeno procentuální zastoupení složek zeminy ve zkušebních směsích. Procenta vyjadřují objemové zastoupení jednotlivých složek ve výsledné zemině. Vybraná směs 1b má stejné procentuální zastoupení všech tří složek jako 1a, ale v této zemině byla použita jiná ornice.

Tabulka 5: Složení testovacích půdních směsí

	Směs 1a	Směs 1b	Směs 2	Směs 3
Písek (%)	50	50	33,3	40
Ornice (%)	20	20	33,3	35
Kompost (%)	30	30	33,3	25

Vzorky byly vytvořeny nahutněním do Kopeckého válečku, od každé směsi byly zhotoveny 3 zkušební vzorky pro měření hydraulických charakteristik.



Obrázek 23: Vytvořený vzorek v Kopeckého válečku

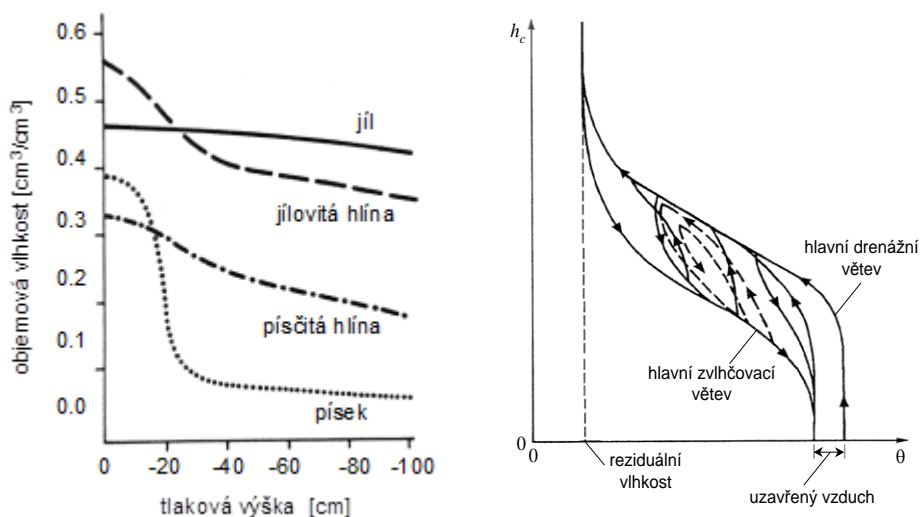
6.2 Hydraulické charakteristiky materiálů

Teorie související s hydraulickými charakteristiky byla čerpána především ze skript Císlarové et al. (2008) a Kutílka et al. (2004).

6.2.1 Retenční schopnost půd

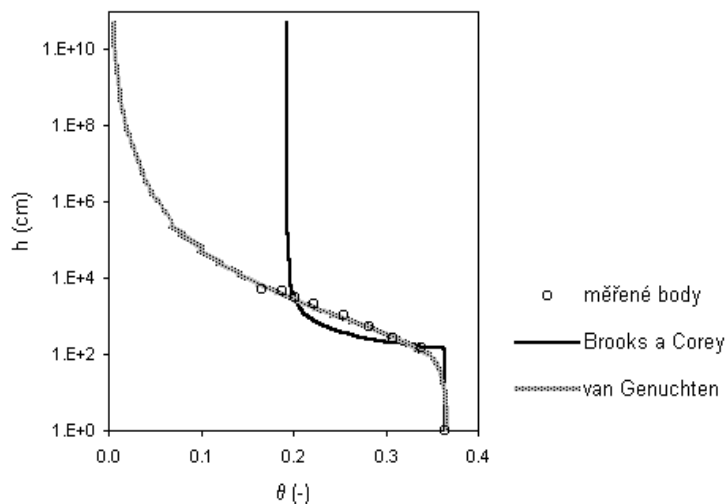
Retenční čára popisuje závislost mezi sací tlakovou výškou h , která reprezentuje potenciál vody, a objemovou vlhkostí θ . Retenční křivka charakterizuje pórovité prostředí z hlediska jeho plnění či prázdnění a její tvar závisí především na geometrických vlastnostech, ale také na mineralogickém složení. Jedna z charakteristik retenční čáry je vstupní hodnota vzduchu. Při vzrůstu sací tlakové výšky totiž nedochází k odtoku vody okamžitě, ale až dokud není dosaženo této hodnoty, kdy vzduch proniká do pórového prostředí.

Body retenční čáry se získají měřením jako posloupnost rovnovážných stavů vlhkostí odpovídající hodnotám předem nastavených sacích tlakových výšek. Charakteristiky půdního prostředí mohou být odlišné v případě plnění či prázdnění, proto nebývá retenční čára v obou případech shodná. Tento jev se označuje jako hystereze retenční křivky. Velikost hystereze závisí na mnoha okolnostech, například na geometrii prostředí, historii zvlhčování či zrnitostním složení. U hrubozrnných materiálů se hystereze projevuje více než u jemnozrnných materiálů. Je-li popisován jednosměrný pohyb proudění, tak se vliv hystereze neprojevuje.



Obrázek 24: Retenční křivka různých (vlevo) a hystereze retenční křivky (vpravo) (Císlarová et al. 2008)

Retenční čára je důležitá charakteristika pórového prostředí, proto bylo nutné nalézt vhodné proložení pro naměřené body, použitelné například pro matematické modely. Na obrázku 25 jsou zobrazeny proložené křivky naměřenými body podle Brookse a Coreyho (1964) a van Genuchtena (1978).



Obrázek 25: Retenční křivka proložená naměřenými body dle Brookse a Coreyho a van Genuchtena (Cislerová et al., 2008)

Rovnice van Genuchtena je jedna z nejpoužívanějších (1978):

$$S_E = \frac{1}{(1 - \alpha|h|^n)^m} \quad (10)$$

$$S_E = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (11)$$

Kde α , n a m jsou empirické parametry. Pro parametry m , n platí podmínka:

$$n > 1, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

6.2.2 Měření bodů retenční čáry

Měření bodů retenční křivky probíhá na pískovém tanku a v přetlakovém aparátu (obrázek 26), přičemž se většinou měří drenážní větev, což znamená, že je vzorek plně nasycen a poté se drénuje při různých sacích výškách. V případě pískového tanku se jedná o využití systému spojených nádob. Vzorky leží na písku, který má vysokou vstupní hodnotu vzduchu. Písek je nasycen hadičkou spojen s byretou s odtokem. Umístěním odtoku byrety do

výšky nižší, než je povrch písku je vytvořen podtlak, který se přenáší do vody v písku, jenž zůstává díky vysoké vstupní hodnotě vzduchu zcela nasycen, díky čemuž se podtlak při dobrém kontaktu mezi vzorkem a pískem přenáší až do půdního vzorku. Při tomto způsobu drenáže lze měřit do hodnoty sacího tlaku 50 cm, poté dochází k destabilizaci propojení nádob a měření může být neúspěšné.

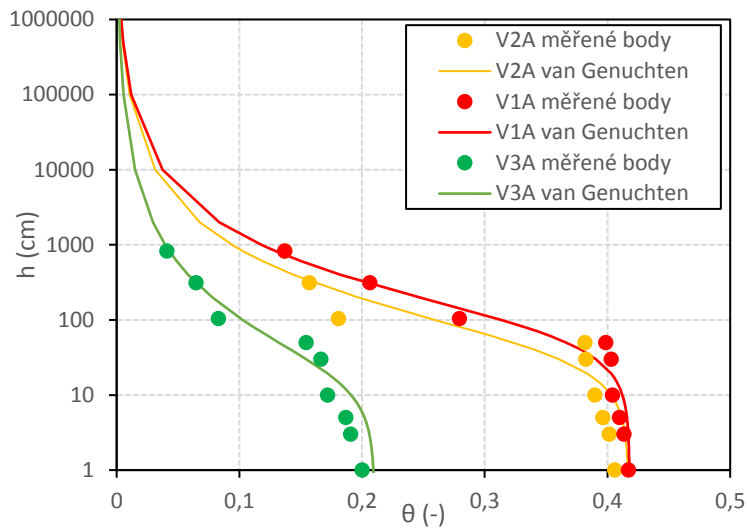
Pro určení bodů retenční čáry s vyšší hodnotou sacího tlaku je využíván přetlakový aparát, který místo podtlaku na spodní hranici vzorku využívá přetlak na jeho horní hranici. Vzorky v tepmské cele leží na pórovité desce, která musí být plně nasycena, aby bylo opět dosaženo dobrého kontaktu. Maximální hodnota sacího tlaku při této metodě je omezena na schopnosti aparátu vydržet velký přetlak. Na tomto aparátu byly změřeny vlhkosti pro 100, 300 a 900 mbar.



Obrázek 26: Pískový tank (vlevo), přetlakový aparát (vpravo)

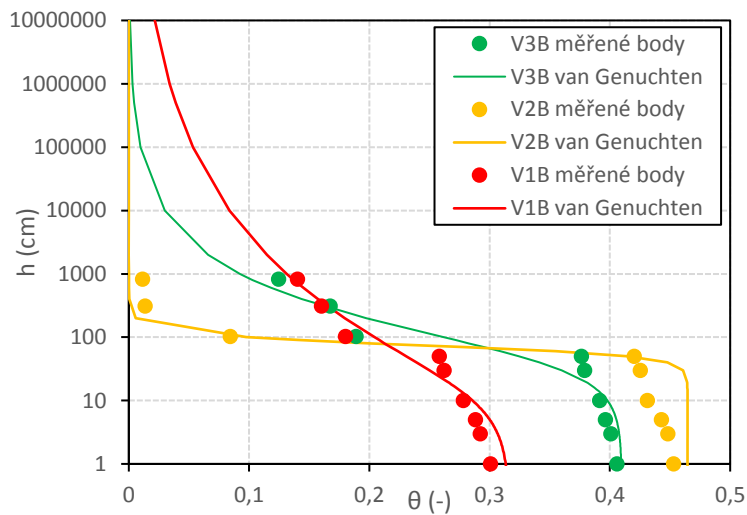
Dále jsou vykresleny retenční čáry pro některé ze směsí. Směs 1b, která byly vyhodnocena jako nejvhodnější pro použití do dešťové zahrady je popsána v kapitole 7.

a) Směs 1a (50 % písku, 30 % kompostu, 20 % ornice)



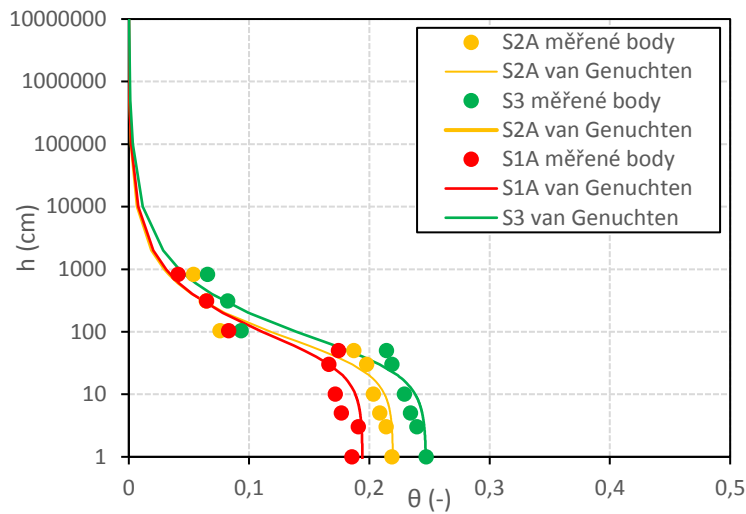
Obrázek 27: Retenční čára pro půdní směs 1a

b) Směs 2 (33,3 % písku, 33,3 % kompostu, 33,3 % ornice)



Obrázek 28: Retenční čára pro půdní směs 2

c) Směs 3 (40 % písku, 25 % kompostu, 30 % ornice)



Obrázek 29: Retenční čára pro půdní směs 3

V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro dané směsi.

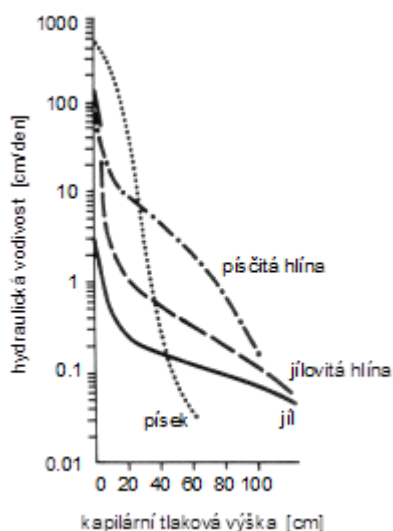
Tabulka 6: Nasycená hydraulická vodivost

	$K_s \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$		
Směs 1a	$1.26 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-4}$	$1.50 \cdot 10^{-4}$
Směs 2	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$
Směs 3	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$

Dle ČSN 75 9011 (2013) má být velikost nasycené hydraulické vodivosti pro filtrační zeminu větší než 10^{-5} . Tuto podmínku splňují všechny půdní směsi.

6.3 Hydraulická vodivost

Druhou charakteristikou, která popisuje pórovité prostředí je průběh hydraulické vodivosti. Vyjadřuje míru schopnosti pórovitého prostředí vést vodu. Předpověď průběhu hydraulické vodivosti je odvozena z retenční čáry na základě teorie kapilárních modelů. Rozlišujeme dva stavy hydraulické vodivosti. Při plném nasycení pórového prostředí je daná hydraulická vodivost nazývaná nasycená hydraulická vodivost (K_s). Při nenasyceném prostředí je vlhkost závislá na čase a prostoru, proto se v různých bodech liší i hydraulická vodivost. Na následujícím obrázku jsou vykresleny průběhy nenasycené hydraulické vodivosti některých typů půd.



Obrázek 30: Nenasyčená hydraulická vodivost (Císlerová et al., 2008)

Nenasycená hydraulická vodivost (K) vystupuje v Darcyho-Buckinghamově zákoně (Buckingham, 1907), který určuje hodnotu průtoku vody přes vzorek. Jedná se o proudění vyvolané rozdílem celkových hydraulických výšek (H), při dané vlhkosti θ (při odpovídající tlakové výšce h). Rovnice pro jednorozměrný případ:

$$q = -K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \quad H = h + z \quad (13)$$

Zkombinováním této rovnice s rovnicí kontinuity byla obdržena Richardsova rovnice (Richards, 1931), která je základním vztahem pro výpočet proudění vody v pórovém prostředí. Jednorozměrný tvar rovnice je:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (14)$$

6.3.1 Preferenční proudění

V případě homogenních půdních vzorků lze pro vyhodnocení infiltrace vody použít jednoduše Richardsovu rovnici pro pohyb vody v pórovém prostředí. Problém nastává v případě heterogenních půd, kde se mohou vyskytovat cesty pro preferenční proudění. Jedná se o místa, kde je hydraulická vodivost výrazně vyšší než v okolním materiálu. Ve velkých pórech dochází k rychlému proudění vody, což je způsobeno gravitačními silami. Heterogenní prostředí tak můžeme rozdělit na dvě domény, rychlou a pomalou. Pomalá doména se nachází v půdní matici a probíhá zde kapilární proudění.

Jednoduchou představu tohoto jevu představují cesty, které vytvoří žížaly nebo kořeny rostlin, či jiné organismy. Těmito cestami proudí voda zcela zřejmě s menším odporem než v okolním půdním materiálu. V jiných případech se může jednat o přítomnost velmi vodivého materiálu či propojených makropórů.

Specifické pro preferenční proudění je, že protéká přes malou část celkové plochy průřezu, přesto může touto plochou protékat výrazná většina z celého vodního toku přes půdní profil. Negativní vliv spočívá v tom, že takto může voda jednodušeji transportovat rozpuštěné látky (polutanty) do větších hloubek, kde se můžou dále transportovat do okolní matrice či přímo vniknout do podzemní vody (Zumr a Císlarová, 2007). Na závěr je vhodné zmínit, že i v případě homogenního materiálu můžou vzniknout cesty s preferenčním prouděním, v důsledku nestability čela zvlhčení (Ritsema et al., 1998), tento jev (obrázek 31) se nazývá finger flow.



Obrázek 31: Preferenční proudění v homogenním materiálu (finger flow) (Ritsema et al. 1998)

6.3.2 Měření hydraulické vodivosti

Nasyčená hydraulická vodivost vytvořených směsí byla změřena v laboratoři fakulty stavební. Po nasycení byl vzorek umístěn do tempské cely upevněn do stojanu. Tempská cela je propojena s hadičkou, která odvádí vodu a s byretou, kterou je voda přiváděna spodem. Pro zabránění vyplavování jemných částic byl na vrchu i na dně vzorek opatřen sítkou. Byla použita metoda s konstantním spádem, tudíž délka vzorku L se rovnala rozdílu hladin ΔH . Při metodě s konstantním spádem změřená ustálená rychlost proudění přímo odpovídá nasycené hydraulické vodivosti K_s .

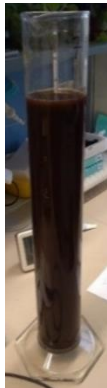


Obrázek 32: Měřicí sestava s konstantním hydraulickým spádem

6.4 Stanovení čáry zrnitosti

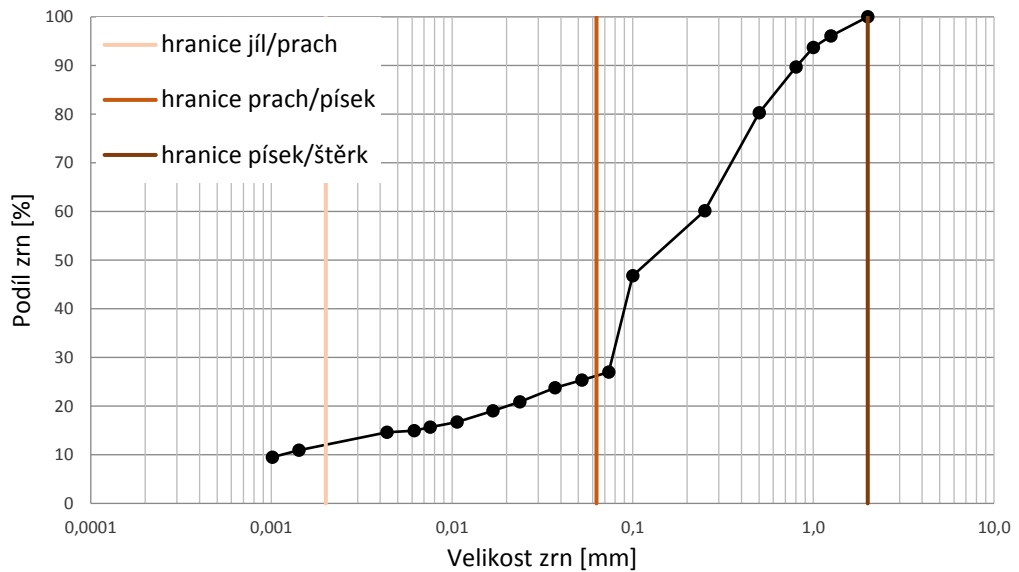
Pro zjištění procentuálního zastoupení jednotlivých složek v zemině byla změřena čára zrnitosti. Čára zrnitosti určuje hmotnostní podíl vzorku půdy menší než velikost zrna d . Čára zrnitosti byla stanovena kombinací dvou metod, sedimentace a prosévání.

Prosévání bylo provedeno proséváním na sítích s velikostmi ok od 2 do 0,1 mm. Množství částic menších než 0,1 mm bylo určeno pomocí hustoměrné metody dle Casagrandeho.



Obrázek 33: Odměrný válec se suspenzí zeminy

Z naměřených hodnot prosévací a hustoměrné metody byla určena součtová čára, která zobrazuje procentuální zastoupení jednotlivých složek v zemině.



Obrázek 34: Čára zrnitosti

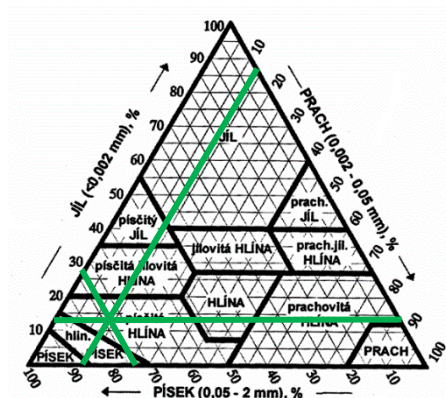
Nejvíce zastoupená složka v půdní směsi je písčité a nejmenší zastoupení mají jílovité částice. Pokud by jílovitých částic bylo větší množství, mohlo by dojít k ucpání, a tudíž ke zpomalení infiltrace vody. V tomto případě je podíl jednotlivých složek optimální.

Tabulka 7: Procentuální zastoupení jílu, prachu a písku

jíl	prach	písek
12.03 %	14.17 %	73.80 %

Dle procentuálního zastoupení jílových, prachových a písčitých částic byla zemina zařazena do trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd (obrázek 35). Výsledné zařazení půdy odpovídá písčité hlíně.

Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd (NRSC USDA)



Obrázek 35: Zařazení zeminy dle NRSC USDA (diagram dostupný z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3416&typ=html)

6.5 Stanovení pH a konduktivity výluhu

V laboratoři byla změřena aktivní a výměnná půdní reakce. Aktivní půdní reakce je vyjádřena okamžitou aktivitou volných iontů H^+ a OH^- . Výměnná půdní reakce je charakterizována změnou pH, která je způsobena vytěsněním vodíkových iontů roztokem neutrální draselné sody.

Pro stanovení obou hodnot pH byl použit přístroj s kombinovanou elektrodou (obrázek 36). Aktivní půdní reakce se stanovuje ve vodním roztoku a výměnná půdní reakce ve vodném roztoku KCL.



Obrázek 36: Kombinovaná elektroda

Dále byla změřena konduktivita půdního roztoku, ta vyjadřuje vodivost půdního výluhu. Pro změření byla opět použita kombinovaná elektroda.

Naměřené hodnoty:

- Aktivní půdní reakce: 7,2
- Výměnná půdní reakce: 6,6
- Konduktivita půdního výluhu: 277 $\mu S/cm$

Dle výměnného pH můžeme označit reakci půdy jako neutrální. Z chemického hlediska filtrační vrstva splňuje požadavky normy, která stanovuje hodnotu doporučuje hodnotu filtrační vrstvy v rozmezí 6 až 9, která je uvedena v normě TVN 75 9011 (2013).

6.6 Vegetace pilotních ploch

Výběr vhodných rostlin do pilotních dešťových zahrádek byl konzultován se zahradními architektkami Janou Pyškovou a Terezou Vlasákovou. Na jejich uvážení byl sepsán seznam rostlin, které jsou vhodné do dešťové zahrady.

Příklady doporučených rostlin: *Aster novae angliae*, *Hemerocallis* (Fulva, Flava, Citrina, Lemon bells), *Molinia caerulea*, *Iris Sibirica*, *Euphorbia*, *Palustris*, *Euphorbia amygdaloides*, *Eupatorium Palustris*, *Sanguisorba*.

Celkem byly vybrány 4 druhy rostlin, ty byly použity pro osázení pilotních ploch. Do každé plochy byly zasázeny dva druhy rostlin.



Aster novae angliae
purple dome



Hemerocallis Lemon Bells



Euphorbia amygdaloides



Molinia caerulea

Obrázek 37: Vybrané rostliny (Zdroj: <http://web03.brunns.de/bruns/de/EUR/plants>, (navštíveno 10.5. 2018))

6.7 Založení pilotních ploch

Dvě malé dešťové zahrady byly založeny 14.7. 2017. Jedná se o dvě identické plochy o velikosti 80 × 60 cm, které se liší pouze v osázení rostlinami. Celkem byly testovány 4 druhy rostlin, dva druhy v každé zkušební zahrádce.

Pilotní plochy obsahují dvě vrstvy. Spodní filtrační vrstva o tloušťce 30 cm a svrchní mulčovací vrstva štěrku o tloušťce 5 cm. Pod filtrační vrstvou byl ponechán původní rostlý terén pro přirozené vsakování. Aby bylo zabráněno infiltrování vody z okolí, byla filtrační vrstva od okolní zeminy odizolována pomocí tenkého plechu.

Na obrázku 38 můžeme vidět přípravnou fázi pilotních ploch. Je zde nasypáno 30 cm filtrační vrstvy a zhotovené opláštění.



Obrázek 38: Příprava pilotních ploch

Pro nasypání mulčovací vrstvy byl okolo plošek instalován obrubník z recyklovaného plastu. Poté byly zasázeny vybrané rostliny po třech kusech od jednoho druhu, celkem tedy 12 rostlin.



Obrázek 39: Osázení pilotních ploch rostlinami

V obrázku 39 lze vidět zvolené rostliny a jejich názvy v tabulce 8. Vývoj rostlin byl týdně zaznamenáván měřením výšky každé z rostlin a pořízením fotodokumentace.

Tabulka 8: Vybrané trvalky použité pro osázení pilotních ploch

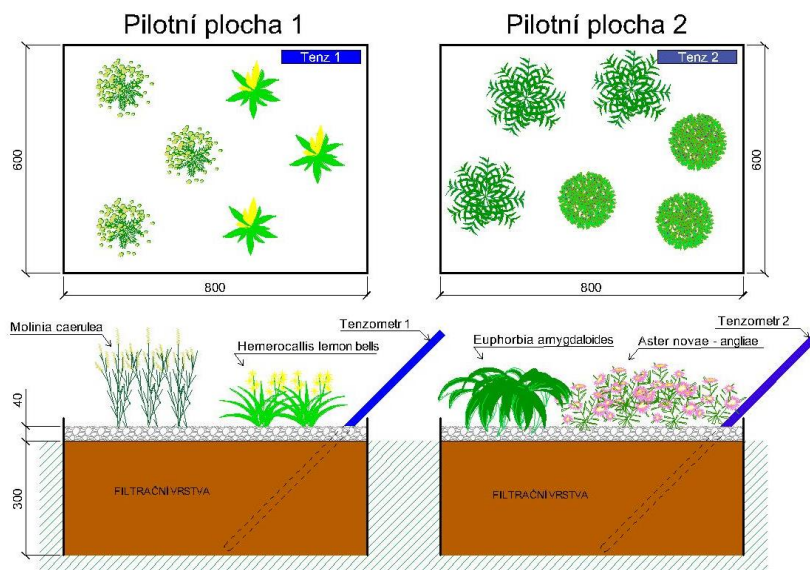
	Pilotní plocha 1	Pilotní plocha 2
1-3	Molinia caerulea (Bezkoleneček modrý)	Euphorbia amygdaloides (Pryšec mandloňovitý)
4-6	Hemerocallis Lemon Bells (Denivka)	Aster novae – angliae Purple Dome (Astra novoanglická)

Po osázení a nasypání mulčovací vrstvy jsou na následující fotografii zachyceny dokončené pilotní plochy (obrázek 40). Vlevo pilotní plocha 1 a vpravo pilotní plocha 2.



Obrázek 40: Pilotní plocha 1 (vlevo) a pilotní plocha 2 (vpravo)

Pro monitorování filtrační vrstvy byly 3.8.2017 aplikovány tenzometry pro měření sacího tlaku a teploty. Jejich umístění, schéma půdorysu a řez plochami je znázorněn na obrázku 41.



Obrázek 41: Schéma půdorysu a řezu pilotních ploch

6.8 Zavlažování

Dešťové zahrady byly zalévány takovým množstvím vody, které je desetkrát větší než skutečná srážka. Jak již bylo zmíněno, jsou schopné odvádět vodu z plochy, která je až desetkrát větší než jejich samotná plocha.

Závlaha probíhala jednou týdně. Z dat dostupných na ČHMÚ byly zjištěny údaje za posledních deset let pro období červenec až září. Pro toto období byla vypočtena průměrná srážka a následně hodnota objemu týdenní závlahy. Pomocí srážkoměru byla určena velikost srážky za konkrétní týden, o kterou se pak redukovala vypočtená průměrná týdenní závlaha. Bylo tak dosažen stejného objemu zalévání každý týden.

V tabulce 9 jsou uvedeny měsíční srážkové úhrny za posledních 10 let pro měsíc červenec, srpen a září pro Prahu a Středočeský kraj.

Tabulka 9: Měsíční srážkové úhrny za období červenec-září (zdroj: ČHMÚ)

Srážkový úhrn (mm)											
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Průměr
červenec	78	73	95	98	154	113	46	94	28	95	87,4
srpen	73	65	44	153	72	81	106	64	70	32	76,0
září	87	22	16	86	43	42	52	85	20	39	49,2

Z těchto údajů byla vypočtena hodnota průměrné měsíční srážky. Průměrná měsíční srážkový úhrn 70,9 mm za měsíc.

Postup výpočtu objemu vody, kterým bude zaléváno 1krát týdně:

Plocha záhonku: 48 dm²

$$V = 0,709 \cdot 48 = 34,032 \text{ l}$$

Množství vody, které by napršelo na jednu pilotní plochu za měsíc je 34,032 l. Toto množství bylo vynásobeno 10 a vyděleno 4 (počet týdnů).

$$S = 34,032 \cdot \frac{10}{4}$$

$$S = 85,08 \text{ l}$$

Při zavlažování pilotních dešťových zahrádek bylo dosaženo objemu vody 85 l každý týden.

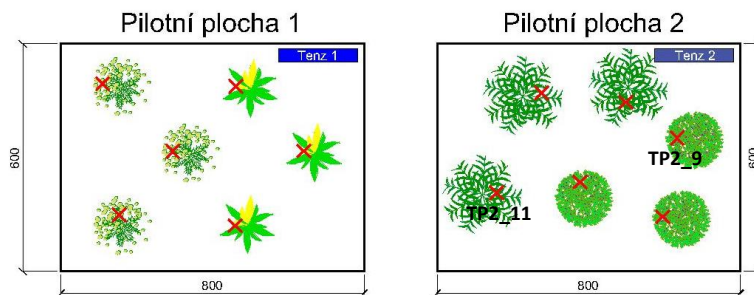
6.9 Infiltrační experiment na vzorcích z pilotních ploch

Ve Švýcarsku v institutu PSI (Paul Scherrer Institut) byly provedeny infiltrační experimenty pro odebrané vzorky z pilotních dešťových ploch. Průběh infiltračního experimentu byl snímkován neutronovými a rentgenovými paprsky na stanovišti ICON.

6.9.1 Odběr vzorků

Z pilotních plošek byly odebrány vzorky po dvou měsících po osázení rostlinami. Cílem bylo zjistit vliv kořenů rostlin na vývoj půdní struktury v dešťových zahradách. Pro porovnání byly manuálně vytvořeny vzorky ze zeminy použité ve filtrační vrstvě zhutněné do válečků. Odběrné válečky o průměru 2,9 cm byly vyrobené z hliníku. Vzorky byly odebrány v kořenové zóně rostlin, přibližně 10 cm pod povrchem. Na obrázku 42 jsou vyznačená místa odběru, u každé rostliny byl odebrán jeden vzorek.

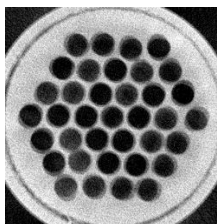
Na vzorcích TP2_9 a TP2_11 byly provedeny infiltrační experimenty, jejich průběh byl zaznamenáván neutronovým a rentgenovým snímkováním, které je popsáno v další kapitole. Pro porovnání vývoje půdní struktury a změny hydraulických charakteristik byly snímkovány ještě dva uměle vytvořené vzorky (TP1_2, TP1_4).



Obrázek 42: Schéma odběru vzorků

6.9.2 Příprava vzorků

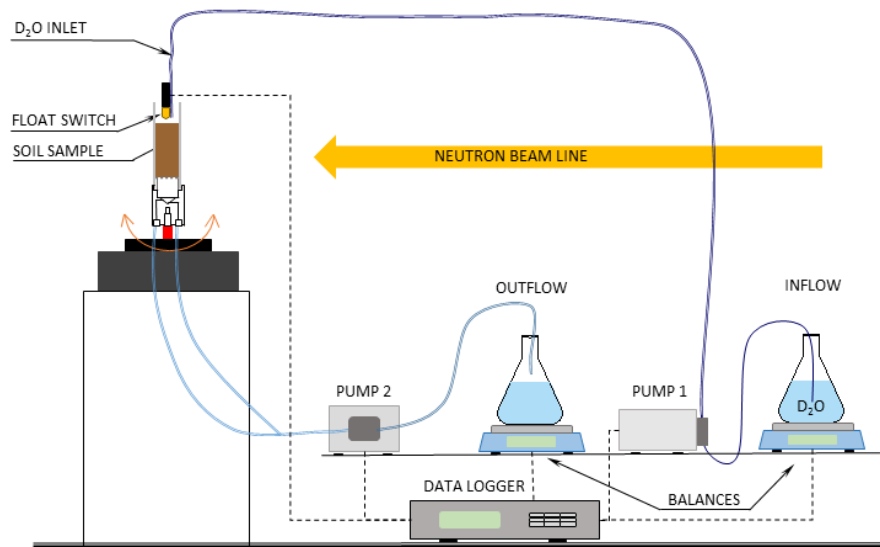
Odebrané a uměle vytvořené vzorky RG byly vysušeny v exsikátoru, jako vysoušecí činidlo byl použit chlorid draselný. Vzorky byly zváženy pro získání hmotnosti sušiny. Do spodní části vzorků byla aplikována perforovaná hliníková destička (obrázek 43) s jemnou sítkou proti vyplavování malých částic půdy během infiltrace, viz obrázek získaný z rentgenového snímkování. Aby voda neměla tendenci proudit kolem stěn, byly vzorky obsypány jemnými teflonovými pilinami. Teflon ve vodě nevyplave na hladinu, proto je vhodným materiálem.



Obrázek 43: Perforovaná destička

6.9.3 Popis experimentu

Na každém vzorku byly simulovány dvě srážkové epizody s trojúhelníkovým průběhem. Druhá epizoda započala 30 minut po skončení první, během této doby docházelo pouze ke gravitační drenáži. Srážkové epizody měly trvání 15 minut a maximální intenzitu 25,73 mm/min. Nad vzorkem bylo umístěno optické hladinové čidlo, které udržovalo hladinu výtopy na maximální hodnotě 1,5 cm. V případě kontaktu vodní hladiny s čidlem byl přítok vody pozastaven. Vzorek byl umístěn na otočném podstavci. Směr rotace se měnil po každém dokončení otáčky. Schéma experimentu je na obrázku 44. Hodnoty přítoku a odtoku byly zjištěny pomocí změny hmotnosti vody v nádobách. Experiment byl řízen programem v dataloggeru CR3000, který zároveň zaznamenával všechny naměřené hodnoty.

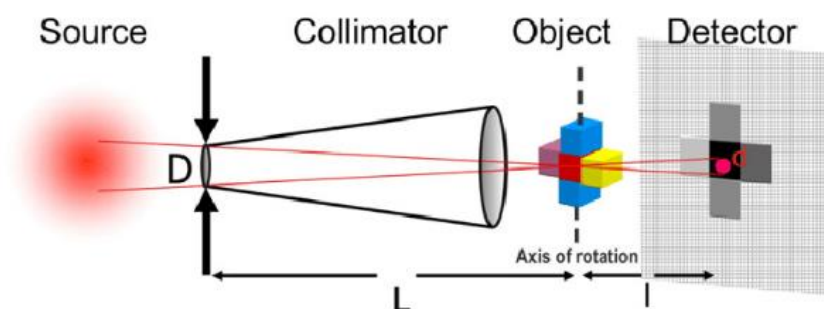


Obrázek 44: Schéma měřící sestavy

7. SLEDOVÁNÍ CHARAKTERU PROUDĚNÍ VODY V MATERIÁLECH DEŠŤOVÉ ZAHRADY

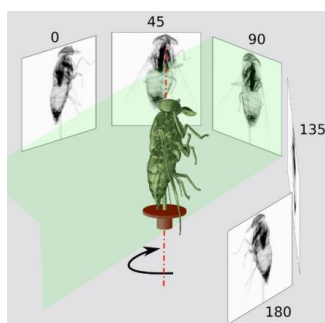
K zachycení procesů uvnitř vzorků byly použity dvě nedestruktivní zobrazovací metody, jejichž výhoda spočívá v tom, že nepoškozují vnitřní strukturu vzorků. Jedná se o neutronové a rentgenové snímkování.

Neutronové snímkování využívá neutrony k prozařování hmotných objektů (obrázek 45). Průchodnost neutronů materiálem závisí na vlastnostech jader atomů materiálů. Neutrony snadno procházejí například materiály jako je hliník (vzorek půdy byl odebrán do hliníkového válečku). Naopak velmi málo prochází lehkou vodou (na rozdíl od těžké vody – D_2O) a organickým materiálem. Paprsek neutronů, který projde vzorkem, dopadá na detektor, kde jsou snímány intenzity, jejichž hodnota je určena utlumením (atenuací) neutronového paprsku.



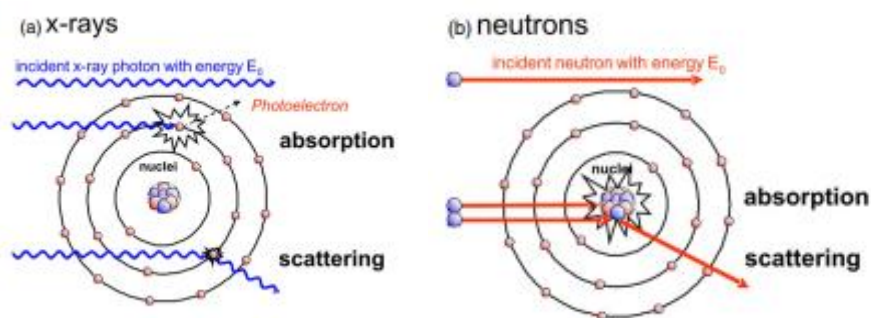
Obrázek 45: Princip snímkování neutronové metody (Strobl et al., 2009)

Snímky pořízené na detektoru se nazývají radiogramy. Vzorek se postupně otáčí o konstantní úhel a je pokaždé snímován, ze souboru pořízených radiogramů lze poté pomocí rekonstrukce vytvořit 3D model obrazu. Na obrázku 46 je zobrazeno snímkování objektu s krokem 45° , při snímkování vzorků dešťové zahrady byl použit krok $1,2^\circ$.



Obrázek 46: Rotující objekt snímkaný neutronovým paprskem pod různým úhlem (<https://www.psi.ch/niag/neutron-tomography>)

Rentgenové snímkování využívá paprsků fotonů, jejichž průchodnost vzorkem je závislá na hustotě materiálů, kterými prochází. Je to způsobeno tím, že fotony v paprsku reagují s elektronovým obalem atomu (obrázek 47).



Obrázek 47: Interakce částic v paprsku s atomem (Strobl et al., 2009)

V této práci byly použity vzorky obsahující pevné půdní částice, vodu v pórech a kořeny rostlin, tudíž je vhodné použít obě metody snímkování a získané informace zkombinovat, jak je popsáno v článku Kaestnera et al. (2017).

7.1 Snímkování na pracovišti ICON

Snímkování bylo provedeno ve Švýcarsku v PSI (Paul Scherrer Institut) u Villigenu na stanovišti ICON (Kaestner et al., 2011). ICON je pracoviště využívající chladné neutrony. Zdrojem neutronů je SINQ (Spallation Neutron Source), kde neutrony vznikají při spalačních reakcích. Jejich vznik je způsoben dopadem rychlého protonu, který získal rychlost v urychlovači částic, na terčích s těžkými jádry. Dojde k jaderné štěpné reakci, při které vzniká 10-20 rychlých neutronů. Tyto neutrony mají příliš vysokou energii, proto musí být zpomaleny, k čemuž slouží moderátor. Jako moderátor v ICONu je použita těžká voda. Charakteristiky neutronového paprsku v ICONu jsou uvedeny v tabulce 10, včetně rozlišení dosaženého pro snímky použité v této práci.

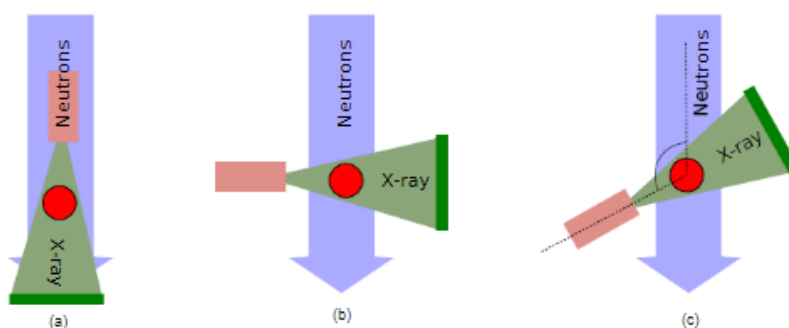
Tabulka 10: Charakteristiky pracoviště ICON pro neutronové snímkování (zdroj: <https://www.psi.ch/>, navštíveno 10.5. 2018)

Průměrná energie neutronů	8,53 meV
Maximální velikost snímku	250 × 250 mm
Maximální rozlišení	20,3 μm
Použité rozlišení	61 μm

Chladné neutrony jsou v ICONu používány, protože na rozdíl od teplých neutronů snižují vliv koherentního rozptylu. I při větších tloušťkách lze dostat při použití chladných neutronů

snímky dobré kvality (Barton, 1965). Pro infiltrační experiment byla používána těžká voda, protože v lehké vodě by byl paprsek neutronů utlumen zcela. Z toho důvodu byly vzorky předpřipraveny v laboratořích ČVUT tím způsobem, že byly syceny párami z těžké vody. Pořízení jednoho tomogramu (otočení o 360°) trvalo 140 s, za tuto dobu bylo nasnímáno 301 projekcí. Pro nejdůležitější vzorky bylo pořízeno 48 tomogramů. Byly získány 32 bitové radiogramy. Pravidelně docházelo k výpadku paprsku, tudíž některé tomogramy nemohly být kvalitně zrekonstruovány, a proto chybí mezi výsledky.

Souběžně s neutronovým snímkováním bylo použito snímkování rentgenovým paprskem. Tento paprsek byl umístěn kolmo na neutronový paprsek, jak je znázorněno na obrázku 48 (b).



Obrázek 48: Možnosti duálního snímkování vzorku (Kaestner et al., 2017)

V tabulce 11 jsou vypsány charakteristiky pro tento paprsek (Kaestner et al., 2017).

Tabulka 11: Charakteristiky ICON pro rentgenové snímkování (Kaestner et al., 2017)

Napětí	40-150 kV
Maximální výkon	75 W
Vrcholový úhel	43°
Použité rozlišení	41 μm

7.2 Zpracování snímků

Radiografické a rentgenové 2D snímky, nasnímané v průběhu infiltračního experimentu pak byly zrekonstruovány pomocí programu MuhRec (Kaestner, 2011). Pro určení množství a distribuce vody ve vzorku byly vzorky upraveny v softwaru Fiji (Schindelin et al., 2012).

Pro možnost dalšího zpracování byly také pořízeny snímky *open beam* a *dark current*. *Open beam* (OB) odpovídá snímkování pozadí bez vzorku při plné expozici a *dark current* (DC) při vypnutém paprsku. Bylo pořízeno několik snímků, které byly zprůměrovány.

7.2.1 Určení množství vody ve vzorku

Analýza výsledků neutronového snímkování používá Lambert-Beerovu rovnici, která vyjadřuje nakolik se sníží intenzita neutronového paprsku po průchodu materiálem.

$$I = I_0 e^{-d\Sigma} \quad (15)$$

I_0 = intenzita neutronového paprsku před průchodem vzorkem

I = intenzita neutronové paprsku po průchodu vzorkem

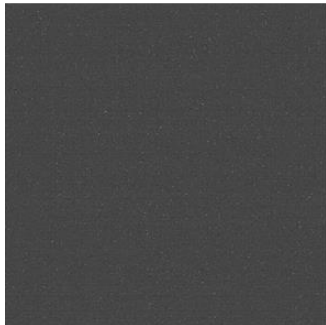
Σ = atenuační koeficient

d = tloušťka materiálu kterým prošel paprsek

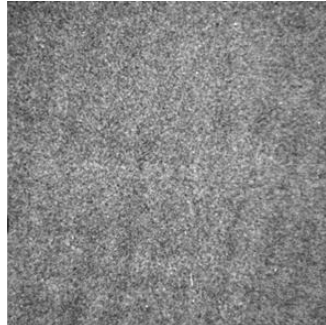
Normalizace snímků proběhla podle rovnice, která vznikla modifikací Lambert-Beerova zákona (Kaestner et al., 2008):

$$I_n = \frac{I_0 - I_{DC}}{I_{OB} - I_{DC}} = e^{-d\Sigma} \quad (16)$$

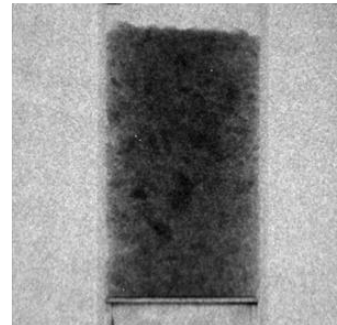
a) *Dark current* I_{DC}



b) *Open beam* I_{OB}



c) Původní tomogram I_0



Obrázek 49: Pořízené snímky a) open beam, b) dark current, c) původní tomogram tomogram

Po získání normalizovaného snímku byly v programu Fiji odstraněny odlehlé hodnoty. Z rovnice 17 byl vyjádřen celkový součin atenuačního koeficientu a tloušťky materiálu, kterým prošel paprsek.

$$\Sigma d = -\ln \frac{I_0 - I_{DC}}{I_{OB} - I_{DC}} \quad (17)$$

Postup úpravy snímků ve Fiji:

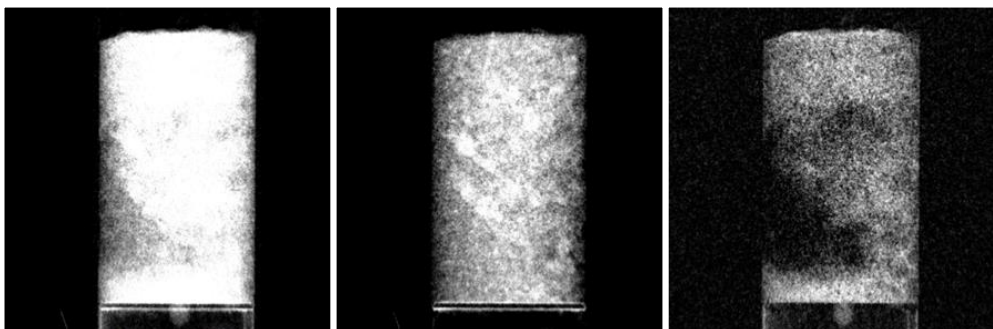
1. Od původního snímku byl odečten snímek *dark currentu*.
2. Od snímku *open beam* byl odečten snímek *dark currentu*.
3. Snímek z kroku 1 byl podělen snímkem z kroku 2.
4. Odstranění odlehlých hodnot pomocí filtru.
5. Normalizace přes průměrnou hodnotu získanou ve vybrané oblasti na pozadí. Touto hodnotou je podělen celý snímek.
6. Výsledný snímek byl zlogaritmován a vynásoben -1.

Pro stanovení množství vody ve vzorku byly použity tyto úpravy pro snímky suchého vzorku, který byl snímkován před začátkem infiltrace a snímky vlhkého vzorku z průběhu infiltrace. K tomu byl použit tento vztah:

$$\sum_{wt} d_{wet} - \sum_{dry} d_{dry} = \sum_w d_w \quad (18)$$

Kde \sum_{wt} , \sum_{dry} je průměr atenuačního koeficientu suchého a vlhkého vzorku a d_{wet} (cm) je tloušťka vlhkého vzorku a d_{dry} (cm) je tloušťka suchého vzorku. Po odečtení upravených snímků pro suchý vzorek od upravených snímků vlhkého vzorku byl získán snímek zobrazující hodnoty $\sum_w d_w$.

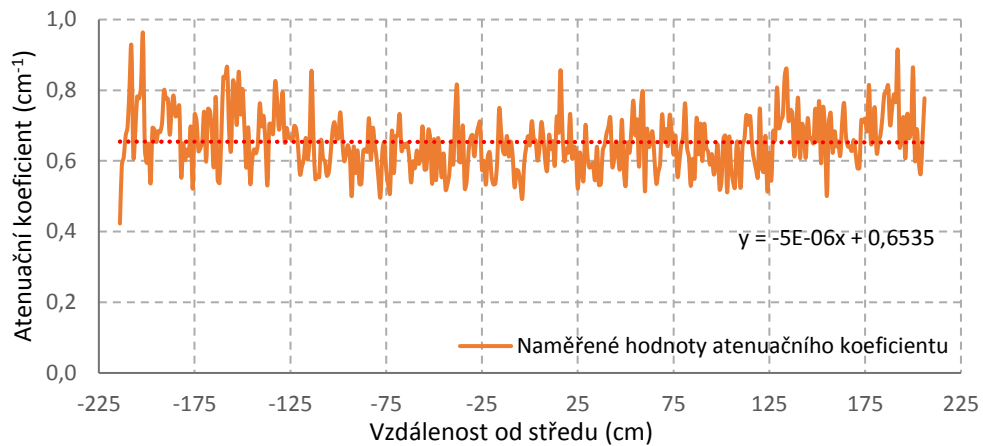
Na obrázku 50 jsou zobrazeny snímky zobrazující hodnoty $\sum d$ pro suchý a vlhký vzorek a pro samostatnou vodu pro vzorek TP1_2.



Obrázek 50: Suchý vzorek (vlevo), vlhký vzorek (uprostřed), distribuce vody (vpravo)

Pro určení atenuačního koeficientu byla použita oblast, kde nastala výtopa, tudíž byla známa tloušťka vody v těchto místech (obrázek 51). Tloušťka se rovnala délce tětiny v kružnici

o průměru 2,9 cm. Získaná hodnota atenuačního koeficientu je 0,65. Poté mohly být výsledné snímky poděleny touto hodnotou, čímž se získala tloušťka vody v každém pixelu.



Obrázek 51: Průběh vypočtených hodnot atenuačního koeficientu

Z těchto snímků lze zjistit množství vody ve vzorku pomocí této rovnice. Objemy vypočtené z neutronových snímků byly porovnány s gravimetrickou metodou.

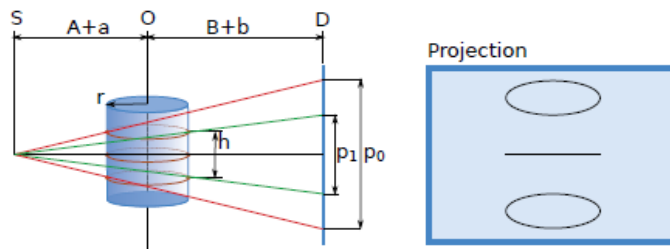
$$V = \sum_{x=1}^D \sum_{y=1}^H d_w a^2 = \overline{d_w} A a^2 \quad (19)$$

7.2.2 Práce s programem MuhRec

Prvním krokem při rekonstrukci rentgenových nebo neutronových snímků je načtení vstupních radiogramů, OB a DC. Dále je nutné zadat počet kroků a úhel natočení prvního a posledního radiogramu. Musí být vybrána oblast pozadí a rekonstrukce. Pro získání kvalitních snímků z rekonstrukce je důležité najít správnou polohu a naklonění osy rotace. Při rekonstrukci byla použita zpětná projekce.

Program MuhRec pracuje s několika filtry. Při rekonstrukci neutronových radiogramů byl jako první použit filtr *FullLogNorm*, který popisuje Lambert-Beerův zákon. Filtr je určený k odstranění nežádoucích jevů vzniklých při pořizování snímků. Pro získání atenuačního koeficientu a množství vody ve vzorku byly vzorky upravovány ručně v softwaru FIJI, nebylo tedy nutné při rekonstrukci používat filtr *FullLogNorm*. *Spotclean* filtr byl použit pro odstranění nežádoucích skvrn a artefaktů na snímcích. Jako poslední filtr byl použit *ProjectionFilterSingle*. Aplikuje ramp-filtr kombinovaný s apodizačním filtrem.

Ve většině případů se neutronový paprsek považuje za paralelní a k rekonstrukci stačí určit osu rotace a úhel natočení. Rentgenové paprsky na rozdíl od neutronových mají kuželovitý tvar. Pro správnou kalibraci rekonstrukce je nutné před začátkem snímání určit vzdálenost mezi zdrojem a detektorem (SOD, SDD). Vzdálenosti SOD a SDD (obrázek 52) se měří pomocí laserových snímačů vzdálenosti umístěných na zdroji a detektoru. (Kaesner et al, 2017)

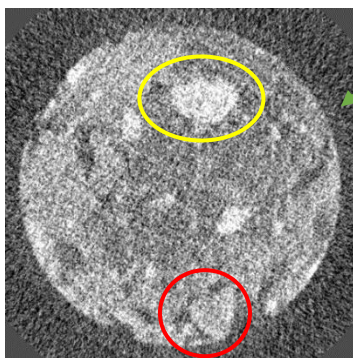


Obrázek 52: Geometrie kuželového paprsku (Kaesner et al, 2017)

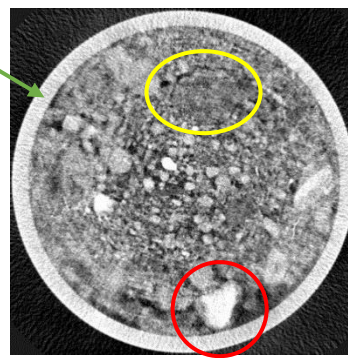
Pro rekonstrukci rentgenových snímků byl použit opět filtr *FullLogNorm* a *ProjectionFilterSingle*. Pro odstranění nežádoucích skvrn a artefaktů byl zvolen filtr *MorpSpotClean*.

Zrekonstruované tomogramy byly vyexportovány ve formě 2D horizontálních 32 bitových snímků. Na snímcích 53a) a 53b) jsou vyznačené charakteristické rozdíly při zobrazování jednotlivých materiálů. Půda je heterogenní materiál, tudíž kombinace rentgenových a neutronových paprsků je užitečná. V případě neutronového snímku je žlutě označen pravděpodobně agregát půdy nasycený vodou, který na rentgenovém snímku není viditelný. Červenou barvou je vyznačena poloha kamene. V případě rentgenového snímku má vysokou intenzitu, zatímco v případě neutronového snímku není jasně definován.

a) Neutronový 2D snímek



b) Rentgenový 2D snímek



Obrázek 53: Zrekonstruované horizontální 2D řezy, vyznačeno: žlutá – agregát nasycený vodou, červená – kámen, zelená – hliníkový váleček

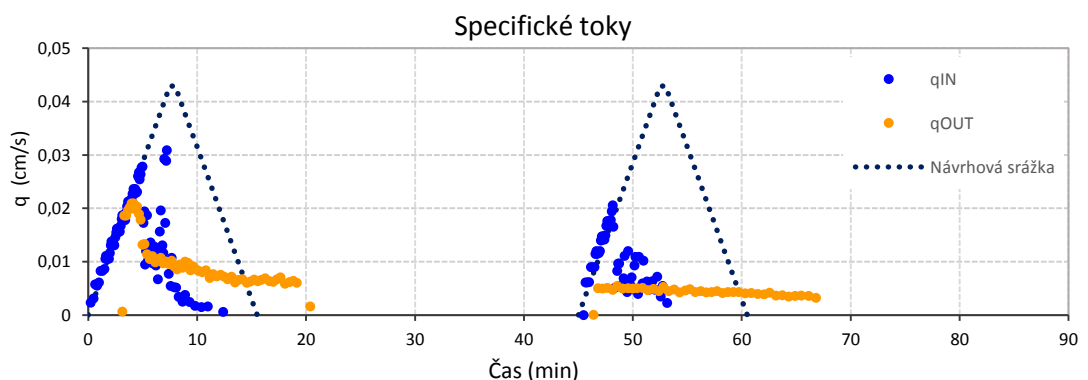
7.3 Výsledky infiltračních experimentů

Z výsledků infiltračních experimentů byl vytvořen graf specifických toků. Průběhy infiltračních experimentů byly vyhodnocovány dvěma metodami. Hodnoty pro gravimetrickou metodu byly získány z dat zaznamenaných vážením. Na dvou vahách byly umístěny nádoby, jedna pro přítok vody do vzorku a druhá pro sběr odtoku. Změny hmotnosti byla zaznamenány do dataloggeru. Z těchto dat byl pro každý vzorek vytvořen graf specifických toků pro přítok a odtok vody a po odečtení těchto dvou hodnot byl zjištěn aktuální objem vody ve vzorku včetně výtopy, která u vzorku byla nastavena přibližně na 1,5 cm. Při výpočtu byl pro odtok zohledněn čas dotoku. V případě přítoku byla hadička vždy naplněná, proto byla reakce okamžitá, naopak v případě odtoku byla hadička prázdná, což se právě projevilo zpožděním o dobu přibližně 38 s.

Jako druhá metoda pro zjištění objemu vody ve vzorku byla použita analýza neutronových snímků (viz 7.2.1). Na neutronových snímcích je omezená zobrazovací plocha, proto není zachycena celá výtopa. Proto je množství vody ve vzorku získané pomocí analýzy vzorků shora omezené. V době drenáže je vidět, že se hodnoty u obou metod téměř rovnají.

TP1_2

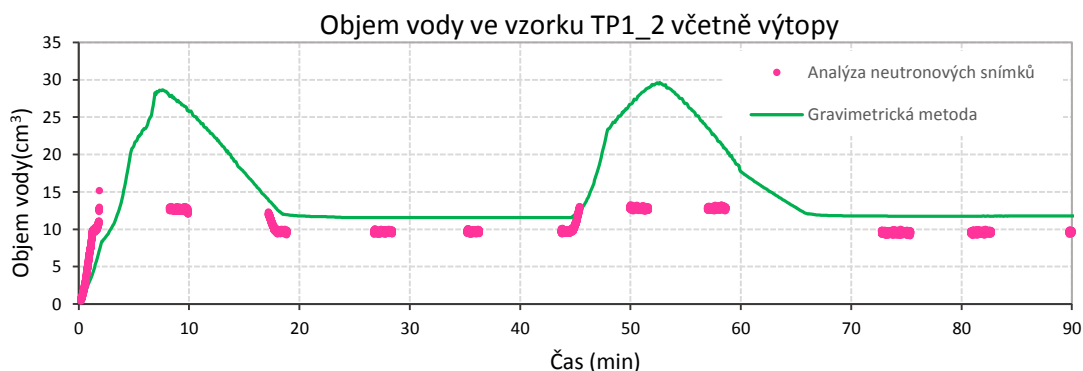
V průběhu obou infiltrací docházelo brzo k výtopě, a to ještě před dosažením maximální intenzity návrhové srážky. Při první infiltraci nastal odtok po necelých pěti minutách od začátku srážky. Maximální hodnoty specifického přítoku i odtoku byly při druhé infiltraci nižší. Odtok dříve než při první infiltraci, po necelých 2 minutách.



Obrázek 54: Specifické toky vzorku TP1_2

Na obrázku 55 je zobrazena bilance vody ve vzorku, včetně výtopy. Neutronové analýzy jsou mírně podhodnocené oproti gravimetrické metodě. Po ukončení odtoku po první srážce

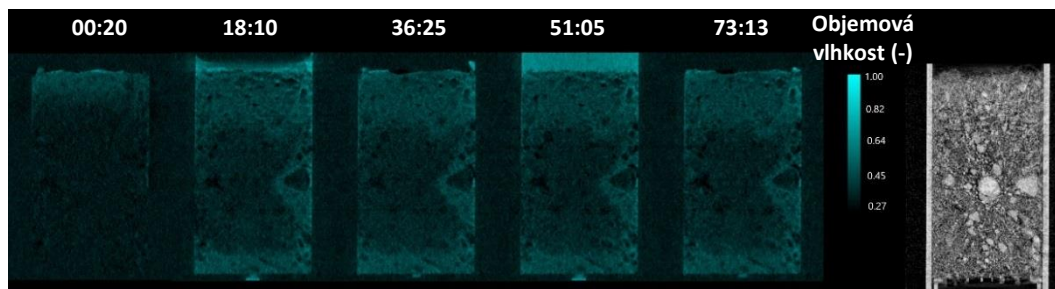
bylo množství vody ve vzorku konstantní o hodnotě 10 cm³ (analýza snímků) resp. 12 cm³ (gravimetrická metoda). Po ukončení druhé infiltrace je dosaženo stejné hodnoty objemu vody.



Obrázek 55: Objem vody ve vzorku

Postup čela zvlhčení je zpočátku infiltrace rovnoměrný. Nicméně konečná distribuce vlhkosti je nerovnoměrná, v řezu s převahou vody na pravé části, kde obtéká kamínek, nicméně na rentgenovém snímku v tomto místě není vidět odlišnou strukturu oproti ostatním částem vzorku.

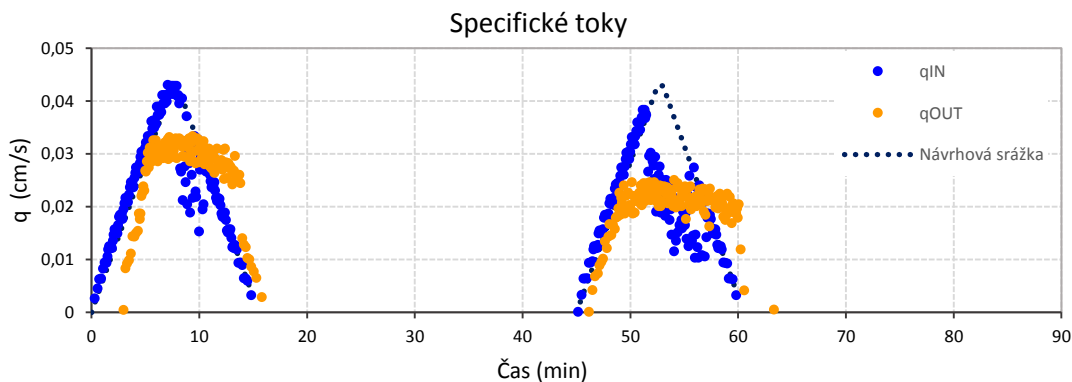
Distribuce vody v řezu v průběhu infiltrace ve vzorku TP1_2



Obrázek 56: Distribuce vody ve vzorku TP1_2

TP1_4

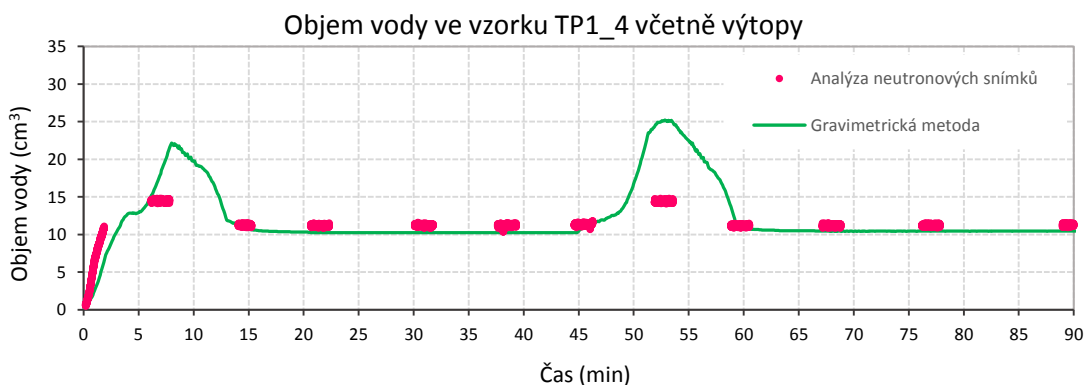
Na obrázku 57 je vidět, že vzorek TP1_4 byl schopen převést a pojmout vysoké hodnoty srážky, kdy první skutečná srážka dosáhla maxima. Při druhé infiltraci byl přítok i odtok o málo nižší. Průběhy obou infiltrace jsou v případě TP1_4 podobné.



Obrázek 57: Specifické toky vzorku TP1_4

Maximální hodnoty odtoku jsou nejvyšší ze všech 4 sledovaných vzorků v první i druhé infiltraci. Po začátku druhé infiltrace odtok nastal téměř okamžitě.

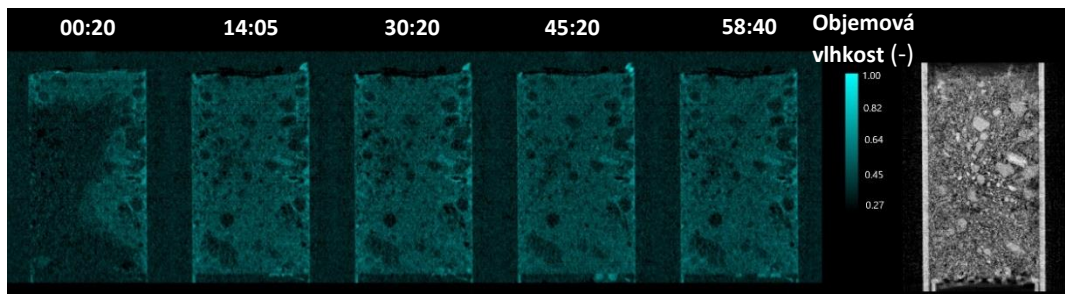
Množství vody během gravitační drenáže po obou infiltracích je téměř shodné při určení oběma metodami. Objem vody držený kapilárními silami je 10 cm^3 . Lze si také všimnout, že v tomto případě je konstantní hodnoty objemu vody ve vzorku dosaženo ihned po skončení srážky.



Obrázek 58: Objem vody ve vzorku TP1_4

Z průběhu sycení vodou lze vidět, že distribuce vody ve vzorku je rovnoměrná. Z toho by se dalo usuzovat, že voda je ve vzorku držena výhradně kapilárními silami.

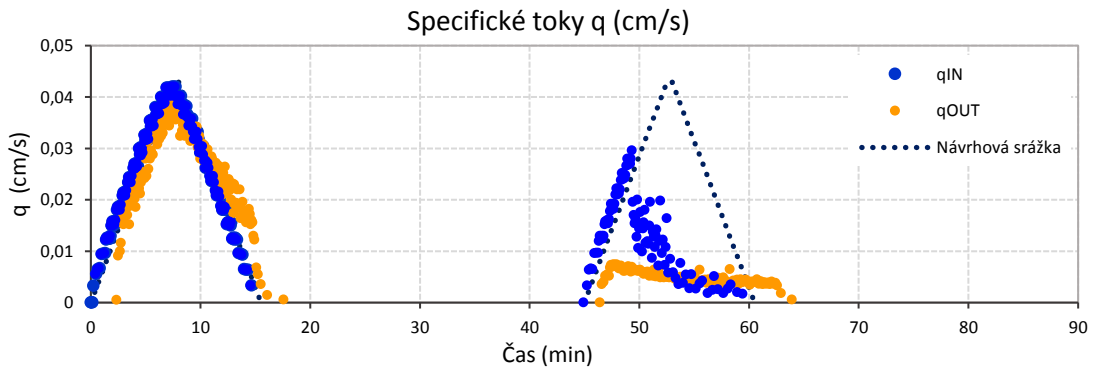
Distribuce vody v řezu v průběhu infiltrace ve vzorku TP1_4



Obrázek 59: Distribuce vody ve vzorku TP1_4

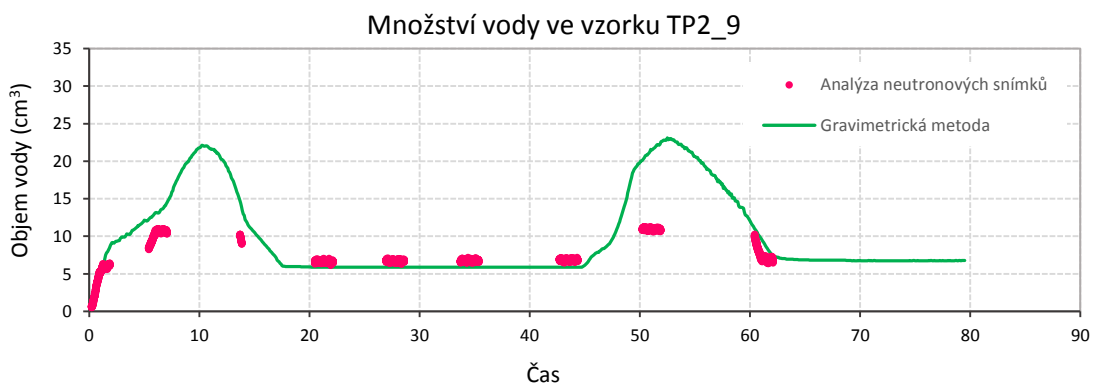
TP2_9

V tomto vzorku z odběru po dvou měsících docházelo při první infiltraci k přítoku, který je téměř shodný s návrhovou srážkou a odtok jej téměř kopíruje. Ovšem při druhé infiltraci do vzorku přiteklo mnohem méně vody a odtok byl také zřetelně nižší.



Obrázek 60: Specifické toky zorku TP2_9

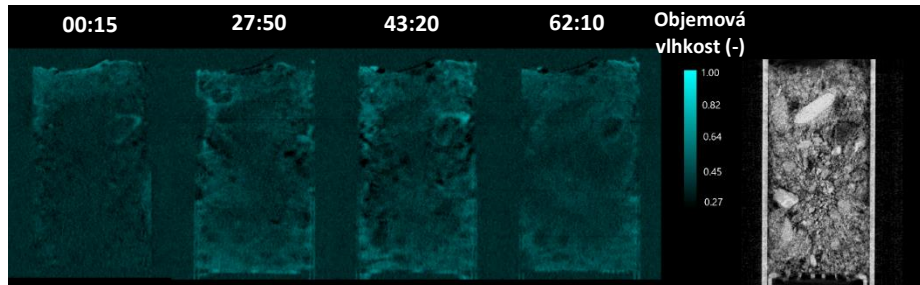
Množství vody během gravitační drenáže po obou infiltracích je téměř shodné při určení oběma metodami. Objem vody držený kapilárními silami je 5 cm^3 .



Obrázek 61: Objem vody ve vzorku TP2_9

Z řezů je vzorku je vidět, že voda teče hlavně podél stěn, na rentgenovém snímku je vidět malá mezera mezi vzorkem a stěnou. Při druhé infiltraci mohlo dojít k zaplavení preferenčních cest jemnými částicemi, z důvodu rychlého průtoku vody vzorkem.

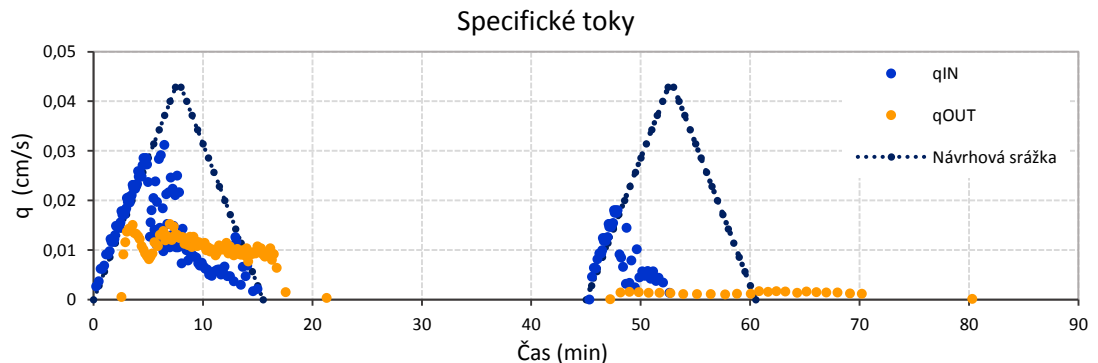
Distribuce vody v řezu v průběhu infiltrace ve vzorku TP2_9



Obrázek 62: Distribuce vody ve vzorku TP2_9

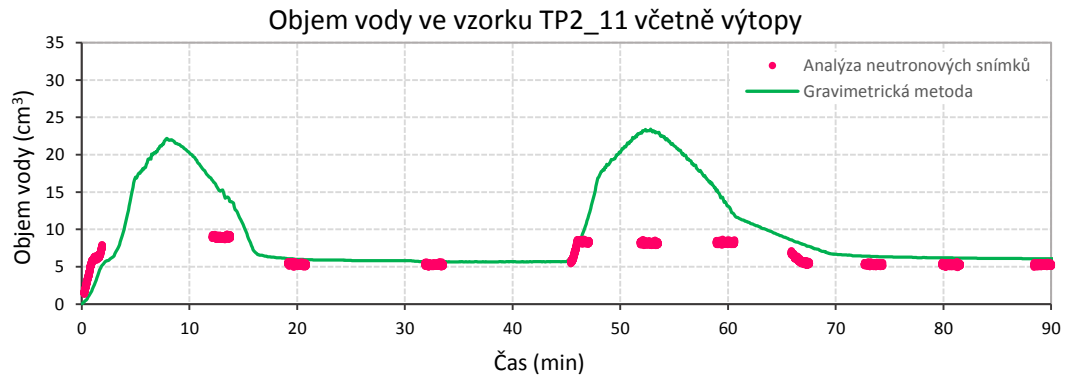
TP2 11

Při první infiltraci do vzorku zasáhla srážka o maximální intenzitě 0,03 cm/s a odtok nastal po 2,5 minutách od začátku infiltrace. V případě druhé srážky je maximální intenzita odvedené srážky menší než v první infiltraci. Odtok při druhé infiltraci započal 2 minuty po zahájení deště a byl prokazatelně nižší než při první infiltraci.



Obrázek 63: Specifické toky vzorku TP2_11

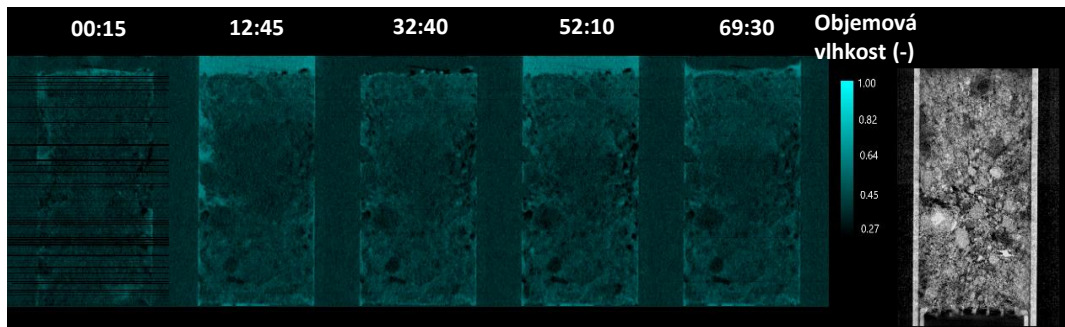
Množství vody během gravitační drenáže po obou infiltracích je téměř shodné při určení oběma metodami. Objem vody držený kapilárními silami je 5 cm³.



Obrázek 64: Objem vody ve vzorku TP2_9

Z následujících řezů lze vidět, že ve vzorku je větší množství gravitační vody, která je ve vzorku přítomna pouze v době přítoku. Během drenáže všechna gravitační voda odteče, což se projeví tím, že je zadrženo pouze poloviční množství (5 cm^3) než u vzorků TP1_2 a TP1_4.

Distribuce vody v řezu v průběhu infiltrace ve vzorku TP2_11



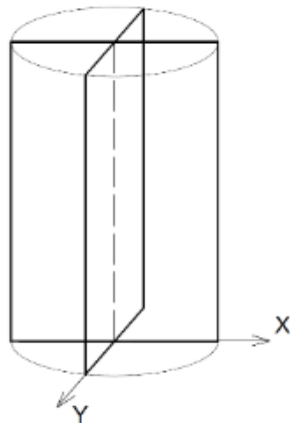
Obrázek 65: Distribuce vody ve vzorku TP2_11

7.4 Struktura vzorků

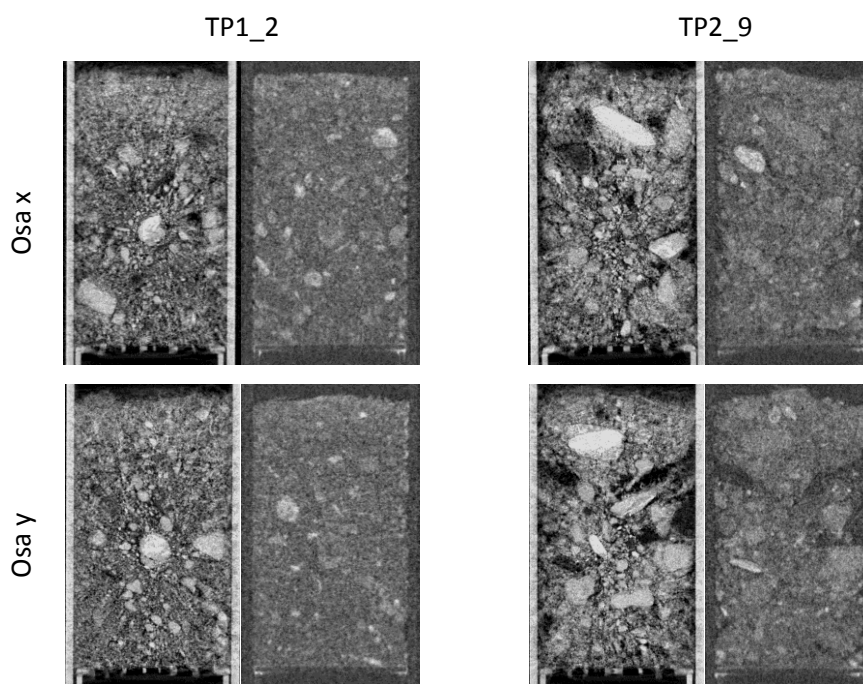
Na obrázcích 67 a 68 jsou zobrazeny dva na sebe kolmé vertikální řezy podle osy x a y , viz obrázek 66. Pro lepší přehlednost jsou v levém sloupci umístěny vzorky z 1. odběru a ve sloupci vpravo vzorky odebrané. Pro každý řez je uveden jak rentgenový snímek, kde je struktura půdy lépe viditelná, tak i neutronový.

V případě odebraných vzorků lze vidět větší a četnější výskyt makropórů. Tyto makropóry jsou ideálními cestami pro preferenční proudění. Voda v makropórech není vázaná kapilárními silami, proto při gravitační drenáži jednoduše odteče, což bylo vidět například na obrázku 65. Není jasné, zda tyto makropóry vznikly přirozenou cestou nebo při odběru vzorků. V tuto chvíli odpověď není zřejmá, avšak v odběrech se bude pokračovat se zlepšenou metodikou, aby bylo dosaženo reprezentativní sady vzorků pro další přesnější analýzu.

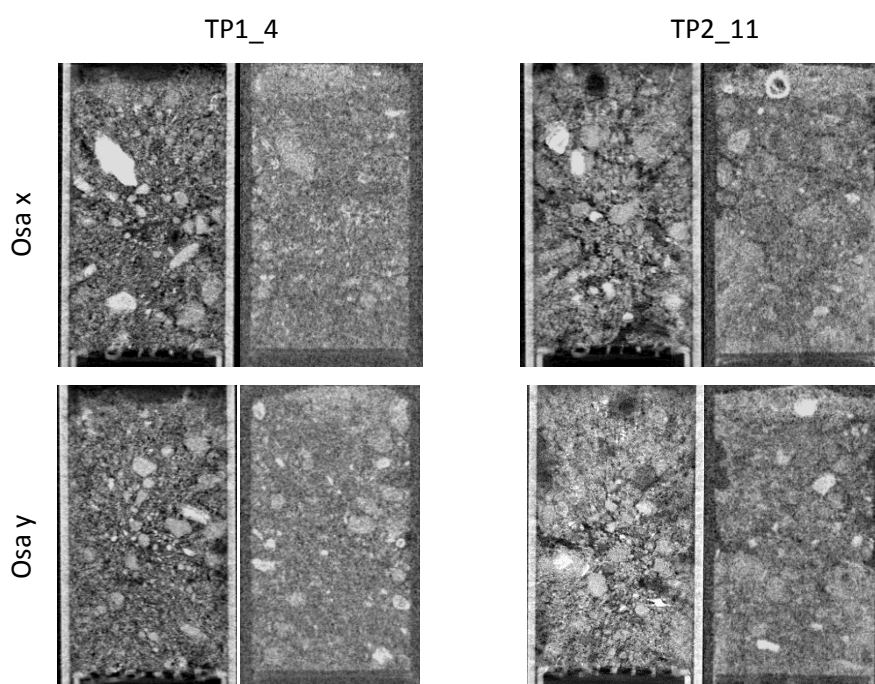
Vzorky před zakořeněním rostlin (uměle vytvořené v laboratoři) mají viditelně kompaktnější půdní strukturu s malými nepropojenými makropóry.



Obrázek 66: Vertikální řezy x a y



Obrázek 67: Dva na sebe kolmé řezy středem vzorku pro TP1_4 s TP2_11. Levý snímek v páru odpovídá rentgenovému snímku, pravý snímek odpovídá neutronovému snímku.

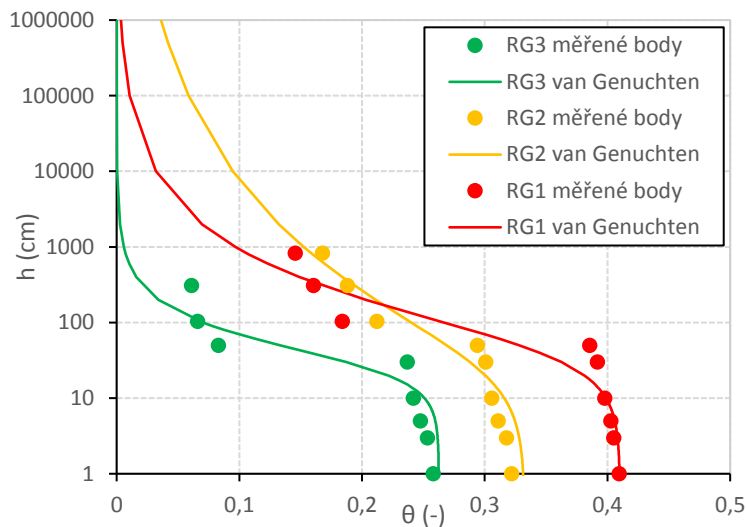


Obrázek 68: Dva na sebe kolmé řezy středem vzorku pro TP1_4 s TP2_11. Levý snímek v páru odpovídá rentgenovému snímku, pravý snímek odpovídá neutronovému snímku.

8. VYHODNOCENÍ PILOTNÍCH PLOCH

8.1.1 Výběr materiálů na základě hydraulických charakteristik

Výběr zeminy proběhl na základě zjištěných hydraulických charakteristik a požadovaného složení. Jako filtrační vrstva byla zvolena zemina smíchaná z 50 % písku, 30 % kompostu a 20 % ornice. Pro pilotní plochy i finální dešťové zahrady byla použita travníková směs z kompostárny Jena, nedaleko Buštěhradu, která má požadované složení. V obrázku 69 jsou zobrazeny výsledné retenční čáry měřené na třech vzorcích.



Obrázek 69: Retenční čára pro použitou směs

Průměrná hodnota plného nasycení je 0,33. Do dosažení sacího tlaku 50 cm je pokles vlhkosti jen velmi nízký. Při dalším zvyšování sacího tlaku dochází k prudkému poklesu vlhkosti vzorku, ale při zvýšení sacího tlaku nad 100 cm je další drenáž opět pomalá.

Tabulka 12: Nasycená hydraulická vodivost

	K_s ($m \cdot s^{-1}$)		
Směs 1b	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$

Výsledná hydraulická vodivost odpovídá požadavkům, které má splňovat filtrační vrstva zasakovacího objektu typu průleh-rýha s regulovatelným odtokem. Minimální hodnota K_s dle normy TVN 75 9011 (2013) je $10^{-5} m \cdot s^{-1}$.

8.1.2 Vývoj vegetace testovacích ploch

Vývoj vegetace byl zaznamenán fotodokumentací a měřením výšky rostlin jednou týdně. V následující sérii obrázků je záznam z průběhu 8 týdnů růstu vegetace. Je zřejmé, že

nejlépe se dařilo trvalce Aster novae-angliae.

- 7.8. 2017



Obrázek 70: Rostliny v den založení

- 13.9. 2017



Obrázek 71: Vývoj rostlin po 5 týdnech

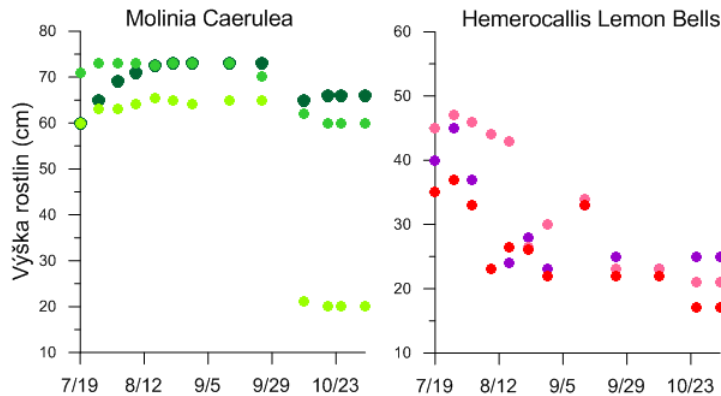
- 25.10. 2017



Obrázek 72: Vývoj rostlin po 2,5 měsících od založení

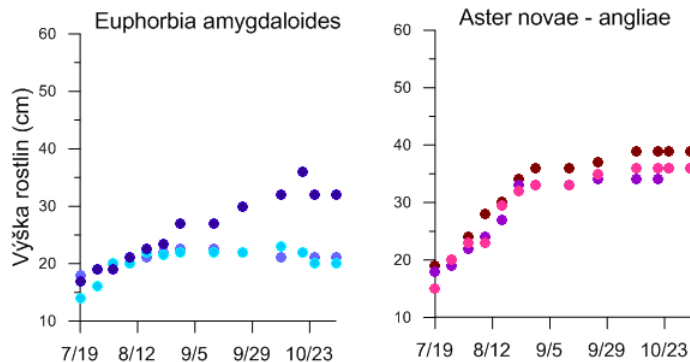
V obrázcích 73 a 74 je zobrazené výška rostlin v průběhu pozorovacího období. V pilotní ploše obě rostliny splňovaly požadované podmínky. Pokles výšky Hemerocallis Lemon Bells je

způsoben odpadnutím květů, její výška se potom už měřila pouze po její listy. V případě Molinii Caerulei došlo ke zlomení klasů v průběhu října.



Obrázek 73: Výška rostlin v průběhu sledovacího období pro pilotní plochu 1

Na pilotní ploše 2 je vidět ze záznamu výšek rostoucí trend pro všechny tři rostliny Aster novae-angliae. V případě Euphorbia amysgladoides je tomu naopak, růst je zaznamenán pouze u jedné rostliny. Je možné, že ostatní dvě byly napadeny škůdci, což mohlo být důsledkem jejich úhynu.

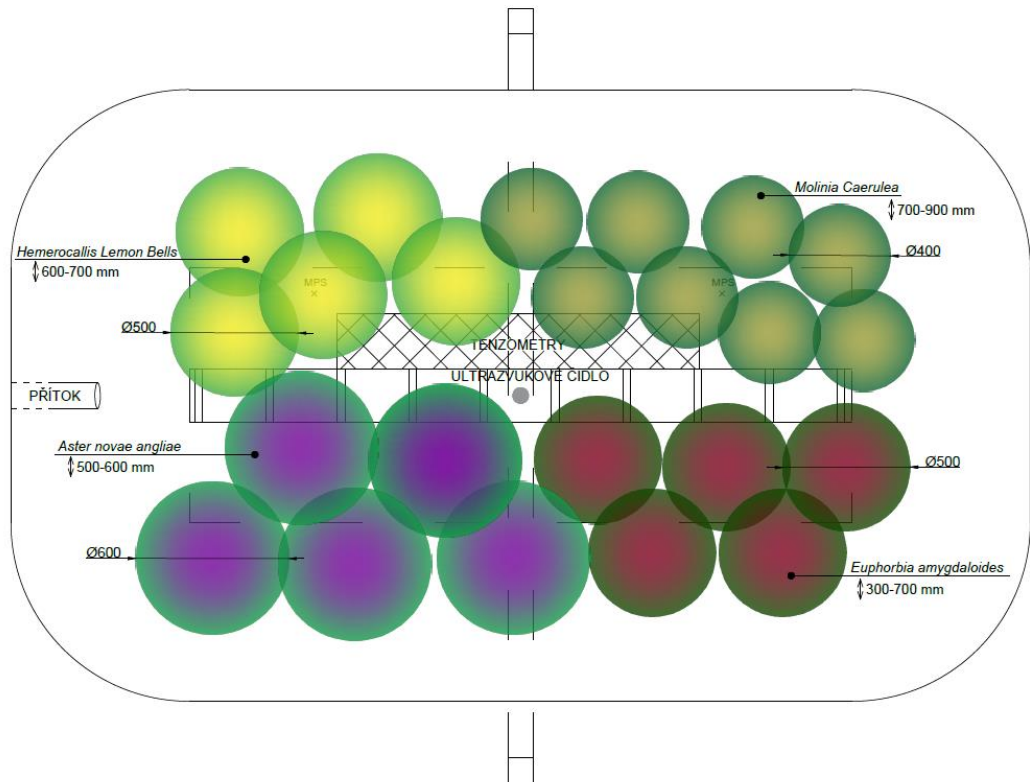


Obrázek 74: Výška rostlin v průběhu sledovacího období při pilotní plochu 2

8.1.3 Návrh osázení průlehu

Jeden z důvodů založení pilotních ploch bylo otestování zvolených rostlin a na základě toho vytvořit oseední plán pro finální dešťové zahrady. Výběr rostlin se ukázal jako vhodný, proto mohou být použity stejné trvalky. Dno průlehu je rozděleno na 4 pomyslné sektory (obrázek 75), kde každému je přiřazen jeden druh. Toto uspořádání bylo zvoleno z důvodu dalšího výzkumu. Při odběru vzorků pro infiltrační experimenty bude možné porovnat vliv kořenové zóny jednotlivých rostlin na změnu půdní struktury a infiltrační schopnosti. V pilotních plochách byl nejlépe vyhodnocen růst trvalky Hemerocallis Lemon bells a Aster

novae-angliae, proto jsou situovány k přítoku vody, kde bude docházet k většímu zamokření. Vyšší rostliny jsou umístěny za nižší rostliny, aby nedocházelo k vzájemnému stínění. Při návrhu rozmístění rostlin bylo nutné zohlednit instalovaná čidla, aby nedošlo k jejich poškození. Oba průlehy budou osázeny podle shodného plánu.



Obrázek 75: Osázení finálních dešťových zahrad v areálu UCEEB

9. DISKUZE

Nejdůležitější a zcela originální částí diplomové práce bylo snímkování vodního režimu materiálu filtrační vrstvy. Kombinací dvou nedestruktivních metod rentgenového a neutronového snímkování byly sledovány průběhy infiltračních experimentů. Toto snímkování je velice časově i finančně nákladné, proto bylo možno snímkovat pouze 4 vzorky. Pro obecnější závěry se jedná o malou sadu dat. Nicméně se jedná o prvotní práci a další výsledky budou následovat v rámci řešeného projektu.

Jednou z výhod snímkování na pracovišti ICON byla rychlost snímkování. Díky tomu bylo možné průběžně sledovat rychlou infiltraci. Pro kvalitní rekonstrukci snímků je důležité, aby osa rotace byla shodná s osou vzorku. Potíže při rekonstrukci nastávají už při rozdílu úhlu os 1° . Nicméně rekonstrukce vzorků proběhly v pořádku, pouze v případě vzorku TP2_9 byly dosaženy méně kvalitní výsledky. Nepodařilo se jednoznačně identifikovat kořeny, pravděpodobně kvůli nedostatečnému rozlišení. Pro rekonstrukci byl použit software MuhRec. Jedná se open source, který je nadále vyvíjen, převážně týmem pod vedením Anderse Kaestnera.

Z analýzy snímků jasně vyplynulo, že retenční schopnost vzorků TP2_9 a TP2_11 byla poloviční oproti vzorkům TP1_2 a TP1_4. To odpovídá tomu, že u vzorků odebraných po rozvoji vegetace byla zjištěna přítomnost makropórů. V makropórech nepůsobí výrazné kapilární síly, proto po ukončení přítoku voda odteče působením gravitačních sil. Nicméně není zcela zřejmé, zda tyto makropóry vznikly pouze působením vegetace či byly vytvořeny při odběru vzorků. U kompaktních vzorků by se dala očekávat relativně homogenní distribuce vody, ta však byla zjištěna pouze u vzorku TP1_4. V případě vzorku TP2_11 byl zaznamenán průběh přítoku a odtoku při druhé infiltraci odlišný od průběhů sledovaných u jiných vzorků. Odtok byl v podstatě nulový, důvod ale nebyl zřejmý. Šlo o pilotní, dříve nerealizovaný experiment, zkušenosti budou v plném rozsahu využity v průběhu dalšího řešení projektu.

Testování rostlin na pilotních plochách prokázalo jejich vhodnost pro další použití v dešťových zahradách. Většina rostlin dosahovala kladných přírůstků, jedinou výjimkou byla *Euphorbia amygdaloides* v pilotní ploše dva. U dvou ze tří rostlin se růst zastavil, nejpravděpodobněji kvůli napadení škůdci. Nicméně třetí rostlina rostla bez problému, a proto bude i tento druh trvalky, společně se všemi ostatními, použit pro další výzkum.

10. ZÁVĚR

Při navrhování dešťové zahrady jsou nejdůležitějšími prvky filtrační vrstva a vegetační pokryv. Bylo potřeba najít optimální složení filtrační vrstvy, splňující podmínku danou normou. Pro výběr filtrační vrstvy byl nejprve proveden průzkum vhodného složení zeminy, z jednotlivých složek byly vytvořeny 3 směsi. Na základě měřených hydraulických charakteristik byla vybrána směs s poměry složek 50 % písku, 30 % kompostu a 20 % ornice. Tato zemina byla pak použita jako filtrační vrstva na dvou testovacích pilotních plochách, které simulovaly dešťové zahrady. Na pilotních plochách byly vysazeny vybrané rostliny a byl zaznamenáván jejich vývoj v podmínkách střídání zamokření a období sucha. Rostliny (trvalky) pro vegetační pokryv byly zvoleny po konzultaci se zahradními architektkami. Vybrány byly: *Aster novae-angliae*, *Hemerocallis Lemon bells*, *Euphorbia*, *Molinia Caerulea*, *amygladoides*. Všechny splňují požadované podmínky pro dešťovou zahradu, kde musí snášet období sucha a občasné zamokření. Největší růst byl pozorován u *Aster novae-anglie*.

Z filtrační vrstvy byly po založení ploch a dále po dvou měsících odebrány půdní vzorky, na kterých byly prováděny infiltrační experimenty. Průběhy infiltračních pokusů byly sledovány pomocí neutronového a rentgenového snímkování ve Švýcarsku, v institutu PSI (Paul Scherrer Institute) na stanovišti ICON. Z rentgenových snímků byla získána informace o struktuře půdních vzorků. U vzorků odebraných po dvou měsících od založení pilotních ploch došlo ke zjevné změně struktury oproti vzorkům odebraným při založení. Zatímco na počátku byly vzorky relativně kompaktní, po dvou měsících růstu rostlin se ve vzorcích vyskytovaly dobře viditelné makropóry. Z neutronového snímkování byla zjištěna distribuce vlhkosti v těchto vzorcích. Vzorky, které obsahovaly makropóry, vykazovaly nižší retenční schopnost.

Kombinace obou použitých metod snímkování se prokázala jako velmi vhodná pro komplexní zkoumání procesu proudění ve vzorcích půdy. Lze získat podrobnou informaci o distribuci vody a zároveň o půdní struktuře a organické hmotě. Je možné infiltrační experimenty provádět opakovaně, protože se jedná o nedestruktivní metody.

Předložená diplomová práce tvoří základ pro navazující podrobný výzkum v delším časovém horizontu, který bude prováděn na dvou experimentálních dešťových zahradách. Dešťové zahrady jsou již zkonstruovány a v průběhu května budou osazeny podle zde vytvořeného osevního plánu. Postupy pro analýzu odebraných vzorků, použité v této práci, budou ve formě již vylepšené o získané zkušenosti aplikovány v pokračujícím řešení projektu. Výzkum je podporován Grantovou agenturou české republiky, grant č. GA17-21011S.

11. POUŽITÉ ZDROJE

11.1 Články

AHMED, F., J. S. GULLIVER & J. L. NIEBER (2015). Field infiltration measurements in grassed roadside drainage ditches: Spatial and temporal variability. *Journal of Hydrology*, **530**, 604-611.

AL-WIDYAN, M. I., N. AL-ABED & H. AL-JALIL (2005). Effect of composted olive cake on soil physical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **36**, 1199-1212.

AUSTIN, G. (2012). Design and performance of bioretention beds for removal of stormwater contaminants. *Journal of Green Building*, **7**, 17-27.

BARTON, J.P. (1965). Radiographic examination through steel using cold neutrons. *Brit. J. of Appl. Phys.*, **16**, 1833-1839.

BOLLER, M. (1997). Tracking heavy metals reveals sustainability deficits of urban drainage systems. *Water Science and Technology*, **35**, 77-87.

BRESSON, L. M., C. KOCH, Y. Le BISSONNAIS, E. BARRIUSO & V. LECOMTE (2001). Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 1804-1811.

BROOKS, R.H. a A.T. COREY, (1964). Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers 3, Colorado University, Fort Collins*

DAVIS, A. P., W. F. HUNT, R. G. TRAVER & M. CLAR (2009). Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, **135**, 109-117.

GENUCHTEN, van M.Th., (1978). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, *Res. Rep. 78-WR-08, Wat. Res. Program.*, Dept. of Civ. Eng., Princeton Univ., Princeton

HOU, L. Z., F. LIU, C. P. FENG & L. WAN (2013). Efficiencies of multilayer infiltration systems for the removal of urban runoff pollutants. *Water Science and Technology*, **67**, 1851-1858.

KAESTNER, A.P., J. HOVIND, P. BOILLAT, C. MUEHLEBACH, C. CARMINATI, M. ZAREBANADKOUKI, a E.H. LEHMANN (2017). Bimodal imaging at ICON using neutrons and X-rays. *Physics Procedia*, **88**, 314-321.

KAZEMI, F., S. BEECHAM & J. GIBBS (2011). Streetscape biodiversity and the role of bioretention swales in an Australian urban environment. *Landscape and Urban Planning*, **101**, 139-148.

MUTHANNA, T. M., M. VIKOLANDER, G. BLECKEN & S. T. THOROLFSSON (2007). Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. *Water Research*, **41**, 4061-4072.

OLSON, N. C., J. S. GULLIVER, J. L. NIEBER & M. KAYHANIAN (2013). Remediation to improve infiltration into compact soils. *Journal of Environmental Management*, **117**, 85-95.

QIN, H. P., Z. X. LI & G. T. FU (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, **129**, 577-585.

OUATTARA, K., B. OUATTARA, G. NYBERG, M. P. SEDOGO & A. MALMER (2007). Ploughing frequency and compost application effects on soil infiltrability in a cotton-maize (*Gossypium hirsutum-Zea mays* L.) rotation system on a Ferric Luvisol and a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil & Tillage Research*, **95**, 288-297.

RAHMAN, M. A., J. G. SMITH, P. STRINGER & A. R. ENNOS (2011). Effect of rooting conditions on the growth and cooling ability of *Pyrus calleryana*. *Urban Forestry & Urban Greening*, **10**, 185-192.

REDDY, K. R., T. XIE & S. DASTGHEIBI (2014). Evaluation of Biochar as a Potential Filter Media for the Removal of Mixed Contaminants from Urban Storm Water Runoff. *Journal of Environmental Engineering*, **140**.

RICHARDS, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* **1**(5), 318–333.

RICHARDS, P. J., C. FARRELL, M. TOM, N. S. G. WILLIAMS, a T. D. FLETCHER (2015). Vegetable raingardens can produce food and reduce stormwater runoff. *Urban Forestry & Urban Greening*, **14**, 646-654.

RITSEMA, J.C., L.W.DEKKER, J.L.NIEBER, and T.S.STEENHUIS (1998). Modelling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, **34**(4), 555-567

STROBL, M., MANKE, I., KARDJILOV, N., HILGER, A., DAWSON, M., BANHART, J. (2009). Topical review: Advances in neutron radiography and tomography. *Journal of Physics D- Applied Physics-J PHYS-D-APPL PHYS.*, **42**. doi: 10.1088/0022-3727/42/24/243001.

TAHVONEN, O. (2018). *Adapting Bioretention Construction Details to Local Practices in Finland*, Sustainability, MDPI, Open Access Journal, **10**(2), 1-17

THOMPSON, A. M., A. C. PAUL & N. J. BALSTER (2008). Physical and hydraulic properties of engineered soil media for bioretention basins. *Transactions of the Asabe*, **51**, 499-514.

VIRAHSAWAMY, H. K., M. J. Stewardson, G. Vietz & T. D. Fletcher (2014). Factors that affect the hydraulic performance of raingardens: implications for design and maintenance. *Water Science and Technology*, **69**, 982-988.

XIAO, Q. F. & E. G. MCPHERSON (2011) Performance of engineered soil and trees in a parking lot bioswale. *Urban Water Journal*, **8**, 241-253.

YU, Z., S. XU, Y. ZHANG, G. JORGENSEN, a H. VEJRE (2018). Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. *Scientific Reports*, **8**(1), doi:10.1038/s41598-018-25296-w

ZEYTIN, S., a A. Baran (2003). Influences of composted hazelnut husk on some physical properties of soils. *Bioresource Technology*, **88**, 241-244.

ZUMR, D., a CÍSLEROVÁ, M. (2007). Monitorování preferenčního proudění na heterogenních půdách s využitím stopovačů. *Bioclimatology and natural hazards International Scientific Conference*, 2007, ISBN 978-80-228-17.

11.2 Skripta, knihy

CÍSLEROVÁ, M. a T. VOGEL. *Transportní procesy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1866-0.

BUCKINGHAM, E. *Studies on the movement of soil moisture*. Bulletin 38, USDA Bureau of Soils, Washington DC 1907.

DUNNETT, N. a A. CLAYDEN. *Rain gardens: managing water sustainably in the garden and designed landscape*. Portland, Or.: Timber Press, 2007. ISBN 978-0-88192-826-6.

KUTÍLEK, M., V. KURÁŽ a M. CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie 10*. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-010-2237-4.

STRÁNSKÝ, D., I. KABELKOVÁ, J. VÍTEK a Milan SUCHÁNEK. *Podklad pro koncepci nakládání s dešťovými vodami v urbanizovaných územích*. Praha, 2007.

VÍTEK, J., D. STRÁNSKÝ, I. KABELKOVÁ, V. BAREŠ a R. VÍTEK. *Hospodaření s dešťovou vodou v ČR*. Praha: 01/71 ZO ČSOP Koniklec, 2015. ISBN 978-80-260-7815-9.

11.3 Osobní konzultace

Ing. Jana Pyšková a Ing. Tereza Vlasáková, 2018, zahradní architektky, konzultace výběrů rostliny do dešťové zahrady.

Dr. Anders Kaestner, 2018, vědecký pracovník v PSI, rekonstrukce neutronových a rentgenových snímků.

11.4 Normy, manuály

ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

DYK, D. et al. *Sustainable Landscape Systems for Managing Storm Water 2nd Edition: Steps for getting off the Storm Water "GRID"* [online]. In: . 2009 [cit. 2017-03-21].

Rain Gardens: Iowa Rain Garden Design and Installation Manual [online]. In: . 2008 [cit. 2017-04-07].

RZEPKA, A. *Rain garden manual for homeowners: Protecting our water, one yard at a time*. [online]. 2006 [cit. 2017-02-09] <http://erieconserves.org/wp-content/uploads/Rain-Garden-Manual.pdf>

SNĚHOTA, M., V. JELÍNKOVÁ, J. ŠÁCHA, V. BAREŠ a T. VOGEL. *Meteorologická měření v okolí budovy UCEEB*. Buštěhrad, 2015.

TNV 75 9011. *Odvětvová technická norma vodního hospodářství: Hospodaření se srážkovými vodami*. Praha, 2013.

11.5 Webové stránky

DANKO, L. *Rain Gardens - Plants. PennState Extension* [online]. 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://extension.psu.edu/plants/gardening/eco-friendly/rain-gardens/plants-rain-gardens>

Dažďové zahrady pre zdravú klímu miest III. [online]. 2010 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://kravcik.blog.sme.sk/c/228207/Dazdove-zahrady-pre-zdravu-klimu-miest-III.html>

DWELLE, Ron. *Create A Rain Garden* [online]. [cit. 2018-03-21]. DOI: Ron. Dostupné z:

http://www.raingardensforthebays.org/wp-content/uploads/2013/04/WestMichiganCreate_A_Rain_Garden.pdf

Green buildings alliance: Rain Gardens [online]. 2016 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.go-gba.org/resources/green-building-methods/rain-gardens-2/>

JARMAN, Charles. *Rain garden soil* [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.dnr.sc.gov/marine/NERR/present/RaingardenWorkshop/RainGardenSoils.pdf>

KALNÍKOVÁ, Veronika. *Dešťová zahrada* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://www.pocitamesvodou.cz/destova-zahrada/>

Rain garden alliance: Before you toil, know your soil [online]. 2009 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://raingardenalliance.org/right/soil>

Reduce your stormwater: Rain Gardens [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.stormwater.allianceforthebay.org/take-action/installations/rain-gardens>

SAMEK, Ondřej. *Motivace k hospodaření s dešťovou vodou* [online]. In: 2013 [cit. 2017-05-21]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/destova-voda/9961-motivace-k-hospodareni-s-destovou-vodou>

11.6 Software

SCHINDELIN, J., ARGANDA-CARRERAS, I., a FRISE, E. et al. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, **9**(7): 676-682, PMID 22743772, doi:10.1038/nmeth.2019 (on Google Scholar).

KAESTNER, A. P. (2011). MuhRec - A new tomography reconstructor, *Nuclear Instruments and Method in Physics Research Section a - Accelerator Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, **651**(1), 156-160.