

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ  
INŽENÝRSTVÍ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh zkušebních ploch pro souvrství intenzivních  
zelených střech

Design of experimental beds for investigation of  
intensive green roofs

Autor: Bc. Tereza Zemanová

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

Praha, 2019



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Zemanová</u>	Jméno: <u>Tereza</u>	Osobní číslo: <u>423741</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh zkušebních ploch pro výzkum souvrství intenzivních zelených střech

Název diplomové práce anglicky: Design of experimental beds for investigation of intensive green roofs

Pokyny pro vypracování:  
Zpracujte rešerši na téma intenzivních zelených střech, se zaměřením na jejich vodní bilanci a režim. Zpracujte formou detailní studie návrh souboru tří vyvýšených zkušebních ploch pro výzkum intenzivních zelených střech. Navrhněte konstrukci ploch, skladbu souvrství a instrumentace pro měření odtoku ze zkušebních ploch. Navrhněte vhodný substrát pro intenzivní souvrství a v laboratoři zjistěte jeho hydrofyzikální vlastnosti jak pomocí standardních hydropedologických zkoušek, tak testováním metodiky dle Standardů pro navrhování, provádění a údržbu vegetačních souvrství zelených střech. Především zjistěte retenční křivku substrátu, objemovou hmotnost a maximální vodní kapacitu. Pomocí infiltrační zkoušky zjistěte hydraulickou vodivost substrátu. Výsledky diskutujte.

Seznam doporučené literatury:  
FLL (2008): Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn.  
Články v časopisech indexovaných v databázi WOS.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 28.2.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 19.5.2019  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce \_\_\_\_\_ Podpis vedoucího katedry \_\_\_\_\_

### 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“.*

28.2.2019 \_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta(ky)

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Návrh zkušebních ploch pro výzkum souvrství intenzivních zelených střech zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/200 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících a právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....  
Bc. Tereza Zemanová

## Poděkování

Ráda bych zde poděkovala především vedoucímu diplomové práce doc.Ing. Michalu Sněhotovi Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady při tvorbě této práce, časovou vstřícnost při konzultacích a velkou trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat paní Haně Donátové za čas a velkou pomoc při práci v laboratoři, Marku Petreje a Jitce Hanzlíkové za provedení měření v laboratořích UCEEB a Ing. Tomáši Princovi za pomoc a rady při tvorbě této práce.

Návrh zkušebních ploch pro výzkum  
souvrství intenzivních zelených střech

Design of experimental beds for  
investigation of intensive green roofs

## Abstrakt

Tato práce se zabývá tematikou souvrství intenzivních zelených střech a je rozdělena na rešeršní, teoretickou, laboratorní a projekční část.

Rešeršní část diplomové práce je zpracovaná na téma zelené střechy se zaměřením na intenzivní vegetační střechy. Jsou zde popsány výhody a nevýhody použití zelených střech, historie zelených střech a základní konstrukční vrstvy. Značná část rešerše je věnovaná vodní bilanci intenzivních vegetačních střech.

V laboratorní části práce jsou prováděny zkoušky na vybraném substrátu pro intenzivní střechy, které jsou diskutovány ve výsledkové části jednotlivých měření. Pro úplnost tématu je k laboratorní části zpracována stručná teorie.

Hlavním cílem projekční části je návrh experimentálních ploch pro výzkum vodní bilance na souvrství intenzivních zelených střech, které bylo navrženo na základě poznatků získaných z rešerše. Tyto pokusné plochy jsou zpracovány ve formě tří vyvýšených záhonů na konstrukci dřevěné terasy. Tato terasa bude v budoucnu sloužit jako výuková zahrada pro monitoring odtoku zelených střech a k výzkumu různých typů závlah.

Klíčová slova: intenzivní vegetační střecha, substrát pro intenzivní střechy, vodní bilance zelených střech, experimentální plocha, retenční čára půdní vlhkosti, křivka zrnitosti

## Abstract

This thesis deals with the theme of the stratum of intensive green roofs and is divided into research, theoretical, laboratory and projection part.

The research part of the thesis is dedicated to the theme of green roofs with focus on intensive vegetation roofs. Advantages and disadvantages of using green roofs, history of green roofs and basic structural layer are described in this part. Much of the research is devoted to the water balance of intensive vegetation roofs.

In the laboratory part of the thesis, tests are carried out on a selected substrate for intensive roofs, which are discussed in the results section of individual measurements. For the completeness of the topic, a brief theory is prepared for the laboratory part.

The main objective of the project is to design experimental beds for water balance research on the strata of intensive green roofs, which were designed on the basis of findings from the research. These experimental beds are processed in the form of three raised beds on the construction of a wooden terrace. This terrace will serve as a training garden for monitoring the drainage of green roofs and for researching various types of irrigation.

Key words: Intensive green roof, substrate for intensive roofs, water balance of green roofs, experimental beds, soil moisture retention curve, granularity curve

## Obsah

Seznam veličin a zkratek.....	11
1. Úvod .....	12
2. Základní pojmy.....	14
3. Rešerše.....	15
3.1. Zelené střechy.....	15
3.2. Dělení zelených střech.....	15
3.2.1. Extenzivní střechy.....	15
3.2.2. Polointenzivní střechy.....	16
3.2.3. Intenzivní zelené střechy .....	17
3.3. Historie zelených střech .....	17
3.4. Význam zelených střech .....	19
3.4.1. Transformace odtokové křivky.....	19
3.4.2. Tepelněizolační funkce .....	22
3.4.3. Ovlivnění mikroklimatu.....	22
3.4.4. Filtrace polutantů z dešťové vody.....	23
3.4.5. Redukce hluku a prašnosti .....	24
3.4.6. Ekonomické benefity .....	24
3.5. Skladba intenzivní zelené střechy.....	24
3.6. Trendy posledních let.....	26
3.7. Legislativní prostředí.....	28
3.8. Produkční zelené střechy.....	30
3.9. Experimentální instalace pro výzkum zelených střech.....	34
3.10. Typy substrátů dostupných v ČR.....	36
4. Teorie k experimentální části.....	37
4.1. Stokesův zákon.....	37



4.2.	Zrnitost půdy.....	38
4.3.	Darcyho zákon.....	39
4.4.	Darcy-Buckinghamův zákon.....	40
4.5.	Richardsova rovnice.....	40
5.	Numerické modelování odtoku.....	41
6.	Laboratorní část.....	45
6.1.	Retenční čára.....	45
6.2.	Objemová hmotnost, pórovitost.....	50
6.3.	Křivka zrnitosti.....	51
6.3.1.	Čára zrnitosti - Casagrande.....	51
6.3.2.	Sítový rozbor.....	54
6.4.	Měrná hmotnost pevných částic.....	58
6.5.	Hydraulická vodivost.....	59
6.6.	Stanovení maximální vodní kapacity.....	63
7.	Návrh experimentální a výukové zahrady.....	67
7.1.	Popis zájmového území.....	68
7.2.	Závlahový systém.....	69
7.3.	Návrh konstrukce terasy.....	70
7.3.1.	Svažitý terén.....	70
7.3.2.	Pochozí vrstva.....	71
7.3.3.	Konstrukce roštu.....	71
7.3.4.	Kotvení terasy.....	73
7.3.5.	Podkladová vrstva.....	73
7.4.	Experimentální plochy.....	74
7.5.	Odvodnění.....	75
7.5.1.	Ověření vhodnosti návrhu nopové folie Platon DE 40.....	76

7.5.2.	Návrh velikosti potrubí pro odvodnění.....	77
7.5.3.	Ověření vhodnosti návrhu průtokoměru PF500 .....	79
7.6.	Návrh zemních úprav .....	80
7.7.	Orientační výpočet nákladů .....	82
7.8.	Bezbariérové užívání .....	82
7.9.	Inženýrské sítě .....	83
7.10.	Použité přístroje .....	83
7.10.1.	Pěstební robot FarmBot .....	83
7.10.2.	Isco 3700 Full-Size .....	84
7.11.	Ostatní vybavení.....	85
8.	Závěr.....	86
Zdroje .....		87
	Knihy a články v odborných časopisech .....	87
	Internetové a ostatní zdroje .....	88
Normy a zákony .....		91
9.	Seznam obrázků a tabulek .....	92
10.	Seznam příloh .....	94

## Seznam veličin a zkratek

Zkratka	Jednotka	Název
A	$m^2$	Plocha, průtočný průřez
b	m	šířka
c	$g.cm^{-3}$	menisková korekce
C	-	Součinitel odtoku
D	m	Průměr
g	$m.s^{-1}$	Gravitační zrychlení
H	m	Hydraulická výška
$i_h$	-	Hydraulický sklon
Ks	$m.s^{-1}$	Nasyčená hydraulická vodivost
L	m	Délka, vzdálenost
m	$^{\circ}C$	teplotní korekce
O	%	Hmotnostní podíl částic
p	- ; %	Pórovitost
Q	$m^3.s^{-1}$	Průtok
q	$m^2.s^{-1}$	objemový tok
$S, m_s$	g	hmotnost suchého vzorku
t	s	čas
v	$m.s^{-1}$	rychlost
V	$m^3$	Objem
Vp	$m^3$	Objem pórů
w	%	hmotnostní vlhkost
$\eta$	$g.s^{-1}.cm^{-1}$	Viskozita
$\theta$	$cm^3 .cm^{-3}$	Objemová vlhkost
$\rho_r$	$g.cm^{-3}$	Měrná hmotnost
MVK	%obj.	Maximální vodní kapacita
A	%obj.	Obsah vzduchu při nasycení vzorku na MVK

## 1. Úvod

Ačkoliv se vegetační střechy vyskytují jako součást stavitelství již mnoho desítek až stovek let, ve střední Evropě či Severní Americe jsou trendem až v posledních letech. V dřívějších dobách plnily zelené střechy především funkci tepelněizolační ve velmi chladných, nebo naopak velmi teplých oblastech. V posledním období, kdy se v přírodě vyskytují stále větší klimatické výkyvy, dlouhodobá sucha, ničivé povodně a celkové oteplování planety, se stal trendem ve výstavbě návrat k přírodě blízkým opatřením. Snahou orgánů státní správy i architektů je minimalizovat nepropustné plochy a nahradit je vegetačním pokrytím, které díky infiltraci a vypařování významně ovlivňuje mikroklima měst. Pozitivního ovlivnění mikroklimatu lze dosáhnout například právě výstavbou zelených střech ve městech. Výstavba vegetačních střech je podporovaná zákony a různými dotačními programy v ČR i v zahraničí.

Z mnoha vědeckých výzkumů vyplývá, že vegetační střechy mají mnoho výhod. Pro vodní hospodářství města je nesporně největší výhodou schopnost vegetační střechy zadržet srážkovou vodu, snížit a zpomalit odtok vody do kanalizace. V případě jednotné kanalizace je význam zadržení srážkové vody v přirozeném prostředí o to důležitější, jelikož kanalizace při přívalových srážkách odvádí díky odlehčovacím komorám přebytečnou vodu přímo do recipientů.

Tato práce se v první třetině zabývá rešerší informací o vegetačních střechách a soustřeďuje se především na srážkoodtokové podmínky – množství odtoku dešťové vody při různých srážkách, výškách substrátu či sklonu střech. Hlavním cílem diplomové práce je projekční návrh ploch, simulujících plochy intenzivních zelených střech pro Fakultu stavební, ČVUT v Praze. Tato venkovní laboratoř bude sloužit pro výuku závlah a transportních procesů v půdách městské zelené infrastruktury. Původním záměrem bylo realizovat pokusné plochy na střeše budovy B Fakulty stavební, ČVUT v Praze, ale během příprav bylo kvůli nedostatečné únosnosti

střechy pro skladby intenzivních zelených střech a předpokládané blízké rekonstrukce budovy nalezena jiná lokalita v areálu fakulty.

Součástí práce je také výběr vhodného substrátu pro intenzivní střechy. Vybraný substrát byl podroben laboratorním zkouškám zaměřeným především na jeho hydraulické charakteristiky.

## 2. Základní pojmy

Vegetační střecha, nebo též střešní zahrada nebo zelená střecha je střecha, kterou pokrývá vegetační souvrství s vegetací. (Burian, 2016)

Střešní zeleň je zeleň, která se řadí do zeleně na konstrukcích a nachází se na střeších nadzemních budov (ČSN 83 9001).

Produkční zelená střecha je zelená střecha využitá k rostlinné, zahradnické nebo zemědělské výrobě, soukromé nebo komerční. (Burian, 2016)

Retence je přirozené či umělé dočasné zadržení vody v krajině (VÚV TGM)

Infiltrace je proces pronikání a pohyb části spadlých srážek povrchovým porézním prostředím půdního profilu (vsakování) (Metodická příručka MŽP)

Intercepce je proces, při kterém se srážky zachytávají na živých částech rostlin, ale pojem intercepce zahrnuje také zachytávání vody na jejich zbytcích (větvě, listí, lesní hrabanka), které kryjí povrch půdy. (ČHMÚ)

Transpirace je přechod vody v důsledku fyziologických procesů z rostlin do ovzduší (Metodická příručka MŽP)

## 3. Rešerše

### 3.1. Zelené střechy

Zelená střecha, někdy označována jako střešní zahrada či vegetační střecha je střecha, která je pokryta vegetačním souvrstvím s vegetací. (Burian et al., 2016)

### 3.2. Dělení zelených střech

Zelené střechy lze rozdělit podle několika hledisek.

- Podle druhu vegetace (intenzivní, extenzivní, polointenzivní)
- Podle přístupnosti (nepochozí, pochozí, pobytové)
- Podle funkce (retenční, podporující biodiverzitu, pěstební, kombinované s fotovoltaikou)
- Podle sklonu (ploché, šikmé, strmé)
- Podle prostorové vazby na okolní rostlý terén (v úrovni s parterem, v dotyku s parterem, bez dotyku s parterem)

V praxi je nejčastěji využíváno dělení podle druhu vegetace. Jednotlivé druhy rostlin vyžadují individuální péči, přístup a životní podmínky. Typy střech se liší jednak vegetačním pokryvem, ale také mocností a typem substrátu, skladbou střechy a minimální únosností stavební konstrukce.

#### 3.2.1. Extenzivní střechy

Základní vlastností extenzivní střechy je snaha minimalizovat údržbu ozelenění. Proto je zde volena vegetace, která nepotřebuje pravidelné zastřihávání, hnojení ani zavlažování. Zásah člověka probíhá jednou nebo dvakrát ročně. Většinou se jedná pouze o kontrolu stavu ozelenění, případné přihnojení či odstranění nežádoucích rostlin.

Vegetace je tvořena rostlinami schopnými se přizpůsobit i extrémním stanovištním podmínkám. Vhodné rostliny jsou například mechy, rozchodníky, sukulenty, trávy a byliny.

Vzhledem k nenáročnosti vysázených rostlin se volí na extenzivních střechách mocnost vegetačního souvrství 60-150 mm (Burian et al., 2016).

Mocnost vegetační vrstvy se podle různých zdrojů liší, proto byly srovnány v Tabulce 1.

Tabulka 1 Srovnání mocností substrátu Zdroj: Justyna Czemieli Berndtsson (2009) (Berndtsson, 2009)

Intenzivní [mm]	Extenzivní [mm]	Zdroj
150-1200	50-150	Kosareo and Ries (2007)
>500		Kohler et al. (2002)
150-350	30-140	Mentens et al. (2006)
>100	<100	Wong et al. (2007)
>300		Bengtsson et al. (2005)
>100	20-100	Graham and Kim (2005)
150-2000	20-250	Burian et al. (2016)

Ze statického hlediska jsou extenzivní zelené střechy méně náročné na požadovanou únosnost konstrukce. Je to dáno nižšími nároky na mocnost substrátu, druhem použitého substrátu a jinou skladbou střechy. Extenzivní zelené střechy bývají nepochozí, či pochozí pouze pro osoby, které zajišťují technický stav střechy.

### 3.2.2. Polointenzivní střechy

Polointenzivní střechy jsou v některých publikacích nazývány jako jednoduché intenzivní střechy. Polointenzivní zelená střecha je přechodový typ mezi střechou extenzivní a intenzivní. Je možno ji osazovat nejen mechy, rozchodníky a trávou, ale lze zde pěstovat i vyšší druhy rostlin s hlubšími kořeny. Vhodnými rostlinami pro polointenzivní střechu jsou například trávy a byliny, trvalky či keře.

Je důležité při návrhu polointenzivní střechy myslet na vyvinutější kořenový systém vyšších rostlin, který pro svůj zdravý růst potřebuje větší mocnost vegetačního

souvrství než sukulenty a mechy. Mocnost vegetačního souvrství se pohybuje od 150 mm do 300 mm.

Péče o polointenzivní střechu se provádí zhruba 2x ročně, je tedy srovnatelná s péčí o extenzivní zelenou střechu. Některé z druhů rostlin však



mohou mít v období sucha vyšší potřebu vody, proto je třeba v případě náročnějších rostlin dodatečně zavlažovat a hnojit.

Oproti extenzivním zeleným střechám je skladba polointenzivní střechy složitější a staticky i finančně náročnější.

### **3.2.3. Intenzivní zelené střechy**

Nejnáročnějším zároveň nejrozmanitějším typem zelené střechy je intenzivní zelená střecha.

Charakteristickou vlastností intenzivních střech je zvýšená potřeba péče o vegetaci, složitější vegetační souvrství a širší spektrum rostlin pro výsadbu. Intenzivní střechy se často navrhují jako pochozí či pobytové. Často proto bývají součástí také chodníčky, zábradlí nebo mobiliář. Intenzivní střechy se často navrhují na velkých terasách nebo střechách bytových domů, administrativních či veřejných budov.

Předností intenzivních zelených střech je velká rozmanitost při výběru rostlin. Lze zde vysázet trávy, trvalky, okrasné rostliny, keře a stromy. Motivací k založení je možnost pěstovat užitkové rostliny.

Intenzivní zelené střechy i přes velké výhody nejsou budovány tak často, jako extenzivní střechy. Hlavním důvodem je vyšší pořizovací cena a větší potřeba péče o rostliny. Intenzivní vegetační střechy se navrhují především na novostavbách, a to ze statického důvodu. Převážná většina současných střešních konstrukcí a jejich nosných prvků není dimenzovaná na tak velké zatížení. Plošná hmotnost vegetačního souvrství v nasyceném stavu bývá vyšší než  $400 \text{ kg.m}^{-2}$ . V některých případech, kdy je potřeba větší mocnost substrátu, může plošná hmotnost vegetačního souvrství dosahovat až  $2000 \text{ kg.m}^{-2}$ .

## **3.3. Historie zelených střech**

Ačkoliv se trend zelených střech rozšířil po světě až v posledních desetiletích, historie zelených střech sahá daleko do minulosti. Jako první zelenou střechu lze považovat Visuté zahrady Semiramidiny, které byly postaveny okolo roku 500 př. n. l. v Mezopotámii. Tyto zahrady vznikly na

25 metrů vysokém, uměle vytvořeném pahorku, který nechala Semiramis obestavět kolonádou. Tato kolonáda byla podpírána kamennými sloupy. Střešní konstrukci tvořila vrstva rákosu s asfaltem, která sloužila jako tepelná izolace. Na této vrstvě byly položeny olověné pláty, které byly položeny tak, aby odváděly vodu, která by se mohla v konstrukci zadržovat a způsobit tak degradaci materiálu. Na těchto konstrukčních vrstvách byla uložena zemina hluboká tak, aby umožňovala růst okrasných květin, trvalek, keřů a stromů. V zahradách byl vystavěn kanál s vodopády, který zajišťoval zavlažování záhonů. Vodu údajně přiváděl 50 kilometrů dlouhý akvadukt z řeky Eufrat, který rozváděl přebytečnou vodu do města. Aby se voda dostala do úrovně zahrad, bylo využito několik čerpadel, která vháněla vodu do kanálu. Tato čerpadla byla poháněna nejspíše zvířaty či otroky. (Dalley, 2015)

Moderní zelené střechy byly budovány v chladnějším pásmu především jako tepelná izolace staveb. Jedná se například o Skandinávii a Kanadu. Naopak v tropických pásmech budovali obyvatelé zelené střechy jako ochranu před teplem. V celku se dá říct, že zelené střechy byly a jsou budovány kvůli ochraně před vnějšími klimatickými podmínkami.



Obrázek 1 Saksun Village, Streymoy, Faerské ostrovy Zdroj: Nick Fox, nicksimages.com, 20.4.2019

V současnosti jsou zelené střechy rozšířeny v mnoha zemích. V největším měřítku ve Skandinávii, USA, Kanadě či Japonsku. Například

v Torontu je zákonem dáno, že na nově postavených budovách s rozlohou střechy větší než 2000 m<sup>2</sup> musí být vybudovaná zelená střecha nejméně na 20 % plochy střechy. V Japonsku platí, že u veřejných novostaveb větších než 250 m<sup>2</sup> a u soukromých novostaveb nad 1000 m<sup>2</sup> musí být ozeleněno aspoň 20 % střechy. Za nesplnění tohoto předpisu mohou být majitelé pokutováni až ve výši 2000 dolarů. (Zhang, 2012)

### **3.4. Význam zelených střech**

Urbanizovaná území a zastavěné plochy, které se stále zvětšují, s sebou přináší kromě pozitiv také svá negativa. Jedním z největších problémů je významný úbytek zelených ploch. Trend posledních desetiletí je dostat více zeleně do měst, ať jsou to parky, či právě zelené střechy. Není však podmínkou, že se vegetační střechy budují pouze ve městech. Také na vesnici nebo v rekreačních oblastech plní zelené střechy velkou funkci.

#### **3.4.1. Transformace odtokové křivky**

V zastavěném území je nejvýraznějším benefitem to, že zelené střechy dokáží zadržovat dešťovou vodu. Dešťová voda je částečně vsakována do substrátu. Odtok vzniká teprve po jeho plném nasycení. To má za následek zpomalení a zmenšení odtokové křivky. V případě, že by byly vystavěny zelené střechy na více budovách v daném území, výrazně by to odlehčilo dešťové kanalizaci, která by se následně mohla navrhovat na menší průtoky.

Zadržení vody a regulaci odtoku na zelených střechách ovlivňuje mnoho faktorů. Například mocnost substrátu, odvodnění střechy, druh vegetačního pokryvu, intenzity dešťů v dané oblasti a v neposlední řadě sklon a stáří zelené střechy.

Rostliny hrají důležitou roli při snížení odtoku. Záleží však na druhu vysazené rostliny, jeho schopnosti intercepce, retence a transpirace. Na intenzivních zelených střechách může být dosaženo retence až 66,7 %, což je oproti klasickým střešním konstrukcím (33,6 %) téměř dvojnásobně zadržený objem vody při odtoku. Nejvhodnější druh vegetace z pohledu

efektivitu zpomalování odtoku ze střešní konstrukce jsou trávy. Za trávami následují byliny a rozchodníky. (Vijayaraghavan, 2016)

Podle studie Mentens (2006) dokáží intenzivní zelené střechy zadržet 65 -85 % ročního úhrnu srážek. Extenzivní zelená střecha má schopnost zadržet okolo 27- 81 % srážek. Carter a Rassmussen (2006) vydali v roce 2006 studii, ve které zpracovávali závislost mezi velikostí srážky a retencí zelených střech. Při malých dešťových událostech do 25,4 mm bylo zachyceno pomocí zelené střechy 88 % vody. Pro střední dešťové události s množstvím spadlých srážek mezi 25,4 – 76,2 mm bylo zadrženo více než 54 % vody a při velké události tj. více než 76,2 mm spadených srážek bylo zadrženo 48 % vody. Ve studii Simmonse a kol.,(2008) je řečeno, že zelená střecha dokáže zadržet 100 % vody v případě, že je množství srážek při dešťové události menší než 10 mm. Pro množství srážek 12 mm byla zjištěna 88% retence. (Berndtsson, 2009) V porovnání se studií Cartera a Rassmussena (2006) je množství zadržené vody při stejné retenci srážkové vody poloviční.

Retence vody na zelených střechách však nezáleží pouze na množství srážek, nýbrž také na jejich intenzitě. Zelené střechy vykazují lepší retenční schopnosti při srážkách s nižší intenzitou. Mentens a kol.(2006) popisují tuto závislost jako lineární. Dalším významným faktorem ovlivňujícím retenci je sklon střechy. Pro srážkovou událost o intenzitě 0,4 mm/min byly pomocí simulace deště porovnány zelené střechy s rozdílným sklonem: 2°, 8° a 14°. Vegetační střecha se sklonem 2° vykazovala retenci 62 %, střecha se sklonem 8° 43 % a nejmenší retenční schopnost měla střecha se sklonem 14° a to 39 %. Při intenzitě deště 0,8 mm/min byly retenční schopnosti pro zelené střechy o sklonu 2°, 8° a 14° nižší, a to 54 %, 30 % a 21 %. Pro zelenou střechu se sklonem 14° je retence při dešti o intenzitě 1,3 mm/min dokonce pouhých 10 %. Z výsledků lze tedy konstatovat, že s rostoucí intenzitou a zároveň s větším sklonem zelené střechy se retenční schopnost až několikanásobně snižuje. (Vijayaraghavan, 2016, Berndtsson, 2009)

Mnoho zdrojů uvádí, že doba zpoždění odtokové křivky ze zelené střechy oproti konvenčním střechám je přibližně 10 minut. Naopak Villareal

(2007) ve své studii tvrdí, že doba zpoždění je asi 1 minuta. Může to být způsobeno například změnou hydraulické konduktivity, která se mění v průběhu stáří substrátu. (Vijayaraghavan, 2016) Kromě zpoždění odtokové křivky dokáže vegetační střecha také snížit její průběh. Substrát mění v průběhu času své vlastnosti: zrnitostní složení, porozitu, chemické složení či množství organických částic. Všechny tyto změny mohou způsobit odlišnou dynamiku odtoku na zelené střeše.

Dalším faktorem ovlivňujícím vsakování a zadržování vody na zelené střeše je roční období a klimatické poměry. V teplých měsících je vyšší evapotranspirace a intercepce díky tomu, že je vegetační období rostlin. Stejně tak substrát má v létě příznivější vlastnosti pro vsakování vody. Díky evapotranspiraci se rychleji obnovuje retenční kapacita zelené střechy. Závislostí mezi ročním obdobím, množstvím zadržované vody a hloubce substrátu se zabýval Mentens a kol (2006) a v roce 2006 vydal studii na toto téma. Ve studii jsou definována tři teplotní období: Teplé období (květen až srpen), chladné období (druhá polovina listopadu až první polovina března) a mezilehlé období, které pokrývá všechny zbylé dny. Bylo zjištěno, že v chladném a mezilehlém období nemá hloubka substrátu výraznější vliv na zadržování a odtok vody. Zatímco v letním období byly výsledky experimentů na jednotlivých zkušebních plochách o hloubce <50, 50-150 a >150 mm rozdílné. Redukce odtoku byla nejvýraznější pro substrát hloubky větší než 150mm a to 80 %. Pro substrát hloubky do 50mm byl odtok zmenšen o 60 % a pro středně hluboký substrát tj. 50-150 mm byla redukce odtoku 70 %. V další části studie jsou popsány rozdíly redukce odtoku v závislosti na teplotním období. Například zelená střecha s hloubkou substrátu 50 – 150 mm vykazovala redukci odtoku 70 % v teplém období, 49 % v mezilehlém období a v chladném období byla redukce odtoku jen 33 %. Bengtsson a kol.(2005) ve své studii porovnávali závislost odtoku na teplotě v jednotlivých měsících. Nejmenší retence byla zaznamenána v měsíci únoru, kdy byl odtok z extenzivní zelené střechy redukován o pouhých 19 %. Nejlepší výsledky byly dosaženy v červnu, kdy byl odtok redukován o 88 %. Ve studii byla porovnána také teplotní období – chladné (září-únor) a teplé

(březen-srpen). V chladném období byla zaznamenaná průměrná redukce odtoku o 34 % a v teplém období 67 %. (Berndtsson, 2009)

### **3.4.2. Tepelněizolační funkce**

Primární funkce, pro kterou výstavba zelených střech vůbec začala, je funkce tepelně izolační. V severnějších zemích jsou zelené střechy využívány jako tepelná izolace. Jedná se především o intenzivní zelené střechy, které mají větší mocnost substrátu, který zde působí jako izolační vrstva. Zabraňuje únikům tepla z budovy a současně omezuje prostup studeného vzduchu z exteriéru do interiéru skrze střechu. Další výhodou zelených střech je naopak ochlazování budovy v horkých letních dnech. Podle studií, které vznikly v Řecku, dokáže zelená střecha udržet interiér chladnější i o 4 °C. Zelené střechy dokáží snížit náklady na klimatizaci o 2-48 %.

### **3.4.3. Ovlivnění mikroklimatu**

Kromě tepelně izolační funkce samotné konstrukce dokáže zelená střecha ovlivnit mikroklima v okolí budovy. Samozřejmě je efekt větší, když se v dané části urbanizovaného území nachází více než jedna zelená střecha, kdy je efekt ovlivnění mikroklimatu minimální. Vegetační povrch mění radiační bilanci střechy tím, že je odraženo pouze 27 % paprsků, 63 % je absorbováno povrchem střechy a 13 % je přeneseno substrátem. Tím, že je množství odražených paprsků výrazně nižší, než množství odražených paprsků z běžných střech či zastavěných ploch, dochází k menšímu oteplování daného místa. Výstavbou zelených střech ve větších městech se dají značně redukovat tzv. tepelné ostrovy. Tepelný ostrov je oblast ve velkých městech, kde je tepleji, než v okrajových částech města či mimo něj. Tepelný rozdíl je patrný hlavně v noci. Vzniká nahrazováním přírodních zelených ploch zpevněným povrchem – beton, cement, asphalt. Zelené plochy udržují nižší teploty a vyšší vlhkost ve městech díky schopnosti zadržení dešťové vody. Zadržená voda z vegetačních střech není odváděna do kanalizační sítě v plném objemu, ale část srážek se pomocí evapotranspirace vegetačního povrchu dostává zpět do atmosféry. (Berndtsson, 2009)

#### 3.4.4. Filtrace polutantů z dešťové vody

Dešťové srážky lze vnímat jako čistou vodu. Nemusí tomu tak být vždy. V některých oblastech, zejména v urbanizovaném území, kde se nachází průmysl a větší koncentrace dopravy, může docházet ke kyselým deštům. Některé srážky, zejména první splach, sebou přináší například prvky těžkých kovů či pesticidy, které jsou typické pro zemědělské oblasti. Zelená střecha může v tomto případě působit jako přírodní filtr. Záleží však na typu substrátu, tloušťce substrátu, druhu vegetace, druhu srážky, povětrnostních podmínkách, typu odvodnění, místních zdrojích znečištění a fyzikálně chemických vlastnostech polutantů.

Jedním z nejznámějších polutantů je fosfor. Nachází se hlavně v urbanizovaných oblastech, kde je časté hnojení – zemědělské plochy, zahrádky. V některých případech může být koncentrace fosforu v odtoku ze zelené střechy vyšší než koncentrace fosforu ve srážkové vodě. Je to způsobeno přihnojováním vegetace na intenzivních zelených střeších. Dalším nežádoucím prvkem ve vodě je dusík. O vlivu zelené střechy na koncentraci dusíku bylo vytvořeno vícero studií. Závěry se však rozcházejí. Zatímco některé tvrdí, že koncentrace dusíku v různých formách je v odtoku z vegetační střechy nižší, jiné tvrdí, že koncentrace v dešťových srážkách a v odtoku zelené střechy je téměř stejná. Může to být spojeno s typem substrátu či jeho stářím. Studie intenzivní zelené střechy v Japonsku, kde byla použita anorganická půda, zaznamenala významný pokles koncentrace dusíku v odtoku (Berndtsson et al., 2009). Koncentrace těžkých kovů v odtoku z urbanizovaného území je vyšší než koncentrace těžkých kovů v odtoku ze zelené střechy. Vliv na snížení koncentrace těžkých kovů z odtoku zelené střechy má především vegetace. Dokazuje to studie od Steusloffa (1998), kde autor zkoumal koncentrace vybraných prvků: olovo, zinek, měď a kadmium v různých ročních obdobích na polointenzivní a intenzivní zelené střeše. V létě zatravněná polointenzivní střecha zachytila 99 % Pb, Cu, Zn a 98 % Cd. Intenzivní zelená střecha se zatravněním vykazovala 97% zadržení Cu, 96% Zn, 92% Cd a 99% Pb. Také v zimních měsících zachytila polointenzivní zelená střecha více těžkých kovů a to 68 % Cu, 92 % Zn, 88 % Cd a 94 % Pb.

Intenzivní střecha dokázala zachytit v průměru o 20 % méně těžkých kovů. Výjimkou je olovo, kterého zachytila intenzivní střecha téměř stejné množství, jako polointenzivní střecha s vegetačním pokryvem.

Všeobecně zelené střechy upravují pH vody. Zatímco pH dešťové vody se pohybuje mezi 5- 6, tak pH vody při odtoku ze zelené střechy je 7 – 8. Lze tedy konstatovat, že zelené střechy zmírňují vliv kyselých dešťů.

#### **3.4.5. Redukce hluku a prašnosti**

Zelené střechy pozitivně neovlivňují pouze kvantitu a kvalitu vody. Dalšími benefity může být redukce prachu ve městech, kdy rostliny zachytávají prach a znečištění ovzduší a pak se jej při dešťových událostech zbavují filtrací vody v půdě. Zelená střecha může pro budovu zastávat funkci protihlukové clony.

#### **3.4.6. Ekonomické benefity**

Velkou výhodou je bezesporu ekonomická úspora. Ačkoliv je výstavba vegetační střechy nákladnou záležitostí, může také peníze ušetřit. Voda zachycená na zelené střeše nemusí být odváděna do veřejné kanalizace, ale je zde možnost ji odvádět do zásobníku. Tuto vodu lze pak dále využívat jako užitkovou například pro zalévání, praní nebo splachování toalet. Jelikož zelená střecha působí také jako tepelná izolace, není potřeba v zimě tolik přitápět a v létě naopak klimatizovat, což znamená úsporu kupovaných energií. V neposlední řadě ekonomických výhod zelených střech je možno zmínit delší životnost střechy, jelikož vrstvy vegetační střechy chrání základní konstrukci střechy budovy.

### **3.5. Skladba intenzivní zelené střechy**

Při výstavbě intenzivní zelené střechy je nutno použít vícevrstvé vegetační souvrství. Základními prvky jsou: Vegetační vrstva (tvořena směsí těžké a lehké půdy) – filtrační vrstva – drenážní vrstva – ochranná a separační vrstva – hydroizolace odolná vůči prorůstání kořenů. Požadavky na použití materiálů, jejich kvalitu a způsob použití lze konkrétněji nalézt ve *Standardech pro navrhování, provádění a údržbu: vegetační souvrství zelených střech.* (Burian et al., 2016)



Vegetační vrstva je vrstva tvořena směsí substrátu, ve které jsou vysázeny rostliny. Výběr správného substrátu je jednou z nejdůležitějších částí projektování zelené střechy. Střešní substrát by měl splňovat základní parametry uvedené ve *Standardech pro navrhování, provádění a údržbu: vegetační souvrství zelených střech*. Na intenzivních zelených střechách se pěstují náročnější rostliny, a proto je nutno použít substrát s velkou hydroakumulační schopností a s dostatkem živin. Tyto substráty mívají vyšší objemovou hmotnost okolo 850–1650 g/l v nasyceném stavu. Při návrhu intenzivní střechy může být podíl těžké substrátu tvořit pouze vrchní třetinu vegetační vrstvy. Ve spodní části lze použít lehčí substrát, který je propustnější a má menší objemovou hmotnost. Zrnitostní křivka substrátu by téměř neměla obsahovat jemné vyplavitelné částice. Nežádoucí složkou jsou také semena plevelů. (Burian et al., 2016)

Substrátové směsi se preferují před zeminami. Jsou vyráběny z drcených expandovaných jílu, porézních hornin, písku, jílu, zeminy a organických komponentů. Organickým komponentem může být rašelina či kompost. Mocnost vegetační vrstvy intenzivní zelené střechy se podle zdrojů liší (Tabulka 1). Obecně platí, že mocnost vegetační vrstvy intenzivní zelené střechy se pohybuje od 150 mm. V případě, že se zelená střecha nachází v suché oblasti, je vhodné mocnost substrátu zvětšit. (Burian et al., 2016)

Filtrační vrstva brání vyplavování jemných částic z vegetační vrstvy do vrstvy drenážní, čímž ji chrání od zanesení, které by snížilo její účinnost. Filtrační vrstva bývá tvořena geotextilií.

Drenážní vrstva může být tvořena vrstvou štěrku, lávy, keramzitu, drenážními panely z recyklátů či hydrofilní vlny nebo může být použita nopová folie. Drenážní vrstva má za úkol odvádění přebytečné vody do odvodňovacího zařízení.

Ochranná vrstva chrání hydroizolaci střechy před mechanickým poškozením. Je tvořena geotextilií o plošné hmotnosti minimálně 300 g/m<sup>2</sup>.

Důležitou součástí intenzivní zelené střechy je vybudování odvodňovacího systému. Obvykle se provádí pomocí střešních vtoků nebo odvodňovacích žlabů. Tyto prvky musí být celoročně přístupné pro jejich údržbu a kontrolu. Z toho důvodu jsou nad vtoky instalovány kontrolní šachty. V okolí odvodňovacích žlabů je doporučeno použít obsyp z praného kameniva frakce 16/32, aby se minimalizovalo jejich zanesení či zarůstání. Návrh odvodňovacího systému se stanoví výpočtem součinitele  $C$ , který vyjadřuje schopnost povrchu odvádět srážkovou vodu. V případě zelených střech je doporučená hodnota  $C = 0,3-0,8^9$ . (Burian et al., 2016)

### 3.6. Trendy posledních let

V posledních letech se ubírá směr lidí ve společnosti zpět k přírodě. Ať už se jedná o životní styl, stravu, oblékání, tak také v oblasti architektury a urbanismu je zřejmá snaha zakomponovat přírodu zpátky do měst. Jedním z ukázkových příkladů je město Singapur. Singapur, zvaný také zelené město, je ukázkou toho, jak může i městský stát s pěti a půl miliony obyvateli žít v souladu s přírodou. Zeleň tvoří více než deset procent zástavby. Bývalý premiér Lee Kuan Yew již od 70.let 20.století prosazoval výstavbu městských parků a zahrad. Zeleň se zde nepřizpůsobuje zástavbě, ale naopak. Singapur se díky rozsáhlému systému parků a zahrad může pyšnit nejfunkčnějším systémem biokoridorů ze všech metropolí na světě. V současnosti je nedostatek prostoru na budování nových parků a zahrad na území města, proto se ozelenění přesouvá na budovy. Staví se zde budovy se zelenými střechami a balkony. (Dohnal, 2013) Mezi nejznámější budovu patří School of Art, Design and Media, Nanyang Technological University, která disponuje zelenou střechou. Jako další zelenou budovu je vhodné zmínit Tree House v Bukit Timah, který se v roce 2014 zapsal do Guinnessovy knihy rekordů jako nevyšší vertikální zelená zahrada. Jedná se totiž o ozelenění 24 patrové budovy. (Tan, 2018)



Obrázek 2 Khoo Teck Puat Hospital, Singapur Autor: Kateřina Čermáková, 30.3.2019

Trendy posledních let v oblasti výstavby zelených střech, jak už intenzivních, či extenzivních se snaží kombinovat zelené střechy s přítomností fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely jsou oblíbené a často využívané pro své nesporné výhody. Energie vyprodukovaná solárními panely pochází z obnovitelného zdroje, má tichý provoz a finanční náklady na energii jsou nízké. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a výroba samotných fotovoltaických článků, která není úplně šetrná k životnímu prostředí. Některé solární panely mohou během svého životního cyklu vyprodukovat méně energie, než bylo použito na její výrobu.

Kombinace fotovoltaických panelů s vegetační střechou se používá stále častěji. Kritéria pro výběr vegetace pro zelenou střechu s fotovoltaickými panely jsou kromě základních stanovištních podmínek doplněny o vliv přítomnosti panelů. V okolí fotovoltaických panelů je vhodné vysazovat rostliny, které preferují stín a nepotřebují velké množství vody. Ve studii (Schindler, 288-299, 2018) bylo prokázáno, že pod fotovoltaické panely se nedostává tolik dešťové vody. Dešťová voda, která dopadá na panel, po něm zteče ve směru naklonění, tudíž se dešťová voda pod panel nedostane

a zároveň ve směru naklonění je přítok dešťové vody vyšší než na zbytku nezakryté vegetační plochy. Fotovoltaické panely také stíní rostlinám ve svém okolí, proto je vhodné vybírat stínomilné rostliny. Ve studii byla dokázána přítomnost více druhů členovců a mikroorganismů v půdě na zelené střeše se solárními panely než na zelené střeše bez solárních panelů, což bylo nejspíš způsobeno přítomností pohyblivého stínu, který solární panely vytváří. Při návrhu umístění panelů a výběru rostlin je potřeba zohlednit také výšku rostlin a jejich umístění kvůli stínění rostlin na panely. Výhodou pro solární panely v kombinaci s vegetačním pokrytím střechy je schopnost rostlin zadržovat prach z okolí, díky čemuž se prach neusadí na panelech a nesnižuje tak jejich absorpci slunečního záření. Předpoklad, který byl ve studii (Schindler, 288-299, 2018) vyvrácen, byl ten, že v letních měsících zeleň na vegetační střeše ochlazuje její povrch a okolí, což má pozitivní vliv na teplotu povrchu solárních panelů, kterým prokazatelně se zvyšující se teplotou klesá jejich účinnost.

### 3.7. Legislativní prostředí

V legislativě České republiky není téma střešních zahrad zvláště ošetřeno. Zelené střechy jsou zmiňovány pouze okrajově. Jedním ze zákonů, který se zmiňuje o tématu zelených střech je Zákon č. 183/2006 Sb. Zákon o územním plánování a stavebním řádu. „*Tento zákon upravuje ve věcech územního plánování zejména cíle a úkoly územního plánování, soustavu orgánů územního plánování, nástroje územního plánování, vyhodnocování vlivů na udržitelný rozvoj území, rozhodování v území, možnosti sloučení postupů podle tohoto zákona s postupy posuzování vlivů záměrů na životní prostředí, podmínky pro výstavbu, rozvoj území a pro přípravu veřejné infrastruktury, evidenci územně plánovací činnosti a kvalifikační požadavky pro územně plánovací činnost.*“<sup>1</sup> Mezi cíle, které jsou v tomto zákoně uvedeny, patří uplatňování znalostí z architektury, urbanismu, památkové péče a také ekologie. Dále se zákon zabývá podmínkami pro snižování nebezpečí přírodních katastrof, snižování negativních vlivů záměrů na území či

---

<sup>1</sup> § 1 odst. 1 zákona č. 183/2006 Sb. stavební zákon

navrhování kompenzačních opatření. Pod každý z těchto cílů spadá výstavba vegetačních střech. (Dostal, 2017)

Dalším zákonem, kterému výstavba zelených střech podléhá je Zákon č. 114/1992 Sb. Zákon České národní rady o ochraně přírody a krajiny. Ten si klade za cíle vytváření a udržitelnost přírodní rovnováhy v krajině. Nástroji pro tyto cíle mohou být zejména ochrana územního systému ekologické stability krajiny, ochrana půdního fondu, ovlivňování vodního hospodářství v krajině nebo obnova a vytváření nových přírodně hodnotných ekosystémů. (Dostal, 2017)

Jako největší přednost zelených střech se udává jejich schopnost zadržovat srážkovou vodu a snížit tím objem vody, který se dostává do veřejných kanalizačních sítí. Z toho důvodu je vhodné hledat největší oporu zelených střech ve vodním zákoně. Zákon č. 254/2001 Sb. Zákon o vodách a o změně některých zákonů nařizuje povinnosti při nakládání se srážkovou vodou, kdy je na prvním místě preferována možnost zasakování (vyhláška č.501/2006 Sb., § 20 odst. 5, 2006). „(1) Stát může poskytnout finanční prostředky k úhradě výdajů na opatření ve veřejném zájmu, zejména pro (...) p) vsakování, zadržování a odvádění srážkových vod...“<sup>2</sup> (Dostal, 2017)

Mnohem více než v zákonech se výstavbou zelených střech zabývají normy a navrhovací standardy. Základním dokumentem pro návrh vegetačních střech jsou Standardy pro navrhování, provádění a údržbu – Vegetační souvrství zelených střech (Burian et al., 2016). Tyto standardy obsahují úvod do zelených střech, základní terminologii, dělení zelených střech, základní parametry a požadavky jednotlivých vrstev vegetačního souvrství a jejich funkce. Závěr je věnován dokončovacím pracím a následné péči o vegetační střechu. Tento dokument není závazný.

Normy, které ovlivňují návrh a výstavbu zelených střech jsou:

---

<sup>2</sup> § 102 odst. 1 písm. p) zákona č. 254/2001 Sb. vodní zákon

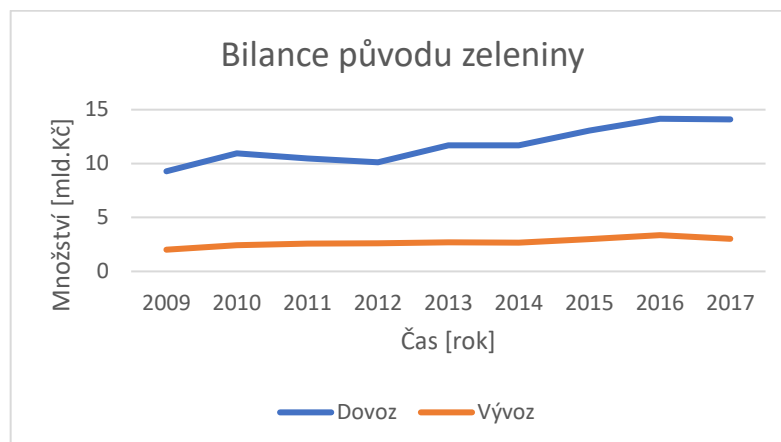
- ČSN 73 1901 Navrhování střech – základní ustanovení
- TNV 95 9011 Hospodaření se srážkovými vodami
- ČSN 75 6760 Vnitřní kanalizace
- ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov
- ČSN EN 13948 Hydroizolační pásy a fólie
- ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí – část 1-1: Obecná zatížení – objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb a další

Použití norem není závazné, ale doporučené. V uvedených normách lze nalézt doporučení pro sklony střech, provedení hydroizolací, umožnění přístupu na střechu, způsoby nakládání se srážkovou vodou či požadavky pro hydroizolaci proti prorůstání kořeny rostlin.

### 3.8. Produkční zelené střechy

V urbanizovaných územích, především ve větších městech, kde nejsou vhodné plochy pro zakládání polí a zahrad, začaly díky rozšířenosti zelených střech vznikat také střešní zahrady s produkční funkcí. Lidé se v dnešní době opět začínají obracet k přírodně blízkým produktům, a tak navštěvují farmářské trhy, anebo si pěstují alespoň některé bylinky a drobnou zeleninu doma v truhlíku. Možnost vybudovat si produkční zelenou střechu je řešení pro lidi, kteří nemají možnost nebo prostor si postavit vlastní zahradu na zemi. Výstavba a rozšiřování střešních zahrad by mohla vést k větší zemědělské soběstačnosti lidí. V posledních letech je trend zemědělství v poklesu a podle výroční zprávy z vydané ČMSZP denně ubývá v ČR až 11 ha zemědělské půdy. Pěstování zeleniny a ovoce není pro zemědělce výhodné, a tak se přiklánějí k pěstování plodin, které jsou pro ně výnosnější. Příkladem může být řepka olejná či vinice. Důsledkem úbytku orných ploch a úbytku pěstování základních potravin je potřeba mnoho druhů dovážet z jiných států, což je zátěž pro životní prostředí. Potravin jsou do ČR dováženy lodní a kamionovou dopravou. Podle Českých novin byl import zeleniny do ČR v roce 2009 648.024 tun a v roce 2018 855.685 tun. Export zeleniny ze země také roste. Vzrostl z 150.135 tun v roce 2009 na 191.000 tun exportované

zeleniny za rok 2018. Největšími dovozci zeleniny do České republiky jsou Nizozemsko, Španělsko, Itálie a Polsko.



Obrázek 3 Graf bilance původu zeleniny v ČR

Problém dovážených potravin není jen občasná pochybnost kvality potravin, která má vliv na chuť plodin a na zdraví člověka, ale takto dovážené potraviny jsou zatíženy větší ekologickou stopou. S rostoucí vzdáleností dovozu stoupá množství emisí vypuštěných do ovzduší. Další negativum dovážených a nakupovaných potravin je stále větší obliba dodavatelů balit potraviny do plastových obalů. Snahou spotřebitelů i prodejců by tedy mělo být upřednostnění tuzemských potravin před dováženými, nakupování od místních farmářů či pěstování zeleniny svépomocí.

Pěstování vlastních potravin, i když třeba jen některých druhů a v omezeném množství, je docela časté na vesnicích a při okraji měst, kde jsou větší prostorové možnosti. Ve městě je takřka nemožné sehnat vhodný pozemek pro zahradičení. Proto je volba výstavby produkčních střeš, někdy zvaných střešní farmy, ideální do měst a předměstí.

Cílovou skupinou pro výstavbu produkčních zelených střeš jsou lidé a rodiny, kteří dávají přednost potravinám původem z Česka, bio potravinám, které nejsou zbytečně chemicky ošetřovány nebo geneticky upravovány. Další cílovou skupinou jsou zahrádkáři a různá komunitní centra.

Produkční zelená střeš je typ intenzivní střešní zahrady, na které lze pěstovat zeleninu a ovoce. Při výběru plodin je nutné brát v potaz především stanovištní podmínky a volit vegetaci úměrně tomu, kolik péče je

vyžadováno pro její pěstování. Součástí produkčních střech mohou být například také včelíny.

Z důvodu častější potřeby obhospodařování se často produkční střechy budují jako komunitní. Komunitní vegetační střecha bývá zbudovaná na společných prostorech, jako jsou střechy panelových domů či administrativních budov, střechy garáží, nemocnic a léčeben. Takovýto typ zelené střechy je přínosný nejen z ekologického a zdravotního hlediska, ale pomáhá také budovat mezilidské vztahy, jelikož se zde lidé mohou setkávat.

Na extenzivní zelené střeše je možnost produkce zeleniny či ovoce téměř nulová. Jedinou možností, jak dodat rostlinám potřebnou hloubku ke kořenění, je použití kontejnerů. Kontejnery mají své výhody i nevýhody. Výhodou je možnost pěstování druhů rostlin, které by při standardní tloušťce vegetační vrstvy extenzivních střech neměly správné stanovištní podmínky (greenroofplan, 2010). Na druhou stranu kontejner je relativně malá uzavřená plocha, tudíž neprobíhají interakce mezi jednotlivými půdními organismy. Je nutné brát v potaz také jejich hmotnost a správně kontejnery rozmístit, aby nedošlo k přetížení nosné konstrukce.

Intenzivní vegetační střecha může sloužit jako produkční pro pěstování ovoce a zeleniny i bez použití kontejnerů. Intenzivní produkční střecha s dostatečnou hloubkou substrátu se výrazně neliší od běžné zahrady na zemi. Součástí produkční zelené střechy bývá také systém zavlažování a odvodnění. (Sustainability of Urban Agriculture: Vegetable Production on Green Roofs, 2018)

Studie Economic and environmental sustainability and public perceptions of rooftop farm versus extensive garden z roku 2018 popisuje ekologické a ekonomické výhody a nevýhody tří typů střech. (Kim et.al., 2018) Srovnává klasickou plochou střechu bez ozelenění se dvěma typy zelené střechy, a to extenzivní zelenou střechou a střešní produkční zahradou. Obě zelené střechy mají plochu 140 m<sup>2</sup> a jejich skladba je totožná – hydroizolace, drenážní a separační vrstva a 200 mm lehčeného substrátu. Rozdíl je v typu vegetace. Na zelené střeše neprodukční byl vysázen mák červený, který je



třeba sýt každé dva roky. Střešní farma neboli produkční zelená střecha, je určena pro pěstování zeleniny, převážně brambor. Dále zde byly vysázeny rajčata a listový salát. Výsledky studie srovnávají finanční náklady těchto tří typů střech po dobu jejich životního cyklu (Obrázek 4).

Klasická plochá střecha s hydroizolací z uretanové pryže, která musí být obměňována každých 5 let, má za celý životní cyklus cca.40 let náklady v přepočtu na českou korunu přibližně 750 000 Kč, což je 5 360 Kč/m<sup>2</sup>.

Zelená neprodukční střecha, kde byl vysázen mák, má celkové náklady necelých 460 000 Kč za 40 let životního cyklu. Tato cena zahrnuje jak počáteční náklady, tak náklady na setí máku každé dva roky. Nejdražší položkou je lehčený substrát, který tvoří 36,3 % počátečních nákladů.

Zelená produkční střecha byla posuzována dvěma způsoby využití. První způsob posuzuje celý životní cyklus střešní farmy s pěstováním zeleniny bez jakýkoliv benefitů využití vypěstovaných plodin. Životní cyklus střešní farmy bez využití plodin 1,26 milionu korun. Jedním z benefitů produkční střešní zahrady je následné využití plodin. Jejich přímé využití, či prodej. Na střešní farmě o rozloze 140 m<sup>2</sup> lze průměrně vyprodukovat 160 kilogramů brambor. V případě prodeje těchto brambor lze za celý životní cyklus vydělat přibližně 370 tisíc korun (Jižní Korea). Když se odečte výtěžek od celkových nákladů střešní farmy, cena produkční zelené střechy klesne na 900 000 Kč. (Kim et.al., 2018)

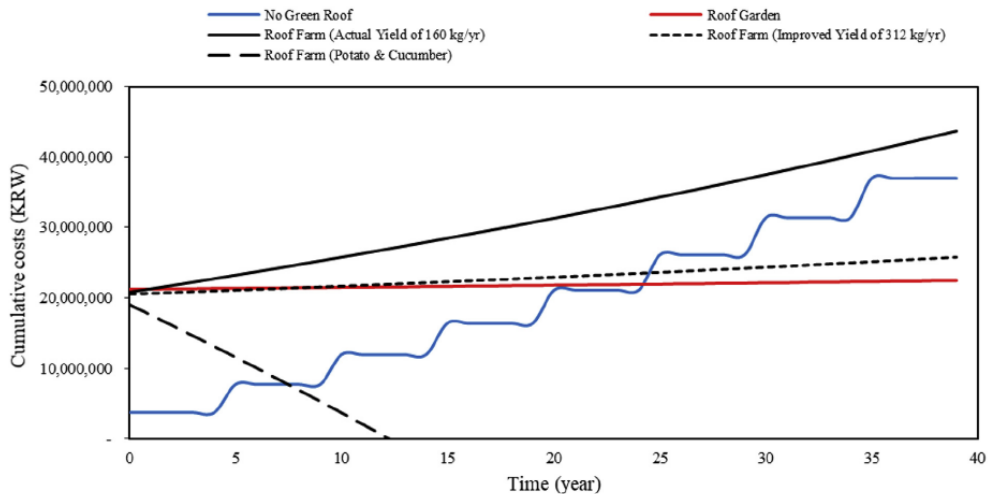


Fig. 1. Cumulative life cycle costs of flat roof, roof garden, and roof farm options over the lifetime and potential cost benefits of different food production options on roof farm.

Obrázek 4 Graf kumulativních nákladů Zdroj: *Economic and environmental sustainability and public perceptions of rooftop farm versus extensive garden (Euna Kim, 2018)*

Kumulativní porovnání nákladů na životní cyklus ukazuje, že neprodukční střešní zahrada, ačkoliv má velké počáteční náklady, za dobu funkce 40 let vyjde mnohem levněji než klasická plochá střecha s uretanovou hydroizolací. V grafu jsou zobrazeny také náklady na produkční zelenou střechu (Roof Farm) s pěstováním 160 kg brambor za rok, 312 kg/rok a při kombinaci pěstování brambor a okurky. Z grafu je patrné, že při pěstování brambor a okurek na 140 m<sup>2</sup> střešní zahradě je návratnost investice po 11 letech. (Kim et.al., 2018)

### 3.9. Experimentální instalace pro výzkum zelených střech

Na střeše budovy Ciutadella campus of University Pompeu Fabra (UPF) existuje několik pokusných instalací pro zkoumání zelených střech. Tyto pokusné instalace byly postaveny v roce 2016 a probíhají zde tři hlavní experimenty. První experiment se zaměřuje na srovnání různých druhů systémů zelených střech. Jsou zde instalovány extenzivní a semi-intenzivní střechy od různých dodavatelů. Měří se zde energetické úspory budovy, zejména tepelněizolační vlastnosti, vodní kapacita a filtrace polutantů z ovzduší. Je porovnávána také váha konstrukce zelené střechy a její cena. Druhý experiment se zaměřuje na nejvhodnější podmínky pro středně až dlouhodobé pěstování levandule na střechách Barcelony. Porovnání substrátů pro zelené střechy s klasickými zahradními substráty je cílem

třetího experimentu těchto pokusných ploch. Tyto experimenty vznikají ve spolupráci s Katalánskou Polytechnickou univerzitou (UPC) a Institutem pro životní prostředí a technologii v Barceloně (ICTA-UAB). (ExiVerd, 2016)

Dalším městem, kde jsou instalovány pokusné plochy zelených střech je Singapur. Jeden z projektů pro výzkum zelených střech se zabývá odtokovými poměry zelených střech. Bylo zde instalováno 5 pokusných ploch o rozměru 1x1m a byly zde měřeny odtokové křivky v průběhu dešťových srážek. Cílem tohoto výzkumu bylo změřit zmenšení vrcholu odtokové křivky a zpomalení odtoku. (Joshi, 2010)

V České republice je také postaveno několik experimentálních ploch pro výzkum zelených střech. Zelená střecha na ředitelství Botanické zahrady hl. města Prahy získala 3.místo v kategorii zelená střecha roku 2018: Veřejná zelená střecha extenzivní. Tato střecha zde plní funkci pobytovou, retenční, sbírkovou ale také pokusnou. Je vybudována v kombinaci extenzivní a polointenzivní střechy s různým sklonem. (Stavbaweb, 2018)

Pro fakultu stavební, ČVUT v Praze jsou nejvýznamnější pokusné instalace na střeše UCEEB (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov). Na střeše UCEEBu je instalováno mnoho pokusných ploch pro výzkum extenzivních zelených střech. Jsou zde zkoumány substráty a jejich vliv na odtok, termální režim, vodní režim (Jelínková, 2019) a růst vegetace a zaplevelení. Tyto substráty pochází od různých výrobců a jsou uloženy na několika typech odvodňovací vrstvy.

V Brně byla vybudována instalace pro výzkum extenzivních zelených střech nad parkovacím stáním – Brno Jih. Jedná se o poměrně malou plochu rozdělenou na dvě části. Na jedné části je vegetace zasazena do extenzivního substrátu a na druhé do čedičové vaty s 2 cm substrátu. Tloušťka obou ploch je 5-7 cm. Je zde měřena retenční schopnost, růst vegetace a chování v extrémních letních teplotách. (Greenville, 2014)

### 3.10. Typy substrátů dostupných v ČR

Díky stále většímu povědomí o zelených střechách jsou v České republice dostupné materiály pro jejich výstavbu. Konkrétně substráty se mohou dodávat v balené formě či volně ložené. Výhodou baleného substrátu může například jeho kompaktnost při převozu. Hodí se především pro menší stavby a stavby zelených střech svépomocí. Nevýhodou balených substrátů bývá vyšší cena než u volně loženého substrátu.

Mezi největší dodavatele nejen substrátu, ale celkově materiálu pro zelené střechy či jejich celkovou realizaci, patří firma ACRE, spol. s r.o. Dalším významným dodavatelem jsou Stavebniny DEK a.s., JENA či BB Com s.r.o. V Tabulce 2 jsou uvedené některé typy substrátu dostupné v Česku.

Tabulka 2 Typy vybraných dostupných substrátů v ČR

Název substrátu	Výrobce	Forma	Cena
Střešní substrát ACRE extensive	ACRE	Balený	2200 Kč/m <sup>3</sup>
Střešní substrát ACRE intensive	ACRE	Balený	2350 Kč/m <sup>3</sup>
Směs pro střešní zahrady intenzivní	JENA	Volně ložený/ balený	
Směs pro střešní zahrady extenzivní	JENA	Volně ložený/ balený	
Substrát střešní intenzivní DEK	Stavebniny DEK	Balený	2356 Kč/m <sup>3</sup>
Substrát střešní extenzivní DEK	Stavebniny DEK	Balený	2170 Kč/m <sup>3</sup>
Střešní substrát extenziv Premium	AGRO CS	Volně ložený/ balený	212 Kč/70l
Střešní substrát intenziv Premium	AGRO CS	Volně ložený/ balený	
Střešní substrát intenzivní s liadrainem	AGRO CS	Volně ložený/ balený	193 Kč/ 70l
Střešní substrát intenzivní	AGRO CS	Volně ložený/ balený	
Substrát pro střešní zahrady intenzivní - SSI	BB Com	Volně ložený/ balený	
Substrát pro střešní zahrady extenzivní- SSE	BB Com	Volně ložený/ balený	

Jednotlivé substráty se liší především účelem, pro který budou využívány. Od způsobu použití se odvíjí jejich složení. Často jsou substráty připravovány na bázi spongilitu, což je umělý silikát, který má vysokou schopnost zadržet vodu, a navíc dodávat živiny. Jindy může tvořit hlavní složku substrátu expandovaná břidlice, láva, pemza, liapor či cihelná drť. Ceny substrátů některých výrobců nejsou volně dostupné na internetovém obchodě.

## 4. Teorie k experimentální části

Pro přípravu k laboratorním zkouškám a použití vybraných přístrojů je vhodné uvést základní teoretické principy, na kterých jsou laboratorní měření založena. Kapitola 4.1. je věnovaná popisu Stokesova zákona, který je důležitý pro určení zrnitosti půdy v jemných frakcích. V laboratorní části je použit v kapitole 6.3.1. Zrnitost půdy v kap. 4.2. popisuje parametry jednotlivých zrnitostních frakcí. Díky křivce zrnitosti, která je zpracovaná v kapitole 6.3., lze následně odhadnout chování půdy.

Richardsova rovnice řešená v kapitole 4.5. se využívá v numerickém modelovacím programu HYDRUS 1D a popisuje proudění vody v nenasyceném půdním prostředí. Proudění v nenasycené zóně řeší také Darcy- Buckinghamův zákon a je uveden v podkapitole 4.4. Darcyho zákon, který je popsán v kapitole 4.3. je využíván při měření nasycené hydraulické vodivosti na přístroji Ksat v kapitole 6.5.

### 4.1. Stokesův zákon

Stokesova rovnice sedimentace popisuje rychlost usazování kulových částic. Na částici v disperzním prostředí působí několik sil: Vlastní tíha, vztlakové síly a odporové síly. Odporové síly obtékající částice lze popsat Stokesovým zákonem:

$$F_o = 6 \pi \eta r v \quad [\text{N}] \quad (1.1)$$

kde  $\eta$  je viskozita prostředí [ $\text{Ns.m}^{-2}$ ],  $r$  je poloměr částic [ $\text{m}$ ],  $v$  je rychlost částic [ $\text{m.s}^{-1}$ ].

Platnost Stokesova zákona je omezena na částice velikosti 0,2 - 0,0002 mm. Při těchto průměrech by mělo být proudění laminární. Turbulentní proudění může být patrné u částic s větším průměrem než 0,2 mm. Rychlost sedimentace částic menších než 0,0002 mm může být ovlivněna Brownovým pohybem, což je náhodný pohyb mikroskopických částic v kapalném prostředí. (Hradilová, 2012)

## 4.2. Zrnitost půdy

Zrnitost půdy je fyzikální vlastnost půdy. Ovlivňuje hydro-pedologické procesy, zvětrávání půdy a půdotvorný proces, biologickou činnost půdy, stanovištní podmínky rostlin a tepelný režim půd.

Půdní částice se dle jejich průměru řadí mezi jemnozem a skelet. Jemnozem zahrnuje frakci jílu, prachu a písku do průměru 2 mm. Skelet obsahuje frakci hrubého písku nad 2 mm, štěrk a kamení.

Jíl (0-0,002 mm) – nejmenší částice zrnitostního složení půdy. Přítomnost většího množství jílovitých částic v půdě značí malou propustnost vody a nízký obsah živin. Jílovité půdy nebývají moc úrodné. (CENIA, 2013)

Prach (0,002-0,5) – Hlinité půdy obsahují méně než 20 % prachových částic. Pokud půda obsahuje mezi 20 a 30 % prachových částic, lze ji označit za sprašovou půdu. Sprašové půdy mají dobré fyzikální vlastnosti, proto jsou vhodné pro růst vegetace i přítomnost mikroorganismů. (CENIA, 2013)

Písek (0,05-0,2) – jsou částice převážně křemičitanových hornin a živců. Přítomnost písku v půdě zajišťuje dobrou propustnost vody, ale také její rychlejší vysychání. Písčité půdy jsou chudší na mikroorganismy, proto nejsou tak úrodné. (CENIA, 2013)

Pro znázornění zrnitosti půd se používá křivka zrnitosti. Křivka zrnitosti je součtová čára zobrazující hmotnostní zastoupení zrn dle jejich velikosti vyjádřené v podílu k celkové navážce vzorku.

V České republice se používá pro klasifikaci půdního druhu Novákova klasifikace. Pro určení půdní třídy se používá trojúhelníkový diagram.

Obsah částic < 0,01 mm [mm]	Označení durhu půdy	Zkratka	Klasifikace půdy
0 - 10	písčítá	P	lehká
10. - 20	hlinitopísčítá	HP	
20 - 30	písčitohlinitá	PH	středně těžká
30 - 45	hlinitá	H	
45 - 60	jílovitohlinitá	JH	těžká
60 - 75	jílovitá	JV	
>75	jíl	J	

Obrázek 5 Klasifikace půdního druhu dle Nováka, Zdroj: příloha č.8 k vyhlášce č.275/1998 Sb.

### 4.3. Darcyho zákon

V roce 1856 Henry Darcy pomocí mnoha experimentů popsal rychlost průtoku kapaliny a plynu v pevném porézním prostředí. Darcyho zákon, někdy nazýván Darcyho filtrační zákon, je vztah popisující proudění kapaliny v nasyceném porézním prostředí:

$$v = K_s i_h \quad (1.2)$$

kde  $i_h$  je hydraulický sklon  $\Delta h/L$ ,  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Ze základní rovnice Darcyho zákona lze odvodit rovnici pro průtok vody nasyceným prostředím, která vypadá následně:

$$Q = \frac{K_s A \Delta H}{L} \quad (1.3)$$

kde  $Q$  je průtok vody za jednotku času [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  $A$  je průtočný průřez [ $m^2$ ],  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $\Delta H$  je rozdíl hydraulických výšek [ $m$ ],  $L$  je délka vzorku [ $m$ ].

Z matematického vztahu jsou patrné, že: průtok vody je nepřímo úměrný délce válce, přímo úměrný průtočné ploše a přímo úměrný rozdílu hydrostatických tlaků. Průtok je také závislý na materiálu, kterým kapalina proudí – koeficient daného materiálu. (Kutílek, 1994)

Darcyho zákon je lineární závislost, která je platná pouze v nasycené zóně. Nasycené proudění znamená, že proudění probíhá v nasyceném

prostředí, ve kterém jsou i všechny póry vyplněné vodou. Příkladem může být proudění podzemní vody pod hladinou podzemní vody HPV. (Kutílek, 1994) Odchytky platnosti Darcyho zákona mohou nastat při velmi malém hydraulickém gradientu v jemnozrnných materiálech, nebo naopak při velmi velkém hydraulickém gradientu, kdy již nelze proudění klasifikovat jako laminární.

#### 4.4. Darcy-Buckinghamův zákon

Proudění vody v nenasyceném prostředí má podobné chování, jako proudění v nasyceném prostředí. Rozdíl je, že při nenasyceném proudění jsou některé póry vyplněny vzduchem a při proudění se mohou plnit vodou nebo naopak se mohou některé póry odvodňovat. (Kutílek, 1994)

Dřív, než Henry Darcy toto proudění popsal Edgar Buckingham (1907), proto se rovnice popisující proudění v nenasyceném prostředí nazývá Darcy-Buckinghamova. (Kutílek, 1994)

$$q = -K(\theta)\nabla H \quad (1.4)$$

kde  $q$  je objemový tok [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  je hydraulická výška [m],  $K(\theta)$  je součinitel nenasycené vodivosti závislý na vlhkosti  $\theta$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

#### 4.5. Richardsova rovnice

Richardsova rovnice popisuje vlhkostní pole půdy. Jedná se o zjednodušení obecných rovnic proudění v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí pro jednorozměrné darcyovské proudění, ve kterém se předpokládá zanedbatelný vliv plynné fáze. (Císlerová, Jelínková, 2005)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right) - S \quad (1.5)$$

kde  $\theta$  je objemová vlhkost [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ],  $t$  je čas [s],  $K$  je nenasycená hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $h$  je tlaková výška [m],  $S$  je člen zdrojů a propadů [ $\text{s}^{-1}$ ],  $x$  je prostorová souřadnice [m],  $\alpha$  je úhel mezi vertikální osou a směrem proudění [°].



## 5. Numerické modelování odtoku

K modelování odtoku byl využit volně dostupný kód pro řešení jednorozměrného, neustáleného, nenasyceného proudění vody a transportu tepla v půdě HYDRUS 1D (Šimůnek, 2008). V tomto softwaru lze zvolit několik typů úloh. V této práci byl HYDRUS 1D využit pro modelování transportu vody v půdě pro vybrané návrhové srážky na základě půdních charakteristik tj. retenční křivky a nasycené hydraulické vodivosti. Jako porézní prostředí byla zvolena půda s různým nasycením. Pro modelování program využívá Richardsovy rovnice (1.5) pro proudění v nasyceném a nenasyceném prostředí. Hydraulické vlastnosti půdy jsou popsány modifikovaným van Genuchtenovým vztahem:

$$\theta_{(h)} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (-\alpha h)^n)^m} \text{ pro } h < 0, \text{ pro } h \geq 0 \text{ platí } \theta_s = \theta_{(h)} \quad (1.6)$$

kde  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_s$  a  $\theta_r$  jsou parametry,  $\alpha > 0$ ,  $n > 1$ ,  $m = 1 - 1/n$ .

Jako vstupní údaje pro HYDRUS 1D byly použity parametry van Genuchtenovy rovnice (1.6) vypočtené programem RETC a změřená hodnota hydraulické vodivosti  $K$ . Jako okrajové podmínky modelu byly zvoleny hodnoty návrhových srážek z normy ČSN EN 752.

Celkem bylo provedeno šest simulací pro dvě hodnoty nasycenosti půdního prostředí při třech hodnotách návrhových srážek (Tabulka 4). Návrhové srážky s dobrou trvání 15, 60 a 1440 minut byly simulovány jako blokové. Pro modelování byla zadána výška půdního profilu 60 cm.

Tabulka 3 Vybrané hodnoty návrhových úhrnů srážek pro ČR, ČSN EN 752

Nadmořská výška	Periodicita	Doba trvání srážek [min]																
		5	10	15	20	30	40	60	120	240	360	480	600	720	1080	1440	2880	4320
[m n.m.]	P [rok <sup>-1</sup> ]	Návrhové úhrny srážek $h_d$ [mm]																
Do 650	0,2	12	18	21	23	25	27	29	35	39	44	49	50	51	54	55	73	85
	0,1	14	21	24	27	30	32	35	42	46	54	56	58	59	63	66	88	100

Tabulka 4 Přehled modelů pro HYDRUS 1D a jejich parametrů

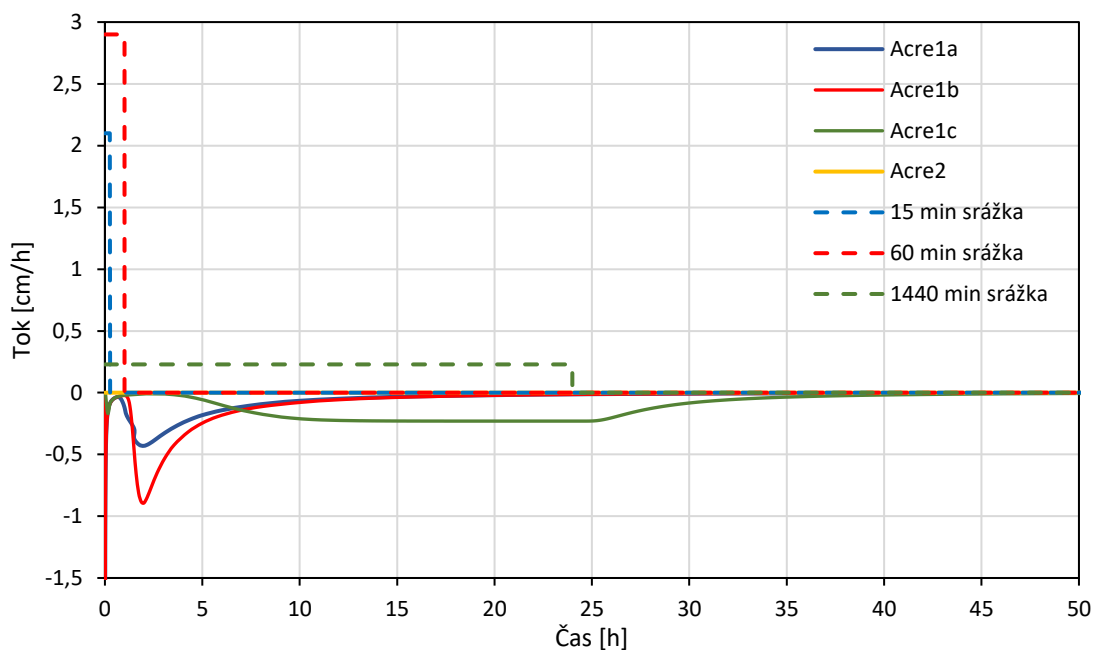
Scénář	Horní okr. podmínka	Dolní okr. podmínka	Doba trvání srážky	Intenzita srážky
			min	mm.h <sup>-1</sup>
Acre1a	-60	0	15	84
Acre1b	-60	0	60	29
Acre1c	-60	0	1440	2,29
Acre2a	-1000	-300	15	84
Acre2b	-1000	-330	60	29
Acre2c	-1000	-330	1440	2,29

Z modelu RETC byly vypočteny hodnoty parametrů  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_r$  a  $\theta_s$ . Hodnota  $\alpha = 0,17887$ ,  $n = 1,42517$ ,  $\theta_r = 0,0364$  a  $\theta_s = 0,35692$ .

Hodnota hydraulické vodivosti  $K$  byla zvolena průměrná hodnota zjištěna v kapitole 6.5. Hydraulická vodivost  $K=33,4$  cm.den<sup>-1</sup>.

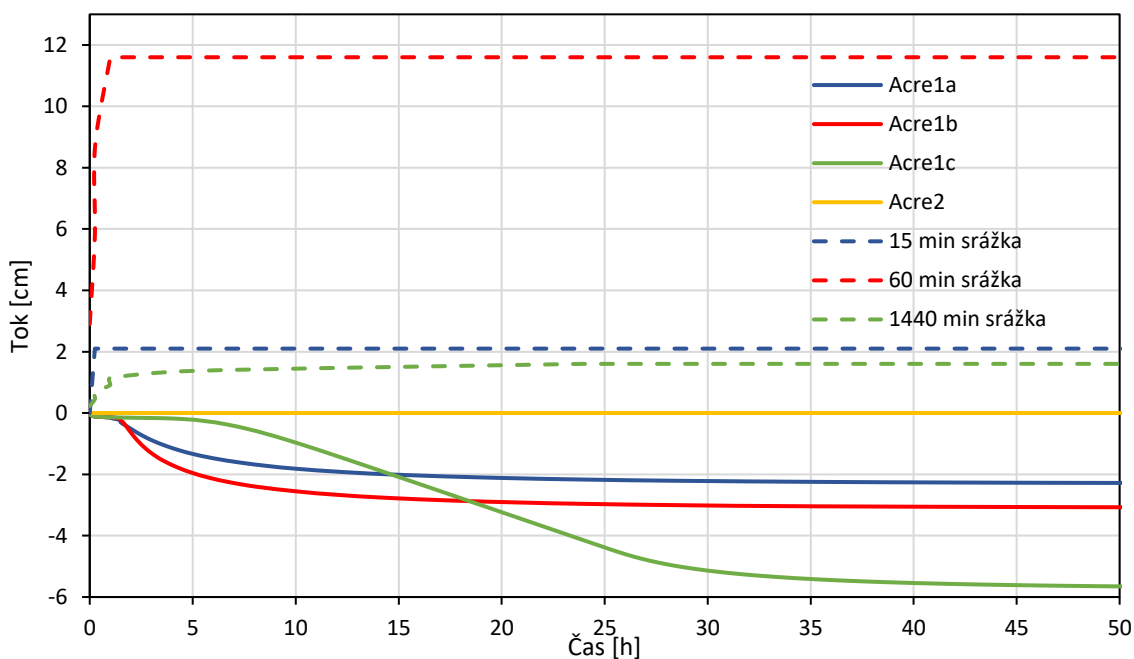
Bylo zvoleno 6 pozorovacích bodů v profilu a to v hloubce 0, 5, 10, 15, 30, 45 a 60 centimetrů. Z výsledného scénáře pro každou situaci bylo stěžejní informací množství vody, která odeče ze dna profilu vBOT. Z výsledných hodnot lze zjistit kolik srážkové vody infiltruje navržený půdní profil se substrátem Acre intensive o hloubce 60 centimetrů a kolik srážkové vody odeče do případné dešťové kanalizace, akumulární či vsakovací nádrže.

Graf na Obrázku 6 zobrazuje hodnoty okamžitého odtoku vBOT ze dna modelovaného profilu půdy pro nasycené prostředí. Nejvyšší hodnota okamžitého odtoku vznikla při scénáři Acre1b, který modeluje půdní profil při jednohodinové srážce s intenzitou 29 mm.h<sup>-1</sup>. Z grafu lze také vyčíst, že ačkoliv scénář Acre1b dosáhl nejvyššího okamžitého odtoku 0,894 cm.h<sup>-1</sup>, odtok měl velmi krátkou dobu trvání. Scénář Acre1c dosahuje sice nejnižší hodnoty okamžitého odtoku, avšak odtok má trvání po několik hodin.



Obrázek 6 Scénáře pro okamžitý odtok v programu HYDRUS

Obrázek 7 zobrazuje graf kumulativního odtoku z půdního profilu substrátu Acre intensive o hloubce 60 centimetrů. Jednoznačně největší celkový odtok 5,52 cm vykazuje scénář Acre1c. Z grafu je patrné, že odtok z profilu Acre1c začal se zpožděním oproti zbylým dvěma modelům. Je to způsobeno především nižší intenzitou srážky. Odtoky při scénářích Acre1a a Acre1b mají kratší dobu zdržení vody v půdním profilu.



Obrázek 7 Scénáře pro kumulativní odtok v programu HYDRUS

Scénáře Acre2a, Acre2b a Acre2c (na Obrázku 6 a 7 souhrnně jako Acre2), které se odehrávaly v podmínkách polní kapacity  $h_{-1000}$  -  $h_{-330}$  cm, kdy není půdní prostředí nasycené vodou, vykazovaly nulový odtok.

## 6. Laboratorní část

Ve všech laboratorních zkouškách byl zkoumán substrát Acre intensive, který byl získán 16.1.2019 od firmy Acre. Technický list tohoto substrátu bude přiložen v přílohách.

### 6.1. Retenční čára

Retenční čára vyjadřuje vztah mezi půdní vlhkostí a sací tlakovou výškou v rovnovážném stavu. Je základní hydraulickou charakteristikou, která vyjadřuje schopnost půdy udržet vodu.

Pro zjištění retenční čáry bylo použito pět vzorků půdy v Kopeckého válečku. Tyto vzorky byly zhutněny na přibližnou objemovou hmotnost  $1000 \text{ g.cm}^{-1}$  (110 gramů substrátu v každém vzorku). Poté se tyto vzorky nechaly nasytit v destilované vodě po dobu 5 dní a byly zváženy  $m_{sat}$ . Nasycené vzorky byly umístěny na pískový tank v laboratoři (Obrázek 8). Postupným zvyšováním podtlaku (změnou sací tlakové výšky) se vzorky odvodnily. Postupem času došlo k rovnovážnému stavu a tehdy se vzorky zvažily  $m$ . Po zvážení byly vzorky opět umístěny na pískový tank a byla nastavena jiná hodnota sací tlakové výšky. V časových intervalech byla měněna sací tlaková výška od 0 až do -50 centimetrů.



Obrázek 8 Vzorky substrátu na pískovém tanku, 12.2.2019

Pro zjištění vlhkosti při vyšších sacích tlacích se přetlakový aparát. Z časových důvodů byla na přetlakovém aparátu změřena pouze jedna hodnota. Měření na přetlakovém aparátu na vzorcích nadále pokračuje i po dokončení této práce. Z toho důvodu také nemohla být na některých vzorcích změřena hmotnost suchého vzorku  $m_s$  těchto konkrétních vzorků. Pro zjištění  $m_s$  byly připraveny další tři vzorky do Kopeckého válečku a zhutněny na objemovou hmotnost  $1000 \text{ g.cm}^{-1}$  stejně jako původní vzorky. Tyto vzorky byly nasyceny v destilované vodě a zváženy ( $m_{sat}$ ). Poté se nechaly vysušit při teplotě  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  a byla zvážena hmotnost vzorků v suchém stavu ( $m_s$ ). Z těchto tří vzorků byla následně vypočtena průměrná hodnota suchého vzorku, která byla využita při výpočtu objemové vlhkosti retenční křivky.

Na přístroji WP4C, který je k dispozici na UCEEB, byly změřeny hodnoty tlaků pro objemovou vlhkost blížící se nule. Pro měření na WP4C byly vytvořeny dva větší vzorky. Jeden ze vzorků byl umístěn do skleněného desikátoru bez přístupu vzduchu spolu s nasyceným roztokem chloridu draselného (KCl), který upravil vlhkost vzorku na známou hodnotu vzduchu 85 %. Druhý vzorek byl také umístěn do desikátoru, ale pro získání vlhkosti 43 % byl použit roztok uhličitanu draselného ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Po 13 dnech byly oba vzorky převezeny do laboratoře UCEEB, kde bylo provedeno měření na přístroji WP4C.



Obrázek 9 Skleněné exikátory se vzorky půdy, 5.4.2019

Dne 18.5.2019 bylo měřeno celkem 6 vzorků půdy. 3 vzorky půdy s vlhkostí odpovídající vlhkosti vzduchu při roztoku KCl a 3 vzorky půdy s roztokem K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.



Obrázek 10 Průběh měření tlaku na přístroji WP4C, 18.4.2019

Z hmotností změřených vzorků při známé tlakové výšce se vypočte objemová vlhkost vzorku  $\theta$ . Opakováním postupu pro různé hodnoty tlakové výšky získáme retenční čáru  $\theta(h)$ .

Tři vzorky potřebné pro výpočet suché hmotnosti vzorku substrátu byly zváženy v původním stavu  $m_c$ , plně nasyceném stavu  $m_{sat}$  a v suchém stavu  $m_s$ . Všechna přímá vážení byla včetně Kopeckého válečku (KV), gumičky a sítky (gs) a váženkou (v). Jednotlivé pomůcky byly zváženy a zaneseny do Tabulky 5. Hlavním výstupem tabulky je průměr poměru hmotností suchého a nasyceného vzorku. Touto hodnotou se násobí nasycené hmotnosti původních pěti vzorků použitých pro měření objemové vlhkosti.

Tabulka 5 Výpočet průměrné hmotnosti suchého vzorku

Vzorek	$m_c$	$m_{kv+gs}$	$m_v$	$m_{sat(kv+gs+v)}$	$m_{sat}$	$m_s(kv+gs+v)$	$m_s$	$m_s/m_{sat}$
	g	g	g	g	g	G	g	
216KV	218,7	108,7	18,11	259,4	132,59	219,8	92,99	0,701335
294ŠA	219,48	109,48	26,18	259,4	123,74	229,19	93,53	0,755859
66KV	221,27	111,27	31,94	259,4	116,19	236,72	93,51	0,804802
							průměr	0,753999

Kde  $m_c$  je hmotnost vzorku vč. Kopeckého válečku, gumičky a sítky [g],  $m_{sat}$  je hmotnost nasyceného vzorku [g],  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku [g]

Tabulka 6 Hmotnosti vzorků na pískovém tanku a podtlakovém aparátu

Vzorek	hm. po úpravě vzorku	hm. sítky a gumičky	hm. nasyc.	-3,00	-6,00	-10,00	-31,50	-51,50	104,00
				cm	cm	Cm	cm	cm	cm
Datum		08.02.19	12.02.19	01.03.19	04.03.19	08.03.19	15.03.19	20.03.19	15.04.19
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
201KV	291,98	0,93	257,9	246,16	245,06	243,44	236,57	233,24	226,43
457KV	321,39	1,31	255,37	246,58	245,59	244,07	237,66	234,34	227,03
499ŠA	329,05	1,02	256,74	246,97	246,01	244,71	238,65	235,41	228,26
389ŠA	341,20	0,93	259,42	250,65	249,7	248,49	240,55	236,79	228,72
469	385,55	1,34	257,9	248,96	247,88	246,3	239,07	235,39	227,69

Výsledky měření na přístroji WP4C byly zpracovány v Tabulce 7 podle následujících vztahů. Vzorky byly před měřením zváženy  $m_{vz+k}$ . Po měření byly vysušeny v sušárně na 105 °C a znovu zváženy  $m_{s+k}$  a také byly zváženy kalíšky, ve kterých byl vzorek půdy umístěn  $m_k$ . Z těchto hodnot lze vypočítat hmotnostní vlhkost, kterou lze dále přepočítat podle vzorce 1.9 na vlhkost objemovou. Objemová vlhkost je již požadovaná veličina, která je vynášena do retenční křivky.



$$m_{H_2O} = m_{vz+k} - m_{s+k} \quad (1.7)$$

$$m_s = m_{s+k} - m_k \quad (1.8)$$

$$w = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (1.9)$$

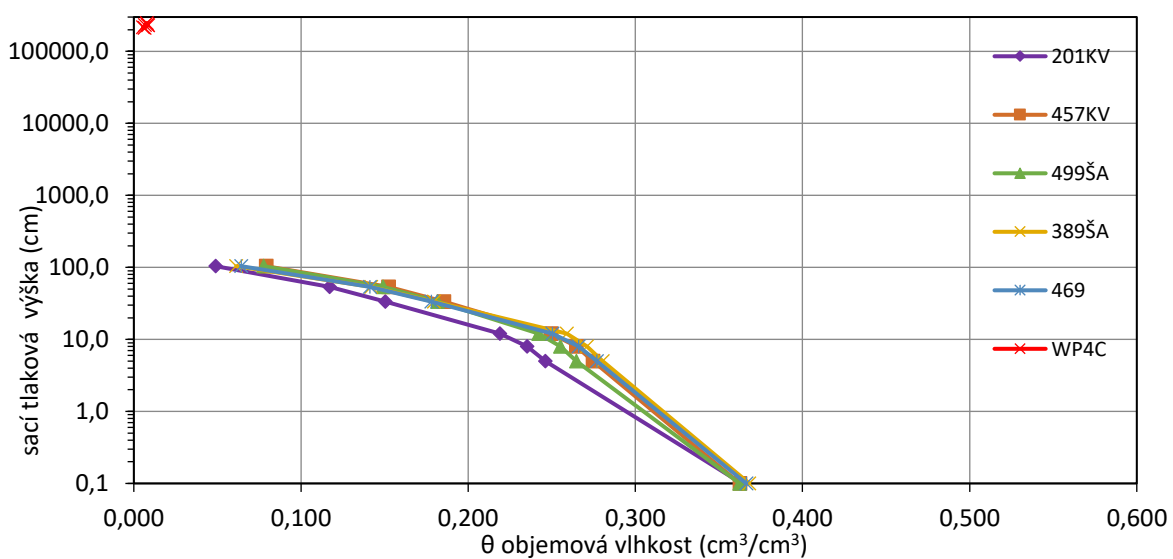
$$\theta = w \cdot \rho_d \quad (1.10)$$

kde  $m_{H_2O}$  je hmotnost vody [g],  $m_{vz+k}$  je hmotnost vzorku s kalíškem [g],  $m_{s+k}$  je hmotnost suchého vzorku s kalíškem [g],  $m_k$  je hmotnost kalíšku [g],  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku [g],  $w$  je hmotnostní vlhkost [-],  $\theta$  je objemová hmotnost [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ],  $\rho_d$  je objemová hmotnost [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ],

Tabulka 7 Hodnoty získané při měření na WP4C a jejich zpracování

Vzorek	$m_{vz+k}$	$m_{s+k}$	$m_{h_2o}$	$m_k$	$m_s$	$w$	$\theta$	P	h
Jednotka	g	g	g	g	g		$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	MPa	cm
7	27,6	27,4402	0,1598	24,4812	2,959	0,005824	0,005578	-21,29	217097,6
11	27,4	27,215	0,185	24,1287	3,0863	0,006798	0,006511	-20,83	212406,9
10	29,5	29,2324	0,2676	24,3215	4,9109	0,009154	0,008768	-22,51	229538,1
3	28,2	27,9572	0,2428	24,3307	3,6265	0,008685	0,008318	-22,96	234126,8
9	29,1	28,8601	0,2399	24,6379	4,2222	0,008313	0,007962	-23,74	247689,1
0	27,5	27,3053	0,1947	24,3001	3,0052	0,00713	0,00683	-22,8	232495,3

Z měření extrémně nízké vlhkosti (Tabulka 7) vzniklo 6 bodů retenční křivky, které jsou vyneseny v grafu na Obrázku 11.



Obrázek 11 Retenční čára půdní vlhkosti substrátu Acre intensive

Proložení retenční křivky bylo provedeno pomocí van Genuchtenova vztahu (1.6). Pro zjištění parametrů funkce  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_r$  a  $\theta_s$  byl použit program RETC. Vstupními údaji pro výpočet parametrů funkce retenční křivky jsou naměřené hodnoty tlakových výšek  $h$ , vypočtené objemové vlhkosti  $\theta$  a hydraulická vodivost  $K$ .

## 6.2. Objemová hmotnost, pórovitost

Objemová hmotnost je hustota půdy v celém objemu vzorku včetně pórů. Udává se v jednotkách hustoty a lze ji vypočítat jako poměr hmotnosti vysušeného vzorku ku celkovému objemu Kopeckého válečku. Objemová hmotnost je potřebná pro výpočet pórovitosti zeminy a lze ji získat ze vztahu:

$$\rho_d = \frac{m_{suš}}{V_{váleček}} \quad (1.11)$$

kde  $\rho_d$  je objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],  $m_{suš}$  je hmotnost sušiny [g],  $V_{váleček}$  je objem válečku [ $\text{m}^3$ ].

Tabulka 8 Výpočet objemové hmotnosti

	$m_s$	$V$	$\rho_d$
	g	cm <sup>3</sup>	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
	92,99	100	0,9299
	93,53	100	0,9353
	93,51	100	0,9351
Průměr	93,34333	100	0,933433

Pórovitost půdy je vlastnost vyjadřující podíl prostor mezi pevnými částicemi. Vyjadřuje se v hmotnostních procentech. Pórovitost půdy významně ovlivňuje zadržování a pohyb vody v půdě. Vypočte se poměrem mezi objemovou hmotností půdy a měrnou hmotností půdy, která udává podíl pevných částic ve vzorku, následujícím vztahem:

$$p = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} 100 \quad (1.12)$$

kde  $p$  je pórovitost půdy [%],  $\rho_s$  je objemová hmotnost půdy [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] výpočet v kapitole 7.2.,  $\rho_d$  je měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] výpočet v kapitole 6.4.

$$p = 1 - \frac{0,9334}{2,17} 100 = 56,97 \%$$

Vypočtená hodnota pórovitosti je 57 %.

### 6.3. Křivka zrnitosti

Čára zrnitosti je součtová čára, která zobrazuje hmotnostní zastoupení zrn dle jejich velikosti vyjádřené podílem z celkové navážky vzorku. Vyjadřuje se graficky v semilogaritmickém měřítku.

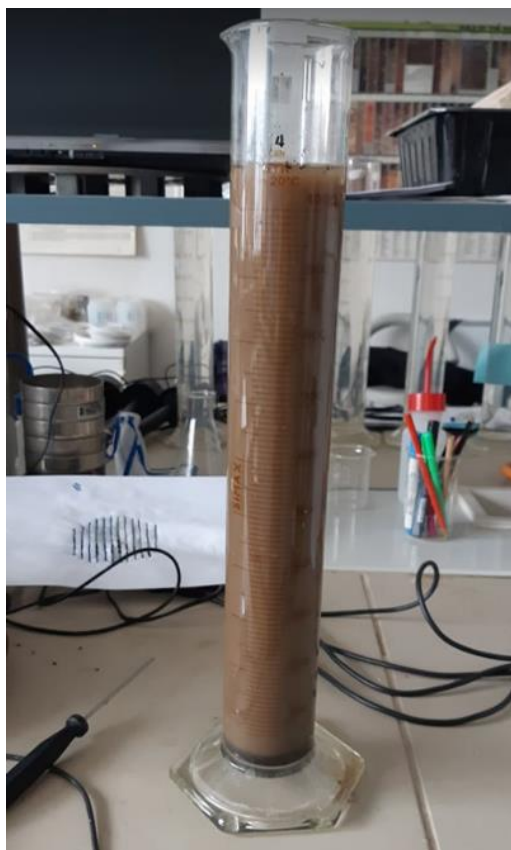
Pro zjištění zrnitosti byly použity kombinace dvou metod. Metoda prosévací a metoda sedimentace jemných částic.

Před samotnými laboratorními zkouškami byl vzorek vysušen při standardní laboratorní teplotě 21°C. Pro stanovení zrnitosti bylo použito 200 g substrátu Acre intensive. Pro další použití bylo nutné tento vzorek přesít přes síto o velikosti oka 2 mm. Skelet substrátu byl oddělen od menších částic.

#### 6.3.1. Čára zrnitosti - Casagrande

Čára zrnitosti jemných částic byla zjištěna metodou podle Casagrande. Tato metoda je založena na principu sedimentace částic v čase, která se řídí Stokesovým zákonem. Pro hustoměrnou zkoušku byla připravena suspenze, která je složena ze 40 gramů částic substrátu menších než 2 mm, 40 ml dispergačního činidla-hexametafosforečnan sodný s příměsí uhličitanu sodného a 100 ml destilované vody. Tato suspenze byla následně vařena po dobu 15 minut. Poté pomocí stříčky s destilovanou vodou byly přelity jemné částice do odměrného válce, přičemž byl kladen důraz na oddělení jemných částic od písčítých. Před samotným měřením byla do odměrného válce dolita destilovaná voda tak, aby byl celkový objem 1000 ml.

Po dokonalém promíchání suspenze, která by měla mít požadovanou teplotu 20 °C, se do odměrného válce vložil hustoměr. V daných časových intervalech byla odečítána hodnota z rýsky hustoměru. Změřené hodnoty jsou poté přepočítány na základě Stokesova zákona.



Obrázek 12 Průběh měření - Casagrandeho zkouška, 26.3.2019

Výpočet zastoupení částic se provede pomocí vztahu:

$$O = \frac{100}{s} \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} (R + c + m) \quad (1.13)$$

kde  $O$  je procentuální zastoupení hmotnostního podílu částic v daném čase měření [% hm.],  $s$  je hmotnost suchého vzorku [g],  $\rho_s$  je měrná hmotnost zeminy [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],  $R$  je čtení na hustoměru,  $C$  je menisková korekce ( $0,5\cdot 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $m$  je teplotní korekce ( $m = 0.0055T^2 - 0.0373T^{-1.44}$ ), kde  $T$  je teplota suspenze [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$s = \frac{j}{w+1} \quad (1.14)$$

kde  $j$  je navážená jemnozeme (sušená při laboratorní teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ ) [g],  $s$  je navážka zeminy k zrnitostní analýze přepočtená na sušinu [g],  $w$  je hmotnostní vlhkost zbývající v jemnozemi při  $20^{\circ}\text{C}$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ].

Vlhkost vzorku byla vypočtena ze vzorku použitého pro měření měrné hmotnosti zeminy v pyknometru podle vztahu:

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \quad (1.15)$$

kde  $w$  je hmotnostní vlhkost zbývající v jemnozemi při 20 °C [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ],  $m_v$  je hmotnost vlhkého vzorku [g],  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku [g].

$$w = \frac{10 - 9,83}{9,83} = 0,017$$

$$s = \frac{40}{0,017 + 1} = 39,33 \text{ [g]}$$

Velikost zrna  $D$  odpovídající hmotnostnímu podílu se vypočte následujícím vzorcem vycházejícím ze Stokesova zákona:

$$D = 10 \sqrt{\frac{18\eta H}{gt(\rho_s - \rho_o)}} \quad (1.16)$$

kde  $D$  je ekvivalentní průměr zrna [mm],  $H$  je dynamická viskozita tekutiny (vody) ( $\eta = 0.017e^{-0.025T}$ ) [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ],  $\rho_s$  je měrná hmotnost zeminy [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] – výpočet uveden v kapitole 6.4.,  $\rho_o$  je měrná hmotnost vody [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] ( $\rho_o = 5 \cdot 10^{-6} T^2 - 5 \cdot 10^{-6} T + 1$ ),  $H$  je odpovídající hloubka hustoměru v suspenzi [cm],  $g$  je gravitační zrychlení [ $981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ] a  $t$  je čas měření [s].

Výsledky měření ukazuje Tabulka 9.

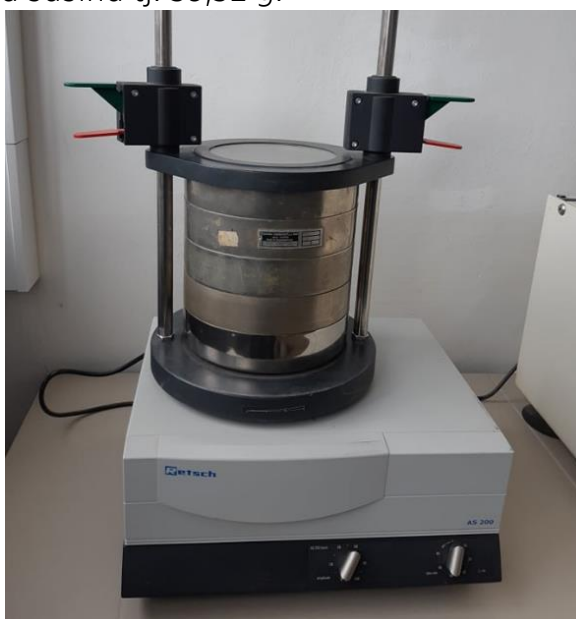
Tabulka 9 Čára zrnitosti Casagrande

čas	čtení hustoměru	teplota	teplotní korekce	dynamická viskozita vody	měrná hmotnost vody	hloubka hustoměru	průměr zrna	poměrný obsah částic	
t	R(t)	T	m	$\eta$	$\rho_o$	H(t)	D(t)	O(t)	
	[s]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[g.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-1</sup> ]	[mg/cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[mm]	[%]	
0,5 min	30	6,6	20,5	0,107	0,0102	0,998	16,9	0,095	34,0
1 min	60	6,2	20,5	0,107	0,0102	0,998	17,1	0,067	32,2
2 min	120	5,2	20,6	0,126	0,0102	0,998	17,5	0,048	27,5
5 min	300	3,9	20,8	0,164	0,0101	0,998	18,0	0,031	21,6
10 min	600	3,2	21	0,202	0,0101	0,998	18,3	0,022	18,4
25 min	1500	2,6	21,2	0,241	0,0100	0,998	18,5	0,014	15,8
50 min	3000	2,0	22	0,401	0,0098	0,997	18,7	0,010	13,7
75 min	4500	1,6	22,6	0,526	0,0097	0,997	18,9	0,008	12,4
2,5 h	9000	1,2	23,2	0,655	0,0095	0,997	19,1	0,006	11,1
24 h	86400	0,1	23,6	0,743	0,0094	0,997	19,5	0,002	6,3
48 h	172800	0,0	23,6	0,743	0,0094	0,997	19,5	0,001	5,9

### 6.3.2. Sítový rozbor

Zrnitostní rozbor skeletu a písčitých částic byl stanoven pomocí sítového rozboru na sadě sít.

Písčité částice, které byly získány jako zbytek ve varné nádobě při promývání jemných částic do hustoměrné suspenze, byly vysušeny v sušárně při 105 °C. Po vysušení vzorku bylo provedeno prosévání na sadě sít s oky 1.25 mm, 0.8 mm, 0.5 mm, 0.25 mm a 0.1 mm. Zbytek na každém sítu byl zvážen a následně přepočítán na hmotnostní % k původní navážce 40 gramů přepočtené na sušinu tj. 39,32 g.



Obrázek 13 Sítový rozbor, 26.3.2019

Poměrné zastoupení jednotlivých zbytků na sítích se stanoví podle vzorce:

$$p_i = \frac{m_i}{s} 100 \quad (1.17)$$

kde  $p_i$  je procento zrn zachycené na i-tém sítu [% hm.],  $m_i$  je hmotnost frakce zachycené na i-tém sítu [% hm.],  $s$  je celková hmotnost vysušeného vzorku [g].

Pro vyjádření čáry zrnitosti je potřeba tato procenta  $p_i$  přepočítat na součtový procentní díl, který se vypočítá vzorcem:

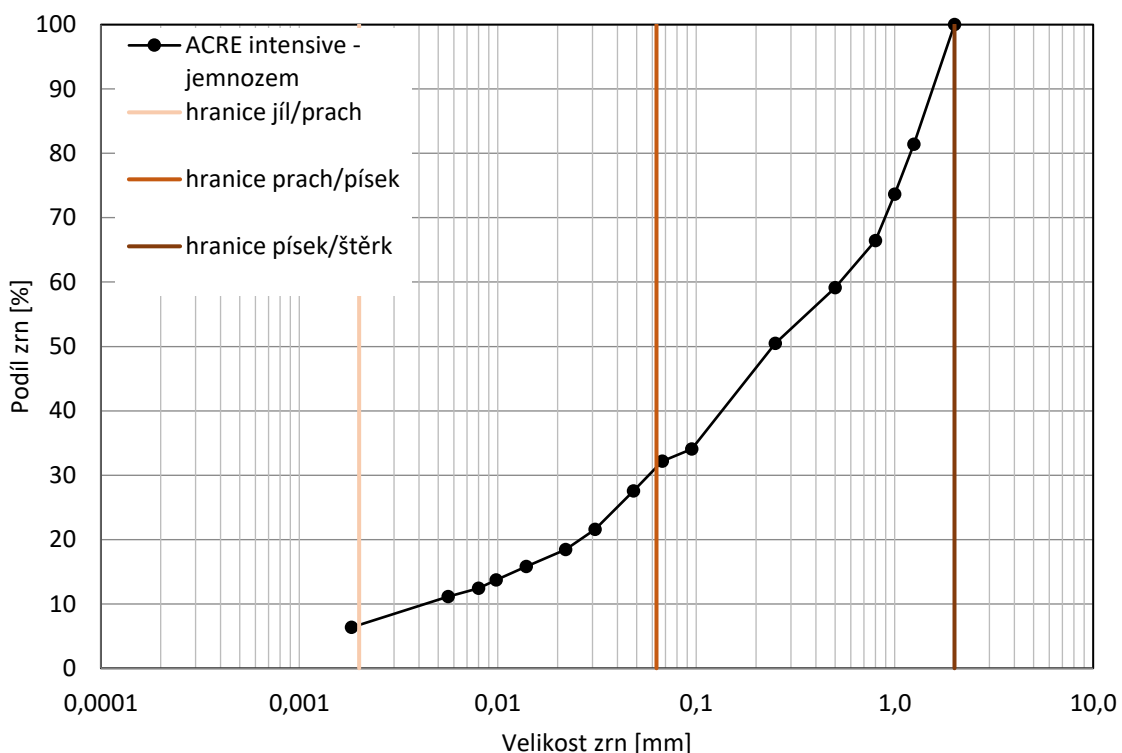
$$P_i = 100 - \sum_1^i p_i \quad (1.18)$$

kde  $P_i$  je celkové procento zrn zachycené na sítích 1 až  $i$  [% hm],  $P_i$  je procento zrn zachycené na  $i$ -tém sítu [% hm].

Tabulka 10 Čára zrnitosti - síťový rozbor písčitých částic

průměr ok	zbytek na síť	poměrné zastoupení	kumulativní zastoupení
[mm]	[g]	[%]	[%]
2,0	0,180	0,46	100,00
1,25	7,310	18,59	81,41
1	3,060	7,78	73,63
0,8	2,830	7,20	66,43
0,5	2,870	7,30	59,13
0,25	3,410	8,67	50,46
0,1	2,340	5,95	44,51

Výsledky měření křivky zrnitosti jsou zobrazeny na obrázku 14. Z grafu je na první pohled patrné, že substrát Acre intensive obsahuje velmi malé (6,56 %) množství jílovitých částic (průměr zrna <0,002 mm). Naopak největší podíl je tvořen písčitými částicemi (průměr částic 0,063 – 2 mm) a to 72,04 %. Tento graf však nezahrnuje štěrkovité a kamenité frakce, které se nepoužívají pro zatřídění půd.



Obrázek 14 Křivka zrnitosti vzorku Acre intensive 0-2 mm

Při tvorbě čáry zrnitosti (Obrázek 14) nebylo vyneseno procentuální zastoupení částic o průměru 0,1 mm, jelikož se jedná o přechod mezi metodou Casagrande a síťovým rozborem. Při vymývání písčitých částic ze vzorku mohly vzniknout nepřesnosti a křivka zrnitosti již neměla hladký průběh. Jelikož se nejedná o hodnotu na přechodu písku/prachu, vynechání této hodnoty nezpůsobí žádné zkreslení výsledků.

Klasifikace půdního druhu dle Nováka se určuje podílem jemných částic menších než 0,01 mm ve vzorku.

Podíl částic menších než 0,01 mm je ve zkoumaném vzorku substrátu 13,7 %, což ukazuje na půdní druh HP - hlinitopísčítý, který se řadí k lehkým druhům půd. Lehké půdy jsou charakteristické dobrou propustností vody a vzduchu. Jelikož u těchto půd není dostatečně vyvinutý sorpční komplex, dochází k vyplavování živin. Lehké půdy jsou snadné pro obdělávání a mikrobiální činnost je vysoká díky dostatečnému provzdušnění. (Urbancová, 2015)



## Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd (NRSC USDA)

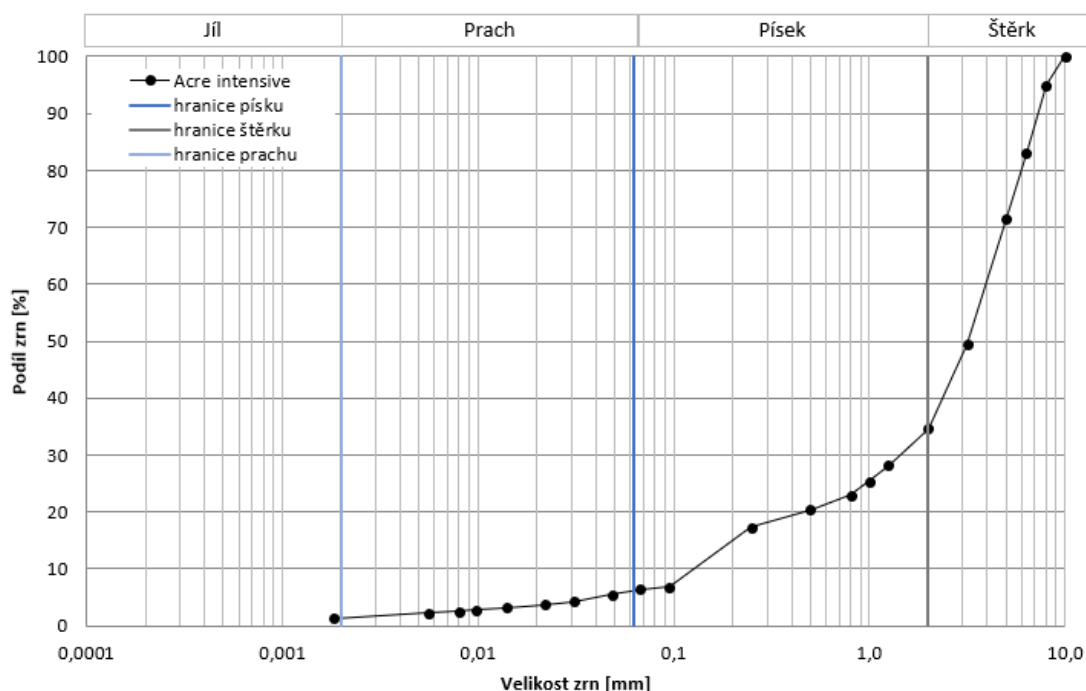


Obrázek 15 Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd

Na Obrázku 15 jsou vynesena procentuální zastoupení prachovitých, jílovitých a písčitých částic vzorku. Jako u obrázku 14 zde není zahrnuto procento skeletu – štěrkovité a kamenité částice.

Podle trojúhelníkového diagramu lze zkoumaný substrát zařadit do půdní třídy písčité hlíny blízko hranice hlinitého písku. Jedná se tedy o hrubozrnnou zeminu.

Na Obrázku 16 je vykreslena křivka zrnitosti substrátu Acre intensive včetně štěrkové frakce. Z grafu je patrné, že zhruba 65 % částic substrátu má průměr větší než 2 mm a tvoří skelet půdy. Téměř 25 % hmotnostního podílu zkoumaného vzorku lze zařadit do frakce hrubého písku a 40 % do štěrkové frakce.



Obrázek 16 Křivka zrnitosti ACRE intensive substrátu

FLL Guidelines for Green Roofs (2018) a technický list substrátu Acre intensive uvádí obsah zrn menších než 0,063 mm pro intenzivní zelené střechy méně než 40 % hmotnosti. Obsah zrn menších než 0,063 mm ve vzorku zahrnujícím všechny frakce substrátu je 6,4 %.

#### 6.4. Měrná hmotnost pevných částic

Měrná hmotnost pevných částic vzorku substrátu pro intenzivní zelené střechy byla zjišťována pomocí pyknometru. Touto metodou se zjistí podíl pevných částic vzorku bez pórů. Jednotkou měrné hmotnosti je  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

K zjištění měrné hmotnosti pevných částic bylo použito 10 gramů vzorku frakce menší, než 2 mm. Tento vzorek byl krátce povařen spolu s dispergačním činidlem (hexametafosforečnan sodný s příměsí uhličitanu sodného). Po vychladnutí je vzorek pomocí nálevky přemístěn do pyknometru. Nádoba pyknometru musí být uzavřena tak, aby v ní nebyl uzavřen vzduch. Osušený pyknometr se následně zváží. Pro výpočet je třeba zvážit hmotnost naplněného pyknometru s destilovanou vodou, což v tomto

případě nebylo potřeba, jelikož jsou tyto hodnoty už předem zjištěny a uvedeny v laboratoři. Měrná hmotnost se stanoví podle vzorce:

$$\delta_s = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{a+m_s-b} \quad (1.19)$$

$$\delta_s = \frac{9,83}{133,14 + 9,83 - 138,43} = \frac{9,83}{4,54} = 2,17 \text{ [g.cm}^{-3}\text{]}$$

kde  $\delta_s$  je měrná hmotnost půdy [ $\text{g.cm}^{-3}$ ],  $V$  je objem zeminy [ $\text{cm}^{-3}$ ],  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku [g],  $a$  je hmotnost pyknometru s destilovanou vodou [g],  $b$  je hmotnost pyknometru se suspenzí zeminy [g].

Výsledky:

Vypočtená měrná hmotnost zeminy je  $2,17 \text{ g.cm}^{-3}$ .

## 6.5. Hydraulická vodivost

Měření hydraulické vodivosti bylo provedeno na přístroji KSAT v laboratoři na fakultě stavební, ČVUT v Praze. Tento přístroj měří hydraulickou vodivost  $K_s$  nasycených půdních vzorků.

Pro měření byly použity tři vzorky substrátu Acre intensive, které byly ručně zhutněny na stejnou objemovou hmotnost  $1100 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Výška nerezového válečku používaného pro měření v přístroji KSAT je 5 centimetrů. Vzorek byl zhutněn tak, aby na obou podstavách válce byla rovná plocha. Poté byly vzorky syceny v destilované vodě. Pro toto měření probíhalo sycení přibližně hodinu, což mohlo simulovat krátkodobější srážku o velké intenzitě. Je to tedy stupeň nasycení, se kterým je možné se v běžných podmínkách setkat.

Nasycená hydraulická vodivost  $K_s$  s proměnným spádem na třech vzorcích a každý vzorek byl měřen třikrát.

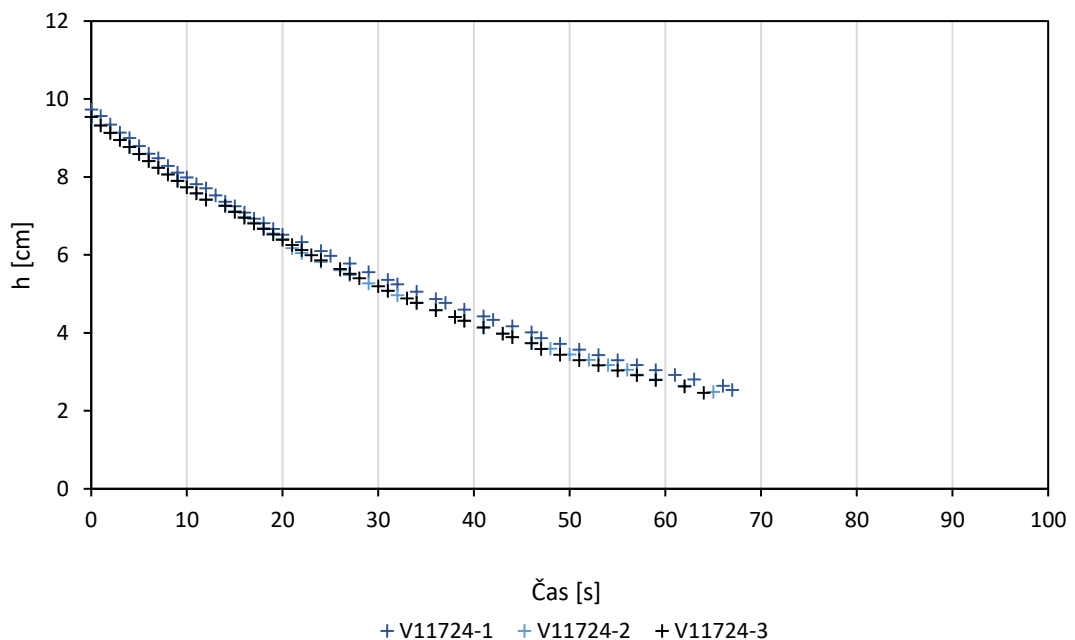
Software KSAT VIEW, který je příslušenstvím přístroje KSAT, vyhodnocuje měření na základě Darcyho zákona, který popisuje proudění vody v nasyceném prostředí. Výsledné hodnoty  $K_s$  byly automaticky vypočteny pro aktuální teplotu a přepočteny i pro normovou teplotu  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , při které

je chování kapalin rozdílné. Součástí výstupu softwaru je také graf závislosti tlakové výšky v čase, který je zobrazen klesající exponenciální křivkou charakteristikou pro Darcyho zákon.

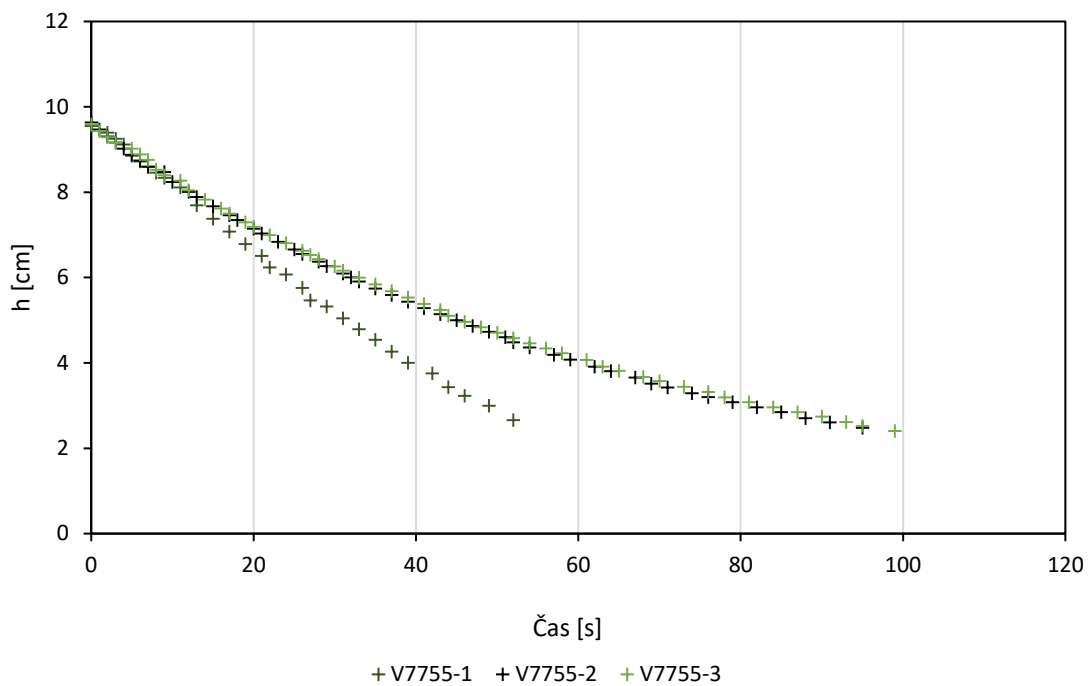


Obrázek 17 Průběh měření přístrojem KSAT, 5.4.2019

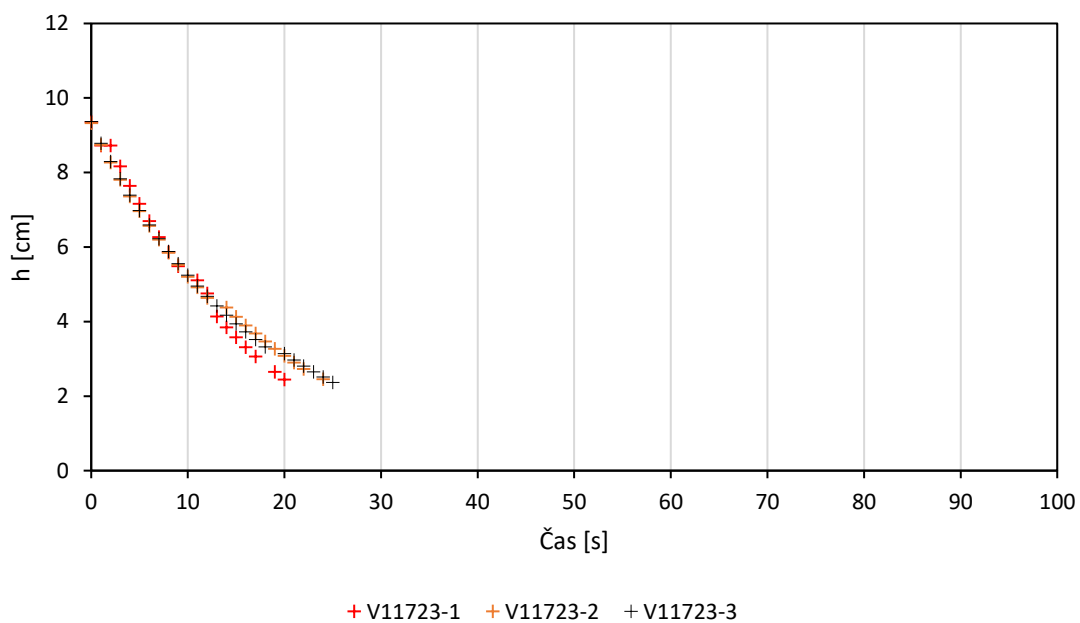
Obrázky 18-20 zobrazují průběhy měření nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$ . Každý vzorek byl změřen třikrát a výsledek byl následně zprůměrován. Srovnání průměrných hodnot je na Obrázku 21.



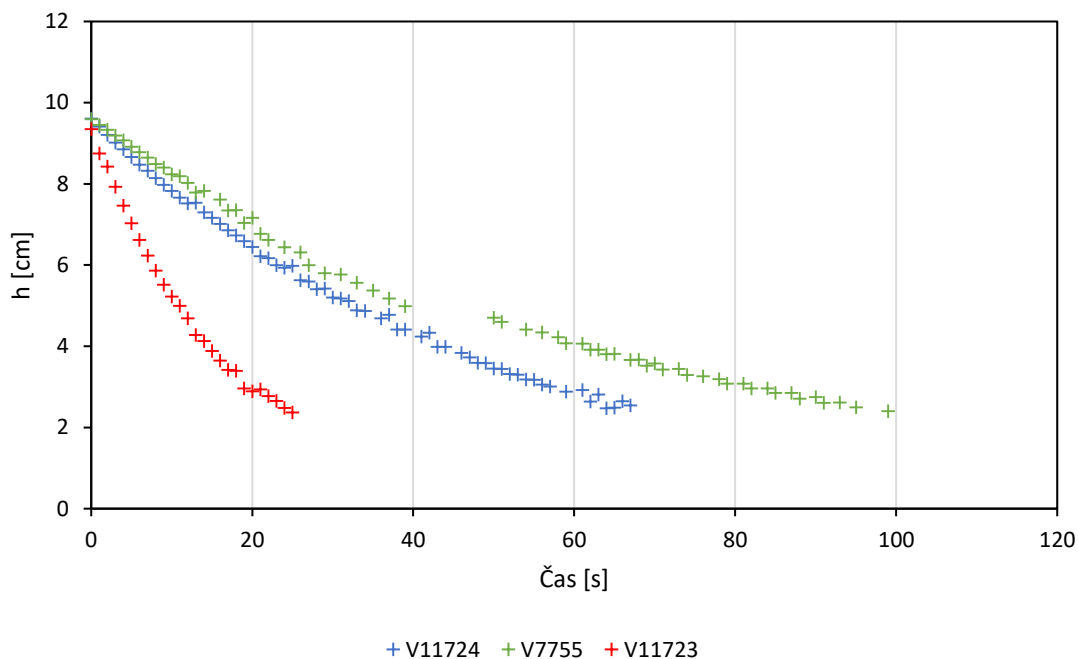
Obrázek 18 Graf závislosti tlakové výšky v čase V11724,  $T = 25,42^{\circ}\text{C}$



Obrázek 19 Graf závislosti tlakové výšky v čase V7755,  $T=2465^{\circ}\text{C}$



Obrázek 20 Graf závislosti tlakové výšky v čase V11723,  $T=24,73^{\circ}\text{C}$



Obrázek 21 Porovnání průměrných hodnot vzorků

Na Obrázku 22 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měření jednotlivých vzorků. Trend křivky je u všech vzorků stejný. Je zde patrný velký rozdíl mezi vzorky V11724, V7755 a vzorkem V11723. Vzorek V11723 má průměrnou hodnotu koeficientu nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$  přibližně třikrát větší, což se odrazilo i v době trvání měření, která byla méně než 30 sekund.

Tabulka 11 zobrazuje výsledné hodnoty měření nasycené hydraulické vodivosti  $K_s$  na všech vzorcích.

Tabulka 11 Nasycená hydraulická vodivost  $K_s$  změřena přístrojem KSAT

Název vzorku	Veličina	Měření 1		Měření 2		Měření 3		Průměr	
	Jednotka	cm/den	m/s	cm/den	m/s	cm/den	m/s	cm/den	m/s
V11724	Ksat (25°C)	678	7,88E-05	728	8,47E-05	744	8,66E-05	717	8,34E-05
	Ksat (10°C)	460	5,34E-05	494	5,75E-05	506	5,88E-05	487	5,66E-05
V11723	Ksat (25°C)	2200	2,56E-04	2190	5,55E-04	2240	2,60E-04	2210	3,57E-04
	Ksat (10°C)	1510	1,76E-04	1500	1,74E-04	1540	1,79E-04	1517	1,76E-04
V7755	Ksat (25°C)	575	6,68E-05	590	6,86E-05	587	6,83E-05	584	6,79E-05
	Ksat (10°C)	396	4,60E-05	407	4,73E-05	405	4,71E-05	403	4,68E-05
Průměr	Ksat (25°C)	1151	1,34E-04	1169	2,36E-04	1190	1,38E-04	1170	1,69E-04
	Ksat (10°C)	789	9,18E-05	800	9,29E-05	817	9,50E-05	802	9,32E-05

Z Tabulky 11 je patrné, že vzorek V11724 a V7755 mají podobné výsledné hodnoty  $K_s$ . Vzorek V11723 má až trojnásobné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti. Jelikož se ale hodnota neliší řádově, je možné

ji považovat za správnou hodnotu, bez významné chyby měření. Rozdílná hodnota může být způsobena například větším podílem skeletu ve vzorku nebo rozdílným hutněním. Při měření byly použity dva přístroje KSAT, proto bylo provedeno také kontrolní měření na přístroji, na kterém probíhalo měření vzorků V22724 a V7755. Výsledek na druhém přístroji ukazoval podobné hodnoty jako původní měření, takže rozdílné hodnoty  $K_s$  nebyly způsobeny chybou přístroje nebo špatnou kalibrací přístroje.

V Tabulce 11 jsou uvedeny také normové hodnoty  $K_s$  při 10 °C, které jsou významně nižší. Tyto rozdíly jsou způsobeny změnou vlastností vody při změně teplot. Hustota vody s klesající teplotou roste. Voda má maximální hustotu při 3,98°C. Stejně tak se s klesající teplotou zvyšuje viskozita. Čím vyšší viskozita kapaliny, tím větší vnitřní tření a pomalejší pohyb kapaliny.

Výsledné průměrné hodnoty  $K_{s(25^\circ\text{C})} = 1,69 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $K_{s(10^\circ\text{C})} = 9,32 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ukazují podle DIN 18130 na půdu propustnou  $10^{-4}$ - $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podle tabulky pro vodivosti pro nekonsolidované vodonosné vrstvy lze testovaný substrát zařadit do skupiny jemnozrnných písků  $10^{-4}$ - $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tabulka, podle kterého byl substrát kategorizován, je uvedena v návodu pro měření na přístroji KSAT. (Operation Manual KSAT, str.5)

## 6.6. Stanovení maximální vodní kapacity

Maximální vodní kapacita je hodnota půdní vlhkosti, při které jsou všechny póry plně nasyceny. V tomto stavu již neprobíhá další filtrace vody. Jednotkou maximální vodní kapacity je % objemu vzorku. (FLL, 2018)

Maximální vodní kapacita byla stanovena podle Přílohy č.1 uvedené ve Standardech pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech (Burian a kol., 2016).

Měření proběhlo v pedologické laboratoři na UCEEB. Do tří válcových kontejnerů o průměru 15cm a výšce 16 cm byl nasypán substrát Acre intensive do výšky  $h=12\text{cm}$ . Na děrované dno kontejneru bylo umístěno drátěné síto. Poté byl vzorek zhutněn šesti údery Proctorova kladiva z výšky 45 centimetrů. Hmotnost závaží Proctorova kladiva je 4,5 kg. Pro výpočet

objemu bylo potřeba změřit přesnou výšku vzorku po zhutnění. Příprava vzorku byla provedena autorem práce.



Obrázek 22 Vzorky při hutnění Proctorovým kladivem, 18.04.2019

Na připravený vzorek se položila netkaná textilie, drátěné síto a zatížila se. Tyto vzorky se nechaly sytit dokud hladina vody nepřesáhla 10 mm nad horní okraj vzorku. Vzorky zůstaly ponořené 24 hodin a poté byly umístěny na propustný povrch a nechala se odtéct gravitační voda. Poté byla ze vzorku odstraněna textilie, víko a zátěž a vzorek se zvážil ( $m_{MVK}$ ).

Pro získání  $m_s$  byly vzorky vysušeny při 105 °C.

Výpočet byl proveden podle následujících vztahů.

$$V = \frac{\pi r^2 \cdot h}{1000} \quad (1.20)$$

$$OH_s = \frac{m_s}{V} \quad (1.21)$$

$$OH_{MVK} = \frac{m_{MVK}}{V} \quad (1.22)$$

$$MVK = \frac{(m_{MVK} - m_s)}{V} \cdot 100 \quad (1.23)$$

kde  $V$  je objem vzorku [ $\text{cm}^3$ ],  $r$  je poloměr kontejneru [ $\text{cm}$ ],  $h$  je výška vzorku [ $\text{cm}$ ],  $OH_s$  je objemová hmotnost suchého vzorku [ $\text{g.l}^{-3}$ ],  $OH_{MVK}$  je



objemová hmotnost při nasycení vzorku na maximální vodní kapacitu [ $\text{g.l}^{-3}$ ],  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku [g],  $m_{MVK}$  je hmotnost vzorku nasyceného na MVK [g],  $MVK$  je maximální vodní kapacita [%obj.].

Tabulka 12 Výpočet maximální vodní kapacity

Vzorek	$m_{MVK}$	$m_{s+v}$	V	Vanička	$m_v$	$m_s$	MVK	Objemová hmotnost [ $\text{g.l}^{-1}$ ] = [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]		množství zadržené vody [g/l] = [ $\text{kg/m}^3$ ]
								suchá	při MVK	
	[g]	[g]	[ $\text{cm}^3$ ]		[g]	[g]	[% obj.]			
12	2493,6	1908,4	1802,489	12	198,9	1709,5	43,501	948,411	1383,421	435,010
9	2483,9	1736,5	1762,728	10	206,7	1529,8	54,126	867,859	1409,123	541,263
13	2243,2	1903,8	1656,699	14	201,6	1702,2	32,655	1027,465	1354,018	326,553
						Průměr	43,3	947,9	1382,2	434,3

Z výsledků uvedených v Tabulce 12 je patrné, že se hodnoty maximální vodní kapacity MVK substrátu Acre intensive pohybují mezi 32-54 % objemu vzorku. Zkoumaný substrát má vysokou schopnost zadržet vodu.

Technický list substrátu Acre intensive uvádí hodnotu MVK 45 – 55 %. Do uvedeného intervalu spadá pouze jeden vzorek ze tří. FLL Guideline for Green Roofs (FLL, 2018) uvádí doporučenou hodnotu MVK vyšší než 45 % objemu vzorku. Průměrnou hodnotu snižuje především vzorek 13.

Hodnoty objemové hmotnosti suchého vzorku byly změřeny 867,9  $\text{g.l}^{-1}$  až 1027,5  $\text{g.l}^{-1}$ . Technický list výrobku uvádí objemovou hmotnost suchého substrátu v rozmezí 800 – 1000  $\text{g.l}^{-1}$ , což znamená, že průměrná hodnota objemové hmotnosti suchého vzorku 947,9  $\text{g.l}^{-1}$  splňuje uváděné parametry.

Objemová hmotnost vzorku při maximální vodní kapacitě byla změřena od 1354,0  $\text{g.l}^{-1}$  do 1409,1  $\text{g.l}^{-1}$ . V technickém listu substrátu Acre intensive jsou uvedeny hodnoty 1400 – 1600  $\text{g.l}^{-1}$ . Změřené hodnoty jsou trochu nižší než hodnoty uvedené výrobcem a průměrná hodnota 1382,2  $\text{g.l}^{-1}$  nespadá do uvedeného intervalu.

Součástí měření MVK je výpočet pórovitosti a obsahu vzduchu při nasycení vzorku na maximální vodní kapacitu. Výpočet je uveden v Tabulce 13 a stanoví se podle vzorců:

$$P = \frac{\left(v - \frac{m_s}{\rho}\right)}{v} \cdot 100 \quad (1.24)$$

$$A = P - MVK \quad (1.25)$$

kde  $P$  je pórovitost [%obj.],  $A$  je obsah vzduchu při nasycení vzorku na MVK [%obj.],  $\rho$  je hustota pevných částic [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] z kap.6.4..

Tabulka 13 Výpočet pórovitosti a obsahu vzduchu při MVK

Vzorek	V	$m_s$	MVK	P	A
	[ $\text{cm}^3$ ]	[g]	[% obj.]	[%obj]	[%obj]
12	1802,489	1709,5	43,501	56,294	12,793
9	1762,728	1529,8	54,126	60,006	5,880
13	1656,699	1702,2	32,655	52,651	19,996
		Průměr	43,4	56,3	12,9

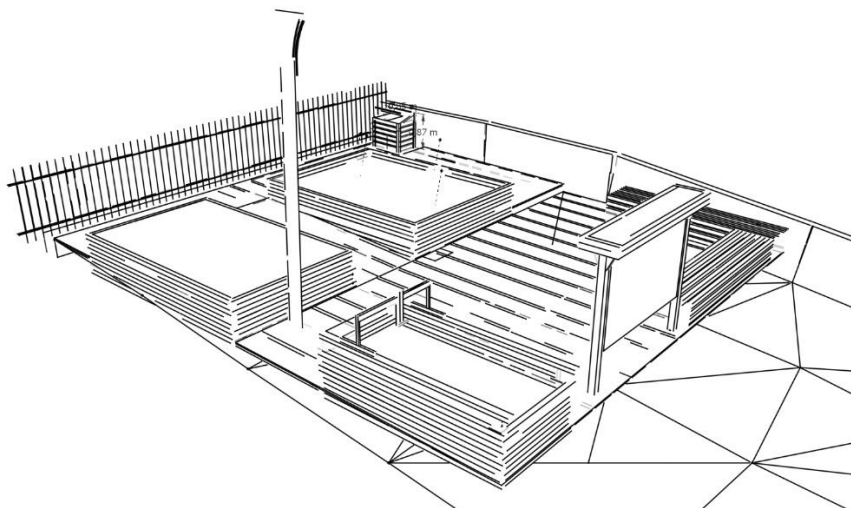
Podle FLL (2018) je doporučená hodnota obsahu vzduchu  $A$  při MVK větší, než 10 %. Hodnota  $A$  vzorku 9 byla stanovena 5,9 % objemu. Vzorky 12 a 13 splňují doporučení FLL. Technický list Acre intenzivního substrátu udává rozsah 10 – 20 %obj. Průměrná hodnota 12,9 %obj. splňuje hodnoty uváděné výrobcem.

Pórovitost by se podle technického listu Acre měla pohybovat v intervalu 55 – 75 %. Vzorek 13 se nachází mimo udávaný interval, avšak nijak významně a průměrná hodnota 56,3 % splňuje uváděné požadavky.

## 7. Návrh experimentální a výukové zahrady

V této části je hlavním úkolem návrh experimentálních ploch se souvrstvím intenzivních zelených střechy na pozemku Fakulty stavební, ČVUT v Praze formou studie. Cílem je vytvořit venkovní výukovou plochu, která bude studenty využívána především pro potřeby praktické výuky pedologie, závlah a modrozelené infrastruktury. Experimentální plochy umožní sledování vývoje vlhkosti a teploty substrátu, měření odtoku a sběr vzorků odtékající vody.

Celý návrh venkovní laboratoře byl vytvořen v duchu dřevěné terasy se třemi vyvýšenými záhony, které simulují souvrství intenzivní zelené střechy. Původní návrh, který zpracovala Ing. Arch. Koubková, byl v průběhu projektu půdorysně a materiálově upraven. K této studii patří také výkresová dokumentace, ve které jsou zpracované řezy původním a upraveným terénem, konstrukční části dřevěné terasy a skladba souvrství vyvýšených záhonů.



Obrázek 23 Náčrt vizualizace venkovní laboratoře

Každý ze záhonů má jiný rozměr a vegetační pokryv. Na vyvýšených záhonech bude měřen odtok pomocí překlápěcího člunkového průtokoměru PF500, jehož vhodnost byla posouzena v kapitole 7.5. Dále byl navržen vzorkovač vody Isco 3700 Full-Size, který bude odebírat vzorky vody ve zvolených časových intervalech.

Na nejmenším záhonu bude použit pěstební robot FarmBot pro pěstování jednoleté zeleniny. Dva velké záhony budou osázeny trávou a keři. Mezi záhony je navržena rampa kvůli bezbariérovému přístupu.

### 7.1. Popis zájmového území

Původním záměrem bylo tyto pokusné plochy vystavět na střeše fakulty stavební, ČVUT v Praze. Po terénním šetření a následném stanovení únosnosti byla zjištěna únosnost 150 kg/m<sup>2</sup>. Z důvodu malé únosnosti bylo třeba vyhledat alternativní prostory.

Pro umístění experimentálních ploch byl zvolen prostor za budovou D fakulty stavební (Obrázek 23). Jedná se o zatravněnou plochu o šířce 9 metrů při zadním vjezdu do areálu Fsv, ČVUT v Praze.



Obrázek 24 Vymezení zájmového území

Zatravněné území je svažité v průměrném sklonu 3,5°. Přibližně 3 metry od hrany chodníku je veden teplovod provozovaný firmou Veolia Energie Praha a.s. Po zaslání žádosti o přesné umístění vedení teplovodu bylo firmou Veolia zasláno pouze situační schéma. Přesná poloha teplovodu

byla přebrána z dokumentace pro výstavbu nového parkoviště za budovou D.

Pro projekt byla zvolena horní část území 9x10 metrů. Zájmové území je lemováno betonovou zídou rozdělující pozemek Fsv ČVUT od pozemku Studentského domu. Horní část pozemku je ohraničena kovovým plotem, který odděluje veřejný prostor od soukromého pozemku ČVUT.



*Obrázek 25 Fotografie z průběhu zaměřování pozemku, Autor: Ing. Pavla Schwarzová, Ph.D.  
10.10.2018*

Celá část pozemku byla změřena autorem práce pomocí GNSS metody polohového pole bodů. Protokol z měření je přiložen k této práci.

## **7.2. Závlahový systém**

Řešení závlahového systému není součástí této práce, pouze návrh přivádění vody k závlahovému systému.

Na jednom ze záhonů bude použit kapkový závlahový systém povrchový a na druhém podzemní kapkovací potrubí.

### 7.3. Návrh konstrukce terasy

Pro navození atmosféry střešní terasy se zahradou byly také experimentální plochy – kontejnery umístěny na klasickou konstrukci dřevěné terasy. Jako hlavní stavební materiál byl použit sibiřský modřín jako kompromis v poměru ceny a použití. Z důvodů menší trvanlivosti (asi 10 let) a častější potřeby údržby nebyl použit smrk ani borovice, ačkoliv mají tyto dřeviny nižší pořizovací náklady a jsou domácí.

Dřevo ze sibiřského modřínu je dostupné v mnoha českých obchodech za různé ceny. Vyšší odolnost proti klimatickým vlivům je zajištěna vyšším obsahem pryskyřice. Není tedy nezbytná povrchová úprava, ale vždy je doporučena. Neošetřené dřevo modřínu časem šedne působením slunečního záření. Životnost modřínové terasy je 15–25 let. (Dřevěné terasy a jejich životnost, 2015)

#### 7.3.1. Svažité terén

Kvůli velkým výškovým rozdílům a kvůli vedení teplovodů není možné provádění větších zemních úprav původního terénu. Snahou tedy bylo, aby terasa co nejlépe kopírovala terén, avšak splňovala základní podmínky použití – minimální a maximální sklon pochozí vrstvy.

Výškový rozdíl původního terénu lze vidět na výkresech 03 a 04. V místě, kde bude terasa umístěna, je výškový rozdíl v průměru 68 centimetrů. Při použití maximálního předepsaného sklonu terasy 2 %, se při délce terasy 10 metrů překoná výškový rozdíl 20 centimetrů. Návrhem rampy je možné výškový rozdíl zmenšit. Předepsaný sklon rampy je 1:16 a minimální šířka rampy pro bezbariérové použití je 1500 mm. Rampa byla umístěna mezi dva velké záhony o délce 4 metry. Rampa při sklonu 1:16 a délce 4 metry překoná výškový rozdíl 0,25 metrů. Ve finálním návrhu byl tedy výškový rozdíl zmírněn použitím rampy (schodu) a ve zbytku terasy maximálním dovoleným sklonem terasy 2 %.

### 7.3.2. Pochozí vrstva

Pochozí vrstva je tvořena terasovými prkny ze sibiřského modřínu, z něž je tvořen i podkladní rošt. (Výkres 14) Oboustranně rýhované terasové prkno má rozměr 27x143x3000 mm. Celková plocha potřebná pro zakrytí terasovými prkny je 63,5 m<sup>2</sup>. Jednoduchým odhadem (Tabulka 14) byla stanovena potřeba terasových prken

Tabulka 14 Odhad počtu potřebných terasových prken

	Rozměr [m]	Plocha [m <sup>2</sup> ]
Terasové prkno	0,143x3	0,429
Plocha terasy	9x10-3x4-2,5x4-1,5x3	63,5

$$P = \frac{63,5}{0,429} = 148,019 = 149 ks$$

Při montáži terasových prken na nosný rošt je potřeba dodržovat minimální dilatační spáry. Modřínové dřevo nepatří ani mezi tvrdé ani příliš měkké, tudíž zde probíhají objemové změny způsobené vlhkostí a teplem. Při montáži terasových prken bez dilatace jsou téměř jisté poruchy konstrukce jako kroucení prken a jiné deformace. Doporučená dilatační spára se podle zdrojů liší ale vesměs se pohybuje v rozmezí 4-10 milimetrů. Pro účely tohoto projektu je navržena dilatační spára mezi prkny 7 mm. Dilatační spára musí být dodržena jak příčným, tak v podélném směru.

K upevnění terasových prken jsou navrženy speciální vruty do dřeva pro stavbu teras. Ačkoliv je jejich pořizovací cena dražší, jejich životnost je vyšší. Klasické vruty do dřeva se často lámou a není žádoucí mít v terasových prknech otvory navíc. Obyčejné vruty do dřeva mohou terasová prkna štěpit. Terasové vruty jsou z nerezového materiálu.

### 7.3.3. Konstrukce roštu

Nosný rošt byl navržen z podkladních hranolů pro terasy v rozměru 40x70mm. Doporučená rozteč hranolů je 35-50 centimetrů. V návrhu byla zvolena rozteč 50 centimetrů. V místě uložení šachty pro závlahu byla rozteč zvětšena o 7 centimetrů, kvůli většímu manipulačnímu prostoru. (Výkres 13)



Jako materiál bylo v návrhu zvoleno dřevo ze sibiřského modřínu, které má vhodnou únosnost i trvanlivost. Hranoly jsou dostupné v délce 2, 3 a 4 metry. Pro rozměry návrhu byly použity pouze hranoly o délce 4 metry, které se následně rozřezaly na různé délky, které byly následně využity. Výpis použitých délek hranolů a jejich množství je uveden v Tabulce 15.

Rozměr [mm]	Délka [mm]	Počet [ks]
40x70	1200	18
40x70	4000	8
40x70	2800	15
40x70	2000	15
40x70	1750	3
Σ		130850 mm

Tabulka 15 Množství použitých hranolů

Základní délka hranolu - 4000 mm

Potřeba kusů hranolů je stanoví jako podíl celkové délky a délky jednoho hranolu vzorcem:

$$P = \frac{d_c}{d_h} \quad (1.26)$$

kde  $P$  je potřebný počet kusů hranolů,  $d_c$  je celková potřebná délka [mm],  $d_h$  je délka hranolu [mm].

$$P = \frac{130850}{4000} = 32,7 = 33ks$$

Hranoly budou mezi sebou po delší straně spojeny, aby nedocházelo k pohybu hranolů ve svahu a tím nedošlo k vytvoření větších mezer mezi terasovými prkny či k jejich popraskání. Pro spojení hranolů jsou navrženy ocelové pozinkované spojovací destičky tloušťky 2 mm a o rozměru 35x100 mm. Ve spojovacích destičkách jsou připraveny otvory o průměru 5 mm pro vruty do dřeva o maximální délce 35 mm, aby nedošlo ke kolizi mezi vruty na protější straně. Při použití delších vrutů je doporučeno upevňovat hranol pouze skrze některé otvory a z druhé strany použít otvory zbývající.



#### 7.3.4. Kotvení terasy

Kvůli udržování nízké vlhkosti a provzdušnění není vhodné dřevěný rošt pokládat přímo do šterkové vrstvy, která má sice za úkol dobře odvádět vodu, ale v případě větších dlouhodobějších srážek se mohou pod konstrukcí roštu tvořit kaluže vody. Voda, která nemá dostatečný prostor k odvětrávání, by mohla v přímém kontaktu se dřevem způsobit tvorbu plísní, čímž by se výrazně snížila životnost terasy.

Existuje mnoho způsobů, jak podkladní rošt uložit a ukotvit. Nejvíce výhod má uložení na rektifikační terče, které jsou vyráběny speciálně pro použití terasových konstrukcí. Lze je použít ve svažitém terénu, kde je třeba upravovat výškovou polohu podkladního hranolu. Další výhodou je jejich malá hmotnost, proto jsou vhodné zejména pro konstrukci terasy na střeše budovy. Jejich nevýhodou je však vyšší pořizovací cena. Jelikož navrhovaná terasa není součástí budovy a je volně uložena na zemi, bylo zvoleno levnější řešení, a to použití betonových chodníkových dlaždic. (Výkres 13) Tyto dlaždice mají za úkol umožnit dostatečné provětrání terasové konstrukce, pevné uložení podkladního roštu a v neposledním případě také úpravu výškového uložení a sklonu terasové konstrukce.

Velmi často vynechávaným prvkem při stavbě terasy jsou izolační podložky, které zabraňují přímému kontaktu dřevěných hranolů s betonovými dlaždicemi. Betonové dlaždice mohou přenášet vlhkost do dřevěného roštu a opět tak způsobit vznik plísní. Hydroizolace dřevěného roštu může být tvořena kusy hydroizolační folie nebo obdélníky z recyklované pryže, které jsou dostupné v několika velikostech a tloušťkách.

#### 7.3.5. Podkladová vrstva

Před samotnou výstavbou je třeba sejmout ornici o tloušťce přibližně 10 centimetrů na celé ploše budoucí laboratoře - tj. 9x10 m včetně ploch pod záhony. Dále je v některých místech nutno odebrat zeminu, aby zemina byla přibližně v úrovni 30 centimetrů pod úrovní povrchu plánované terasy.

Dno výkopu bude vyloženo geotextilií, aby bylo zabráněno prorůstání plevelu do vrstvy šterku, která má za úkol zajistit odvod vody z terasy.

Správné odvodnění zabrání plesnivění a hnití podkladních hranolů a terasových prken. Na geotextilii bude uložena vrstva štěrku frakce 16/32 a 4/8. Tuto vrstvu je třeba dobře zhutnit, aby tvořila také pevný podklad pro kotvení terasy.

#### 7.4. Experimentální plochy

Pro experimentální výzkum intenzivní zelené střechy byly navrženy tři vyvýšené záhony. Jeden kontejner o velikosti 4x2,5 m, další 4x3 m a nejmenší kontejner byl navržen podle maximálního rozměru použití robota FarmBot Genesis v1.4 a to 3x1,5 metru.

Samotná konstrukce kontejneru se skládá z hranolů modřínu o rozměru 80x80 mm. Celková výška vyvýšených záhonů je 72 centimetrů je patrná z výkresů 05, 06 a 07. Jednotlivé hranoly vruty do dřeva s částečným závitem a zápustnou hlavou o průměru závitu 8 mm a délce vrutu 140 mm. (Výkres 07) Dřevěná konstrukce z hranolů musí být kvůli náchylnosti na vlhkost posazena na betonové cihly a izolační pryžovou podložku. V místech, kde je kontejner uložen ve stejné výšce jako betonové dlaždice, využijí se místo cihel tyto dlaždice.

Velmi důležitou částí zelených střech je hydroizolace, aby bylo zabráněno protékání vody do konstrukce budovy a usměrnění odtoku vody do požadovaných míst. V případě navrhovaných experimentálních ploch je nutná hydroizolace hlavně z důvodu zachycení a svodu vody k průtokoměru, aby bylo možné monitorovat vodní bilanci. Pro kontejnery byla vybrána hydroizolace EPDM Firestone PondGard, který bývá běžně využívaná na konstrukcích zelených střech či výstavbě zahradních jezírek. Celý vnitřek kontejneru je vyložen hydroizolací, která je v rozích lepena a na vrchu zachycena pod posledním trámkem pomocí lepidla, a to hlavně z estetických důvodů. Pod vrstvu hydroizolace byla navržena ochranná geotextilie 500g, která má za úkol chránit hydroizolaci před mechanickým poškozením. Mezi upraveným terénem a geotextilií je 50 mm vrstva štěrkopísku, která jednak napomáhá proti mechanickému poškození, ale také umožňuje snazší finální úpravu sklonu dna záhonu.

Odvod vody je řešen vyspádováním dna v podélném i příčném směru 2 % směrem ke střešní vpusť. Další vrstvou je nopová folie s výškou 40 mm, která pomáhá k odvodnění substrátu. Je uložena na hydroizolační vrstvě. Na nopovou folii bude položena separační folie, která zabrání zanesení nopové folie substrátem a tím zajistí její správnou funkci. Více o odvodnění kontejnerů v kapitole 7.6.

Výška substrátu je 60 centimetrů. V návrhu byl zvolen substrát firmy Acre – substrát pro intenzivní střechy, který byl zkoumán v laboratorní části této práce. Tento substrát byl zvolen na základě doporučení a dobrých zkušeností se substrátem Acre pro extenzivní střechy, který je umístěn na některých pokusných plochách na střeše budovy UBEEB. Na povrchu je substrát navržen s nulovým sklonem kvůli případné erozi.

Návrh vegetace pro jednotlivé záhony není součástí této studie. Podle prvotních návrhů bude jeden ze záhonů osázen trávou, jeden trávou a keři a záhon s Farmbotem bude určen pro pěstování jednoleté zeleniny.

## 7.5. Odvodnění

Odvodnění terasové konstrukce je zajištěno sklonem povrchu 2 % a v případě rampy 1:16. Tyto sklony jsou zároveň maximální povolené sklony pro konstrukci pochozí vrstvy terasy a pro návrh rampy za účelem bezbariérovosti.

Dna záhonů jsou navržena ve sklonu 2 % ve dvou směrech a voda je svedena do prostupů. Tyto prostupy jsou dále napojeny na potrubí, které odvádí vodu do plastových jímek, kde jsou uloženy průtokoměry a vzorkovač. Návrh dimenze odvodňovacího potrubí je řešen v kapitole 8.5.2.

Pro napojení odvodňovací plochy s odváděcím potrubím byl navržen střešní vtok HL střešní vtok DN110 s PVC pevnou izolační přírubou (Obrázek 26). Díky přírubě je jednodušší napojení hydroizolační folie a potrubí. Na navrhovaném výrobku je integrován záchytný koš, který zabrání průniku větších částic do potrubí.



Obrázek 26 Střešní vtok s pevnou PVC přírubou, Zdroj: Koupelny-cz.cz, 17.5.201

### 7.5.1. Ověření vhodnosti návrhu nopové folie Platon DE 40

Pro ověření dostatečné velikosti navržené nopové folie Platon DE 40 byl použit výpočet uvedený ve Standardech pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech – kapitola 6.2 -Dimenzování drenážní vrstvy vegetačního souvrství.

$$q' = \frac{A \cdot C \cdot q}{b} \quad (1.27)$$

kde  $q'$  je celkový odtok dešťové vody ze střechy [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ],  $A$  je odvodňovaná plocha [ $\text{m}^2$ ],  $C$  je součinitel odtoku [-],  $b$  je výpočtová odtoková šířka [ $\text{m}$ ],  $q$  je návrhový 15minutový déšť [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Pro ověření návrhu byl proveden pouze výpočet pro záhon 2, který má největší rozměry.

Záhon 2 (4x3 m):

$$q' = \frac{4 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 0,0217}{0,3} = 0,2604 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

kde  $C$  je součinitel odtoku [-] Pro vegetační vrstvu o tloušťce nad 250 mm a sklonu povrchu 1-5 % podle Tab.6: Součinitele odtoku dešťové vody  $C$  (Standardsy pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech str.19) a  $q$  je návrhový 15minutový déšť [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ] pro Prahu podle Tab.5: Hodnoty návrhového deště (Standardsy pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech str.19)

Pro výsledné ověření je třeba tabulkový drenážní výkon ponížít o bezpečnostní hodnotu 20 %. Ta se používá kvůli snížené schopnosti propustnosti v čase například kvůli zanesení.

Tabulkový drenážní výkon nopové folie Platon De 40 je  $3,85 \text{ l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ . Pro výpočet použijeme bezpečnostní hodnotu  $3,08 \text{ l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ .

$$q' < 0,8 \cdot q_{VYR}$$

$$q'(0,2604) < q_{VYR}(3,08)$$

kde  $q'$  je celkový vypočtený odtok dešťové vody ze střechy [ $\text{l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ],  $q_{VYR}$  je tabulkový drenážní výkon výrobku [ $\text{l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ]

Z výsledku je patrné, že navržená nopová folie Platon De 40 má dostatečný drenážní výkon pro navrhované záhony.

#### 7.5.2. Návrh velikosti potrubí pro odvodnění

Každý z vyvýšených záhonů má vlastní odvodňovací potrubí. Posouzení kapacity potrubí bude provedeno pro záhon s nejvyšší návrhovou hodnotou průtoku.

Okamžitý průtok dešťových vod (ČSN EN 12056-3) – Záhon I (4x2,5 m)

$$Q_d = r C A \quad (1.28)$$

kde  $Q_d$  je celkový okamžitý odtok [ $\text{l.s}^{-1}$ ],  $r$  je vydatnost deště pro Prahu [ $\text{l.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ],  $C$  je součinitel odtoku [-] Pro vegetační vrstvu o tloušťce nad 250 mm a sklonu povrchu 1-5 % podle Tab.6: Součinitele odtoku dešťové vody  $C$  (Standardy pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech str.19),  $A$  je půdorysný průmět odvodňované plochy [ $\text{m}^2$ ]

$$Q_d = 0,030 \times 0,3 \times 4 \times 2,5 = 0,09 \text{ l.s}^{-1} = 5,4 \text{ l.min}^{-1}$$

Roční odtok dešťové vody – Záhon I (4x2,5 m)

$$Q_{r,d} = A_{red} u \quad (1.29)$$

kde  $Q_{r,d}$  je roční odtok dešťové vody [ $m^3 \cdot rok^{-1}$ ],  $A_{red}$  je redukovaná plocha ( $A_{red}=C \cdot A$ ) [ $m^2$ ],  $u$  je dlouhodobý srážkový úhrn ( $u = 550 \text{ mm} \cdot rok^{-1}$  Zdroj: Mapa průměrného ročního úhrnu srážek, ČHMÚ.)

$$Q_{r,d} = A_{red}u = 0,3 \times 4 \times 2,5 \times 0,55 = 1,65 \text{ m}^3 \cdot rok^{-1}$$

Okamžitý průtok dešťových vod – Záhon II (4x3 m)

$$Q_d = r C A \quad (1.28)$$

$$Q_d = 0,030 \times 0,3 \times 4 \times 3 = 0,108 \text{ l} \cdot s^{-1} = 6,48 \text{ l} \cdot min^{-1}$$

Roční odtok dešťové vody – Záhon II (4x3 m)

$$Q_{r,d} = A_{red}u \quad (1.29)$$

$$Q_{r,d} = A_{red}u = 0,3 \times 4 \times 3 \times 0,55 = 1,98 \text{ m}^3 \cdot rok^{-1}$$

Okamžitý průtok dešťových vod – Záhon III (1,5x3 m)

$$Q_d = r C A \quad (1.28)$$

$$Q_d = 0,030 \times 0,3 \times 1,5 \times 3 = 0,041 \text{ l} \cdot s^{-1} = 2,46 \text{ l} \cdot min^{-1}$$

Roční odtok dešťové vody – Záhon III (1,5x3 m)

$$Q_{r,d} = A_{red}u \quad (1.29)$$

$$Q_{r,d} = A_{red}u = 0,3 \times 3 \times 1,5 \times 0,55 = 0,743 \text{ m}^3 \cdot rok^{-1}$$

Dalším krokem je zvolení velikosti průměru potrubí a jeho materiálu pro které je nutno vypočítat maximální průtok (1.29). Maximální průtok musí být vyšší než maximální odtok ze záhonů (1.28).

$$Q_{max} \geq Q_d \quad (1.30)$$

$$Q_{max} = S \cdot v \quad (1.31)$$

$$v = c \cdot \sqrt{Ri} \quad (1.32)$$

$$R = \frac{\text{průtočná plocha}}{\text{omočený obvod}} \quad (1.33)$$

$$c = 25 \cdot \left[ \frac{R}{k + 0,025 \sqrt{Ri}} \right] \quad (1.34)$$

kde  $S$  je průtočná plocha potrubí při dané výšce plnění [ $m^2$ ],  $v$  je rychlost proudění [ $ms^{-1}$ ],  $i$  je sklon [%],  $k$  je drsnost potrubí (pro PVC  $k=0,4$  mm),  $c$  je rychlostní součinitel [ $m^{0,5}s^{-1}$ ],  $Q_{max}$  je maximální dovolený průtok [ $l.s^{-1}$ ],  $Q_r$  je okamžitý průtok dešťových [ $l.s^{-1}$ ]

Pro výpočet, který je zpracován v Tabulce 16 bylo zvoleno potrubí DN110.

Tabulka 16 Výpočet maximálního průtoku potrubím DN110

S	K	i	R	C	V	$Q_{max}$
$m^2$	M	%	M	$m^{0,5}s^{-1}$	$ms^{-1}$	$ls^{-1}$
0,003926991	0,0004	2	0,05	2,306	0,729	2,864

Ověření podle vzorce 1.28:

$$2,864 \geq 0,108 \text{ ls}^{-1}$$

Při plnění odváděcího potrubí pouze do výšky průřezu DN110 je návrh dostatečný pro nejvyšší okamžitý průtok, který byl vypočten na záhonu II.

### 7.5.3. Ověření vhodnosti návrhu průtokoměru PF500

Optimální kapacita průtokoměru udávána výrobcem -10 překlopení/min.



Obrázek 27 Překlápěcí člunkový průtokoměr PF500, Zdroj: Fiedler company, 30.3.2019

Objem člunku – 0,5 l

$$Q_{opt} = \text{počet překlopení} \times \text{objem člunku} \quad (1.35)$$

$$Q_{opt} = 10 \times 0,5 = 5 \text{ l/min}$$

Maximální návrhový průtok 6,48 l/min zjištěný výpočtem v kapitole 7.5.2 pro záhon II. Musí být splněna podmínka:

$$Q_{opt}(5l/min) \geq Q_{n,max}(6,48 l/min)$$

Podmínka pro návrh vhodnosti průtokoměru nebyla splněna. Neznamená to však, že průtokoměr nebude funkční. Průtokoměr bude v nevyšších průtocích měřit mimo oblast lineárního průběhu kalibrační čáry. Pro vyšší hodnoty průtoků bude třeba potřeba provést dynamickou kalibraci.

Maximální návrhový průtok byl použit z největšího záhonu 4x3 m. Pro zbylé záhony je průtokoměr dostatečný. Výpočet návrhového průtoku však nezohledňuje tloušťku vrstvy substrátu ani jeho hydraulické vlastnosti. Konkrétní odtok pro substrát Acre intensive o tloušťce vrstvy 60 centimetrů byl vypočítán v modelu v prostředí HYDRUS1D.

Nejvyšší okamžitý odtok nastal v situaci s nasyceným substrátem pro návrhovou srážku 15 Simulovaný odtok činil 0,894 cm.h<sup>-1</sup>. Po přepočtu pro plochu největšího záhonu, kde je předpokládán největší odtok, vychází maximální průtok 1,783 l.min<sup>-1</sup>. Numerická simulace v programu Hydrus1D naznačuje, že navržená kapacita průtokoměrů je dostatečná.

## 7.6. Návrh zemních úprav

Před začátkem stavby konstrukce terasy s experimentálními záhony je nutné upravit terén. Před začátkem výkopových prací je nutné sejmout ornici do hloubky aspoň 10 centimetrů.

Současný terén je členitý a svažité. Pro potřeby tohoto projektu stačí upravit pouze 10x9 metrů terénu zvoleného území. Základní úprava terénu je naznačena na Výkresu 16. Většina území bude upravena do sklonu 2 %. Výškové poměry jsou naznačeny ve výkresech řezů. Základní výškový bod, od kterého je třeba začít je místo přístupu na terasu při chodníku. V tomto místě je navržena terasa tak, aby mezi asfaltovým chodníkem a vstupem na terasu nebyl žádný nebo minimální výškový rozdíl, a to hlavně kvůli bezbariérovému přístupu. Od této úrovně je směrem dolů po celé šířce území navržen sklon 2 %.



V místě rampy je navržen sklon 1:16. Jedná se o 4 metry dlouhou a 1,5 metru širokou plochu. Vrchní část této plochy pro rampu je v úrovni vrchní části terasy se sklonem 2 %.

V místě pod plánovanými záhony (5,220 metru od nejvyšší části terasy) vzniká výškový schod. V případě sypké zeminy je vhodné tento schod zpevnit, aby nedocházelo k drolení zeminy a poklesu terénu. Tento schod je v návrhu tvořen ztraceným bedněním, které slouží k zachycení podkladních vrstev terasy ve vyšší úrovni a zároveň je využitý pro uložení podkladových hranolů.

Na Výkresu 17 jsou vyobrazeny výkopové rýhy pro odvodňovací potrubí. Dno rýh je také vedeno ve sklonu 2 %, který umožňuje bezpečné odvádění vody do šachet. Navrhovaná hloubka potrubí je 65 centimetrů pod upravený terén. Nebyla zvolena základní hodnota nezámrzné hloubky 1,2 metru z důvodu umístění stavby v Praze a blízko teplovodního vedení. Současně není v plánu mít spuštěné zavlažování během zimních měsíců, kdy se teploty pohybují pod bodem mrazu.

Ve spodní části území je třeba vykopat dvě hranaté jámy pro uložení měřících šachet. Tyto šachty jsou umístěny mimo upravený terén. Hloubka jam je 1,2 metru. Tyto jámy jsou spojeny výkopovou rýhou 0,4 metru pod terénem. Při výkopu této rýhy je potřeba dbát zvýšené opatrnosti kvůli teplovodnímu vedení, jehož pozice není přesně zaměřena.

## 7.7. Orientační výpočet nákladů

Pro představu ceny byla vytvořena tabulka nákladů na materiál.

Tabulka 17 Náklady na materiál

Artikl	Popis	Rozměr	celková potřeba		cena J	Celková cena
Podkladní hranoly	sibiřský modřín	40x70	35	ks	350	12 250 Kč
Terasová prkna	sibiřský modřín	143x27x3000	65	m <sup>2</sup>	620	40 300 Kč
Hranoly pro záhony	sibiřský modřín	70x70	324	bm	239	25 812 Kč
Vruty do dřeva	terasový		2000	ks	2,2	4 400 Kč
Vruty do dřeva	pro záhony	8/140	324	ks	7	2 774 Kč
Štěrk	16/32		9	m <sup>3</sup>	772,8	6 955 Kč
Štěrk	4/8		4,5	m <sup>3</sup>	870,4	3 917 Kč
EPDM Firestone		15000	4,5	m <sup>2</sup>	3340	15 030 Kč
Nopová folie			31,8	m <sup>2</sup>	319	10 144 Kč
Geotextilie		200g	31,8	m <sup>2</sup>	46	1 463 Kč
Geotextilie		500g	100	m <sup>2</sup>	56	5 600 Kč
Substrát			15,3	m <sup>3</sup>	2844	43 513 Kč
Substrát	dovoz					5 000 Kč
Pryžové podložky		100x100x3	300	ks	3,8	1 140 Kč
Dlažba		30x30x5	150	ks	25	3 750 Kč
Dlažba		20x20x5	25	ks	20	500 Kč
Vtok	HL s PVC přírubou		3	ks	1817	5 451 Kč
Štěrkopísek	08/016		6,08	t	180	1 094 Kč
beton	C 8/10		0,403	m <sup>3</sup>	1682	678 Kč
Jímka	Plastová samonosná	1x1	1	ks	15000	15 000 Kč
Jímka		1,5x1	1	ks	12000	12 000 Kč
Potrubí	PVC	DN110	25	bm	75	1 875 Kč
Cihla	Plná betonová	65x140x290	55	ks	16	880 Kč
Ztracené bednění		200x500x250	8	ks	50	400 Kč
						219 926 Kč

Tabulka 17 nezahrnuje měřicí přístroje, výkopové a zemní úpravy a cenu za práci.

Nejvyšší náklady tvoří podle Tabulky 17 cena za substrát Acre intensive, a to necelých 44 tisíc korun. Další nákladnou položkou je dřevo. Terasová prkna, podkladní hranoly a hranoly pro stavbu záhonů dohromady činí téměř 80 tisíc korun.

## 7.8. Bezbariérové užívání

Návrh terasy byl proveden s přihlédnutím k bezbariérovému užívání. Návrh rampy ve sklonu 1:16 je určen Vyhláškou č. 398/2009 Sb. Minimální šířka rampy musí být 1500 mm, což bylo v návrhu splněno. Dalším prvkem jsou průjezdné šířky, které jsou také doporučeny v hodnotě 1500 milimetrů, avšak v odůvodněných případech může být tato hodnota o 300 mm nižší,

tedy minimální průjezdná šířka je 1200 milimetrů. Hlavní vjezd na terasu je navržen v úrovni stávajícího chodníku, který lemují konstrukci terasy. Jak nad, tak pod rampou je splněn minimální rozměr pro manipulaci a otočení vozíku, tj. 1200x1500 mm nebo kružnice o průměru 1500 mm. (Vyhláška č. 398/2009 Sb)

## **7.9. Inženýrské sítě**

Zdroj elektrické energie 220 V, který je potřebný pro pěstebního robota a ovládání automatického závlahového systému je přístupný ze sloupku, na kterém je v současnosti zapojena kamera.

Přívod vody je řešen připojením hadice z budovy D Fakulty stavební.

## **7.10. Použité přístroje**

### **7.10.1. Pěstební robot FarmBot**

Nejvýraznějším a nejzajímavějším přístrojem použitým na tomto projektu je robot FarmBot Genesis v1.4.

Vizí tvůrců robota FarmBot je, aby si lidé mohli pěstovat jídlo sami a nebyli závislí na velkoprodukci. Ovládání FarmBot je možné přes open-source software nebo aplikaci v mobilu či tabletu. Do aplikace je třeba zadat rostliny, které se budou pěstovat a systém podle toho přizpůsobí své funkce. Na jednom záhonu je možné pěstovat i několik druhů rostlin. (FarmBot Genesis v1.4, 2019)

Robot je vybaven čidly pro měření půdní vlhkosti, speciálními hlavicemi pro sázení, zalévání a nástrojem pro likvidaci plevele.

Tento robot funguje na elektrický pohon, který lze získat prostým zapojením do elektrické zásuvky ale také pomocí fotovoltaických panelů. Je nutné jej připojit také ke zdroji vody. Další nutností k provozu robota je internetové připojení. (FarmBot Genesis v1.4, 2019)

FarmBot Genesis v1.4 má maximální rozsah 1,4x2,9 m. Maximální rozměr záhonu je 1,5x3 m. Robot je pohyblivý díky kolejové konstrukci připevněné ke konstrukci záhonu. (FarmBot Genesis v1.4, 2019)



Obrázek 28 FarmBot Genesis v1.4 Zdroj: farm.bot, 14.04.2019

#### 7.10.2. Isco 3700 Full-Size

Vzorkovač Isco 3700 full-size je model přenosného vzorkovače. Tento model umožňuje odběr směsných i dělených vzorků v intervalech. Součástí vzorkovače je peristaltické čerpadlo se sací výškou 7,9 a délkou hadice 30 metrů, což je při návrhu dostačující. Průměr vzorkovače je 50,5 centimetrů a bude uložen v jímce spolu s jedním průtokoměrem PF500. (Technoaqua, 2019)



Obrázek 29 Vzorkovač Isco 3700 Zdroj: Technoaqua, 30.3.2019

## 7.11. Ostatní vybavení

Ve spodní části terasy je navržen lavice a stůl, které slouží primárně pro sezení při manipulaci a měření a výuce.

Jelikož se jedná o experimentální plochu intenzivní zelené střechy, je třeba záhony plít a sekat. Pro tyto účely zbytkového bioodpadu zde může být umístěn dřevěný kompostér.

Součástí terasy je také informační tabule, na které bude stručně popsán projekt experimentálních ploch pro výzkum intenzivních zelených střech. Část tabule bude čistá pro možný zápis – křídlová tabule nebo bílá tabule pro psaní fixem.



Obrázek 30 Zjednodušená vizualizace výzkumné zahrady pohled z ulice

## 8. Závěr

Intenzivní zelené střechy jsou v současnosti vhodnou alternativou zeleně ve městech. V České republice je tento trend stále spíše v počátcích, proto je důležité tuto oblast více prozkoumat. V rešeršní části byly popsány zejména odtokové poměry zelených střech se snahou zaměřit se na intenzivní zelené střechy, které jsou předmětem této práce.

V laboratorní části práce byly provedeny zkoušky pro zjištění fyzikálních a hydraulických parametrů pro substrát Acre intensive. Křivka zrnitosti substrátu ukázala, že zkoumaný substrát lze zařadit do půdního druhu hlinitopísčité půdy. Tento výsledek již napověděl, že je substrát dobře vodě propustný, což bylo potvrzeno měřením nasycené hydraulické vodivosti.

Velkou část práce tvoří studie experimentální a výukové zahrady navržené za pozemku Fakulty stavební na travnaté ploše u vjezdu za budovou D. Parametry záhonů svou skladbou odpovídají situaci zahrady vhodné pro střechy budov s dostatečnou únosností nosné konstrukce. Jelikož jsou vyvýšené záhony určeny primárně pro monitoring vodní bilance, byl při návrhu kladen důraz především na odhad množství odtoku. Návrhový průtok byl vypočítán klasickým postupem uvedeným v normě ČSN EN 12056-3 pro 15minutovou návrhovou srážku. Tento výpočet je však velmi obecný, co se týče zelených střech, proto byl průtok vypočten také numerickým programem HYDRUS1D, který zohledňuje konkrétní parametry substrátu. Z výsledků simulace pro 15minutový návrhový déšť byl maximální odtok třetinový oproti klasickému postupu. Z tohoto porovnání lze usoudit, že klasický postup výpočtu návrhového průtoku při aplikaci na intenzivní zelené střechy je značně předimenzovaný.

Monitoring vodní bilance na intenzivních zelených střechách by mohl vést k návrhu nových výpočetních postupů pro zelené střechy. Pozitivní výsledky by mohly přesvědčit širokou veřejnost pro výstavbu zelené střechy na svém domě.

## Zdroje

### Knihy a články v odborných časopisech

BERNDTSSON, J. C. (2009): *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. Ecological Engineering. 36:351-360.

BURIAN, S., J. DOSTALOVÁ a M. DUBSKÝ. *Standardy pro navrhování, provádění a údržbu: Vegetační souvrství zelených střech*. Brno, 2016.

DALLEY, S., (2015): *The Mystery of the Hanging Garden of Babylon*. Oxford: Oxford University Press.

DOSTAL, P. (2017): *Způsoby systémové podpory výstavby zelených střech*. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně.

HRADILOVÁ, I. (2012): *Využití metody EIS pro stanovení vývoje stavu sedimentů v klidné kapalině*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D..

FLL (2018) *Green Roof Guidelines*. 6. Bonn: Landscape Development and Landscaping Research Society eV (FLL).

ISSA, R. J., K. LEITCH a B. CHANG (2015). *Experimental Heat Transfer Study on Green Roofs in a Semiarid Climate during Summer*. Journal of Construction Engineering. USA, s. 15. ISBN 960538.

JELÍNKOVÁ, V. a V. SKALA (2019). *The use of simple hydrological models to assess outflow of two green roofs systems*. Soil and Water Research. 94–103. DOI: 10.17221/138/2018-SWR.

KIM, E., Jung J., Hapsari G., Kang S., Kim K. et.al. (2018) *Economic and environmental sustainability and public perceptions of rooftop farm versus extensive garden*. Building and Environment. 10:206-215.

KUTÍLEK, M., V. KURÁŽ a M. CÍSLEROVÁ, (1994). *HYDROPEDOLOGIE 10: skriptum*. Praha: ČVUT

PRADHAN, S a S. G. AL-GHAMDI (2018). *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges*. Science of The Total Environment. 15:330-344



- SCHINDLER, B. Y., L. BLAUSTEIN a R. LOTAN (2018). *Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production*. 12:288-299
- URBANCOVÁ, L. a E. LACKOVÁ (2015). *Pedologie: Teorie a cvičení*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- VACEK, P. (2017) *Life-cycle study on semi intensive green roofs*. *Cleaner Production*. 11:203-213
- VERGROESEN, T. a U. M. JOSHI (2010). *Green roof runoff experiments in Singapore*, NOVATECH, 10
- VIJAYARAGHAVAN, K.(2016) *Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends* . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:740-752.
- WALTERS, S. A. a K. S. MIDDEN (2018) *Sustainability of Urban Agriculture: Vegetable Production on Green Roofs*. MDPI. Southern Illinois University, USA, 16
- ZHANG X., Shen L., Tam V., Lee W. (2012) *Barriers to implement extensive green roof systems:A Hong Kong study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 6:314-319.

## Internetové a ostatní zdroje

- Bilance zahraničního obchodu ČR se zeleninou je stále zápornější. In: ČeskéNoviny.cz. [online]. [cit. 20.02.2019]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/bilance-zahranicniho-obchodu-cr-se-zeleninou-je-stale-zapornejsi/1670240>
- DOHNAL, R., *Singapur – báječné místo pro život*. Ekologické bydlení [online]. Stará Boleslav: Chamanne s.r.o, 2013 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/zivotni-prostredi/singapur-bajecne-misto-pro-zivot>
- Dřevěné terasy a jejich životnost, 2015. Dřevostavitel: online svět dřevostaveb [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/drevene-terasy-a-jejich-zivotnost>



Experimental Green Rooftop. ExiVerd [online]. ExiVerd, 2016 [cit. 2019-03-10].

Dostupné z: <http://www.eixverd.cat/en/projects/experimental-rooftop/>

Experimentální zelená střecha na parkovacím stání - Brno-Jih. GreenVille [online].

Brno: GreenVille service, 2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z:

<http://www.greenville.cz/experimentalni-zelena-strecha.html>

FarmBot Genesis v1.4, 2019. FarmBot [online]. California: FarmBot [cit. 2019-04-14].

Dostupné z: <https://farm.bot/products/farmbot-genesis-v1-4>

Herb and Vegetable Gardening on a Green Roof [online]. Green Roof Plan, 2019 [cit.

26.02.2019]. Dostupné z: <https://www.greenroofplan.com/herb-and-vegetable-gardening-on-a-green-roof/>

NATIONAL WEATHER CENTER EXPERIMENTAL GREEN

ROOF. GREENROOFS.COM [online]. Greenroofs.com, ©2019 [cit. 2019-03-10].

Dostupné z: <https://www.greenroofs.com/projects/national-weather-center-experimental-green-roof/>

Operation Manual KSAT [online], Mnichov: METER [cit. 2019-04-07]. Dostupné z:

[http://www.misure.net/sites/default/files/pdf/KSAT\\_Manual.pdf](http://www.misure.net/sites/default/files/pdf/KSAT_Manual.pdf)

PF500 člunkový překlápěcí průtokoměr. FIEDLER: elektronika pro ekologii [online].

©2017 FIEDLER AMS, 2017 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z:

<https://www.fiedler.company/cs/produkty/prutokomery-pro-otevrene-kanaly/clunkovy-preklapec-prutokomer>

ČMSZP. *Situační a výhledová zpráva Půda 2018*. [online]. Českomoravský svaz zemědělských podnikatelů, 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z:

<http://cmszp.cz/mze/2019/situacni-a-vyhledova-zprava-puda-2018/>

Střešní substrát- základ pro zelené střechy. ACRE [online]. ACRE, 2014 [cit. 2019-03-

05]. Dostupné z: <http://www.acre.cz/cs/menu/produkty/material-pro-zelene-strechy/stresni-substrat/>

Střešní substráty. AGROprofi [online]. AGRO, 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z:

<https://www.agroprofi.cz/stresni-substraty>

Substráty. DEK [online]. Stavebniny DEK, 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z:

<https://www.dek.cz/produkty/vypis/11435-substraty>

ŠIMEČKOVÁ, J., *Zrnitostní složení půdy* [online]. [cit. 2019-04-23].

ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA, H. SAITO, M. SAKAI a M. Th. VAN GENUCHTEN. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. [online]. PCProgress, 2008 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: [http://www.pcprogress.com//Downloads/Pgm\\_\\_Hydrus1D/HYDRUS1D\\_\\_4.pdf](http://www.pcprogress.com//Downloads/Pgm__Hydrus1D/HYDRUS1D__4.pdf)

TAN, B., *10 Super Cool Buildings in Singapore You Might Not Have Noticed Before*. TripZilla [online]. Singapore, December 2018 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://www.tripzilla.com/cool-buildings-singapore/71826>

TEROS 21. Meter environment: Soil water potential sensor [online]. METER Group [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.metergroup.com/environment/products/teros-21/>

TMS zakopávací 0,5m, 2019. TOMST [online]. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://eshop.tomst.com/tms/89-tms-3-zakopavaci-05m.html>

Vegetační střechy. BBcom [online]. BBcom, 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.bbcom.cz/sortiment/vegetacni-strechy>

Vítejte na Zemi...: Půda [online]. Praha: ESF, CENIA, PARTNEŘI, 2013 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=pudni\\_\\_druhy\\_\\_podle\\_\\_zrnitostni\\_\\_ho\\_\\_slozeni&site=puda](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=pudni__druhy__podle__zrnitostni__ho__slozeni&site=puda)

Vzorkovače přenosné. Technoaqua: Specialista na vzorkovače, průtokoměry a monitorovací stanice [online]. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.technoaqua.cz/produkty/vzorkovace/prenosne/>

Zelená architektura. JENA [online]. JENA, ©2006 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.jena.cz/menu-2101-zeminy-substraty-kompostovani.html>

## Normy a zákony

vyhláška č. 501/2006 Sb., o obecných požadavcích na využívání území. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2019 [cit. 6. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-501#p20-5>

Vyhláška č. 398/2009 Sb., o obecných technických požadavcích zabezpečujících bezbariérové užívání staveb. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2019 [cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-398#f4040684>

zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2019 [cit. 6. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183#p1-1>

zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2019 [cit. 6. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254#p102-1-p>

## 9. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 Saksun Village, Streymoy, Faerské ostrovy .....	18
Obrázek 2 Khoo Teck Puat Hospital, Singapur .....	27
Obrázek 3 Graf bilance původu zeleniny v ČR.....	31
Obrázek 4 Graf kumulativních nákladů.....	34
Obrázek 5 Klasifikace půdního druhu dle Nováka.....	39
Obrázek 6 Scénáře pro okamžitý odtok v programu HYDRUS .....	43
Obrázek 7 Scénáře pro kumulativní odtok v programu HYDRUS.....	43
Obrázek 8 Vzorky substrátu na pískovém tanku, 12.2.2019 .....	45
Obrázek 9 Skleněné exikátory se vzorky půdy, 5.4.2019.....	47
Obrázek 10 Průběh měření tlaku na přístroji WP4C, 18.4.2019.....	47
Obrázek 11 Retenční čára půdní vlhkosti substrátu Acre intensive .....	49
Obrázek 12 Průběh měření - Casagrandeho zkouška, 26.3.2019.....	52
Obrázek 13 Sítový rozbor, 26.3.2019.....	54
Obrázek 14 Křivka zrnitosti vzorku Acre intensive 0-2 mm.....	56
Obrázek 15 Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd .....	57
Obrázek 16 Křivka zrnitosti ACRE intensive substrátu .....	58
Obrázek 17 Průběh měření přístrojem KSAT, 5.4.2019.....	60
Obrázek 18 Graf závislosti tlakové výšky v čase V11724, T = 25,42°C .....	60
Obrázek 19 Graf závislosti tlakové výšky v čase V7755, T=2465°C.....	61
Obrázek 20 Graf závislosti tlakové výšky v čase V11723, T=24,73°C.....	61
Obrázek 21 Porovnání průměrných hodnot vzorků .....	62
Obrázek 22 Vzorky při hutnění Proctorovým kladivem, 18.04.2019 .....	64
Obrázek 23 Náčrt vizualizace venkovní laboratoře.....	67
Obrázek 24 Vymezení zájmového území .....	68
Obrázek 25 Fotografie z průběhu zaměřování pozemku .....	69
Obrázek 26 Střešní vtok s pevnou PVC přírubou.....	76
Obrázek 27 Překlápěcí člunkový průtokoměr PF500 .....	79
Obrázek 28 FarmBot Genesis v1.4.....	84
Obrázek 29 Vzorkovač Isco 3700.....	84
Obrázek 30 Zjednodušená vizualizace výzkumné zahrady pohled z ulice ..	85

Tabulka 1 Srovnání mocností substrátu.....	16
Tabulka 2 Typy vybraných dostupných substrátů v ČR .....	36
Tabulka 3 Vybrané hodnoty návrhových úhrnů srážek pro ČR, ČSN EN 752 ..	41
Tabulka 4 Přehled modelů pro HYDRUS 1D a jejich parametrů.....	42
Tabulka 5 Výpočet průměrné hmotnosti suchého vzorku .....	48
Tabulka 6 Hmotnosti vzorků na pískovém tanku a podtlakovém aparátu ...	48
Tabulka 7 Hodnoty získané při měření na WP4C a jejich zpracování .....	49
Tabulka 8 Výpočet objemové hmotnosti.....	50
Tabulka 9 Čára zrnitosti Casagrande .....	53
Tabulka 10 Čára zrnitosti - síťový rozbor písčitých částic.....	55
Tabulka 11 Nasycená hydraulická vodivost Ks změřena přístrojem KSAT ....	62
Tabulka 12 Výpočet maximální vodní kapacity .....	65
Tabulka 13 Výpočet pórovitosti a obsahu vzduchu při MVK.....	66
<i>Tabulka 14 Odhad počtu potřebných terasových prken.....</i>	<i>71</i>
Tabulka 15 Množství použitých hranolů .....	72
Tabulka 16 Výpočet maximálního průtoku potrubím DN110 .....	79
Tabulka 17 Náklady na materiál .....	82

## 10. Seznam příloh

- Vyjádření Veolia
- Technický list substrátu Acre intensive
- Protokol z měření zájmového území
- Výkresová dokumentace

01 Situace

02 Výkres vedení instalací

03 Příčné řezy terénem

04 Podélné řezy terénem

05 Příčný řez středem záhonu

06 Příčný řez spodní částí záhonu

07 Pohled - záhon

08 Podélný řez – Záhon I, Farmbot

09 Podélný řez v místě rampy

10 Podélný řez v místě schodu

11 Podélný řez – Záhon II

12 Schéma uložení betonových dlaždic

13 Schéma uložení podkladních hranolů

14 Uložení terasových prken

15 Řezy terasovou konstrukcí

16 Rýhy pro vedení potrubí

17 Řezy šachtou č.1

18 Řezy šachtou č.2

19 Podélné řezy I

20 Podélné řezy II