

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

POSOUZENÍ CHARAKTERISTIK STŘEŠNÍHO SUBSTRÁTU S PŘÍMĚSÍ RECYKLOVANÝCH  
MATERIÁLŮ

ASSESSMENT OF A GREEN ROOF SUBSTRATE AMENDED WITH RECYCLATES

**DO THI MAI DUNG**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

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

Praha 2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Do Jméno: Thi Mai Dung Osobní číslo: 484687  
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Posouzení charakteristik střešního substrátu s příměsí recyklovaných materiálů

Název bakalářské práce anglicky: Assessment of a green roof substrate amended with recyclates

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte detailní rešerši vybrané relevantní literatury na téma zelených střech s důrazem na aspekt využití recyklovaných materiálů v substrátech. Na sadách neporušených vzorků odebraných ze souvrství experimentální zelené střechy s různými substráty s příměsí recyklovaných materiálů a konvenčního substrátu. Odběr vzorků je proveden před vegetační sezónou a po vegetační sezóně. Výsledky analyzujte a vhodnou formou prezentujte. Porovnejte hydraulické charakteristiky různých substrátů a vyjádřete změny charakteristik v čase. Výsledky diskutujte.

Seznam doporučené literatury:

Články v časopisech indexovaných v databázi WOS.

Burian a kol., Vegetační souvrství zelených střech, Standardy pro navrhování, provádění a údržbu, SZUS, 2019

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

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

*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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně za odborného vedení doc. Ing. Michala Sněhoty, Ph.D. a s pomocí uvedených použitých zdrojů informací.

Do Thi Mai Dung

V Praze dne .....

.....

## Abstrakt

Při výstavbě extenzivních zelených střech začíná být trendem využívat substrát se složkami recyklovaného materiálu. V této práci jsou zkoumány a porovnávány tři substráty zelených střech použité pro výstavbu experimentální zelené střechy ve městě Třešť v České republice. Rešeršní část práce se zbývá použitím recyklovaných materiálů v substrátech zelených střech. V praktické části práce byl mezi testovanými substráty substrát komerční Optigrün a dva substráty se složkami recyklovaného materiálu, které byly vyvinuty v rámci výzkumu prováděného v Univerzitním centru energeticky efektivních budov a na Fakultě stavební, České vysoké učení technické v Praze. Celkem se bylo testováno 12 vzorků, polovina byla odebrána na jaře a druhá na podzim. Výstupem práce jsou informace o charakteristikách substrátů, konkrétně o jejich hydraulické vodivosti, retenčních křivkách a vodní kapacitě dostupné pro rostliny. Hydraulická vodivost byla měřena v laboratoři pomocí přístroje KSAT (METER Group AG, Německo). K určení retenčních čar a vodní kapacity substrátů bylo použito zařízení HYPROP (METER Group AG, Německo). Výsledky hydraulické vodivosti ukázaly, že nejvyšších hodnot dosáhl komerční substrát Optigrün typu E. Což je nejspíše způsobeno nízkým obsahem organické složky v substrátu, dochází tak k rychlému proudění skrz substrát. Nejmenší hodnot nabyl substrát TB s příměsí recyklované složky s biouhlem, což je nejspíše způsobené schopností biouhlu dobře vyplňovat póry. Vykreslení retenčních křivek mělo velkou variabilitu, což mohlo být způsobeno několika faktory. Nastaly tři situace, kdy v případě vzorků odebíraných na podzim, po vegetační sezóně, byla odchylka mezi hodnotami výrazná. V případě komerčního substrátu Optigrün typu E vyšla hodnota objemová vlhkost výrazně nižší, než bylo předpokládáno. Lišila se o 6,01 % od minimální hranice nasycené objemové vlhkosti uvedené dodavatelem substrátu. U substrátu TB s příměsí recyklované složky s biouhlem dosáhla hodnoty objemové vlhkosti o 11,47 % více. U substrátu T s příměsí recyklované složky bez biouhlu nabyla objemové hodnoty o 8,66 % více.

Klíčová slova: zelená střecha, střešní substráty, recyklovaný materiál, biouhel, cihelná dř, půdní charakteristiky, retenční čáry, hydraulická vodivost

## Abstract

It is becoming a trend to use substrate in the construction of extensive green roofs with recycled material components. In this paper, there are investigated and compared three green roof substrates used for the construction of an experimental green roof in the city of Třešť in the Czech Republic. The review part of the thesis remains with the use of recycled materials in green roof substrates. In the practical part of the thesis, the substrates tested included a commercial Optigrün substrate and two substrates with recycled material components, which were developed in the framework of research conducted at the University Centre for Energy Efficient Buildings and the Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague. A total of 12 samples were tested, half of them were taken in spring and the other in autumn. The output of the work is information on the characteristics of the substrates, namely their hydraulic conductivity, retention curves and water capacity available for plants. Hydraulic conductivity was measured in the laboratory using a KSAT instrument (METER Group AG, Germany). HYPROP equipment (METER Group AG, Germany) was used to determine the retention lines and water capacity of the substrates. The results of hydraulic conductivity showed, that the commercial substrate Optigrün type E achieved the highest values. This is most likely due to the low organic content of the substrate, which results in rapid flow through the substrate. The TB substrate with the admixture of the recycled biochar component had the lowest values, which is probably due to the biochar's ability to fill the pores well. The plotting of retention curves had a large variability, which could be due to several factors. There were three situations where the variation between values was significant for samples taken in the autumn, after the growing season. In the case of the commercial substrate Optigrün type E, the bulk moisture value was significantly lower than expected. It differed by 6.01 % from the minimum moisture content limit specified by the substrate supplier. For the TB substrate with the addition of the recycled biochar component, the moisture content was 11,47 % higher. For substrate T with an admixture of recycled component without biochar, the volumetric moisture content was 8,66 % higher.

Key words: green roof, growing media, recycled material, biochar, crushed bricks, soil characteristics, retention curve, hydraulic conductivity

### *Poděkování*

*V první řadě bych chtěla srdečně poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Michalovi Sněhotovi, Ph.D. za vřelý a vstřícný přístup při vedení mé práce.*

*Také bych chtěla poděkovat katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství fakulty stavební ČVUT za poskytnutí svých laboratoří k provedení mé praktické části.*

*Nakonec děkuji své rodině a přátelům za silnou podporu při celé délce mého bakalářského studia.*

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle práce .....	10
3	Rešerše .....	11
3.1	Zelené střechy .....	11
3.2	Substráty zelených střech.....	13
3.3	Substráty zelených střech z recyklovaných materiálů .....	14
	Recyklované složky střešních substrátů .....	16
3.3.1	Beton.....	16
3.3.2	Kal z čistíren odpadních vod .....	16
3.3.3	Recyklované stavební kamenivo .....	16
3.3.4	Biouhel.....	17
3.3.5	Červené cihly .....	18
3.3.6	Carbon8.....	18
3.3.7	Superlite .....	19
3.3.8	Kaučukové drobký .....	19
3.3.9	Jílové pelety .....	20
3.3.10	Papírové pelety .....	20
3.3.11	Sklo .....	20
3.3.12	Žluté cihly .....	21
3.4	Další konvenční složky střešních substrátů.....	21
3.4.1	Perlit.....	21
3.4.2	Lávové horniny .....	22
3.4.3	Pemza.....	22
3.4.4	Zeolit.....	22
3.5	Stanovení hydraulických charakteristik substrátu.....	23
3.6	Nasyčená hydraulická vodivost.....	23
3.7	Retenční čára půdní vlhkosti.....	25
3.7.1	Zařízení HYPROP .....	25
3.8	Další laboratorní metody stanovení retenční křivky .....	30
3.8.1	Podtlaková metoda měření retenční čáry.....	30
3.8.2	Přetlaková metoda měření retenční čáry.....	30
3.8.3	Metoda rosného bodu.....	30
4	Praktická část .....	31

4.1	Popis stanoviště.....	31
4.2	Střešní substráty .....	33
4.3	Odběr vzorků.....	34
4.4	Laboratorní analýza substrátů .....	37
4.4.1	Měření nasycené hydraulické vodivosti .....	37
4.4.2	Měření retenčních čar .....	39
5	Výsledky .....	41
5.1	Nasycená hydraulická vodivost.....	41
5.2	Retenční křivky .....	42
5.3	Vodní kapacita dostupná pro rostliny .....	46
6	Diskuse výsledků .....	47
7	Závěr .....	48
8	Použitá literatura .....	50



# 1 Úvod

V současné době je ve společnosti kladen velký důraz na ochranu a zkvalitňování životního prostředí. Velkým globálním problémem je obrovská celosvětová spotřeba materiálů. Předpokládá se, že během následujících čtyřiceti let se konzumace ještě zdvojnásobí. Dalšími problémy jsou emise skleníkových plynů, úbytek biologické rozmanitosti a nedostatek vody způsobený těžbou a zpracováním zdrojů. Prostřednictvím Zelené dohody pro Evropu byla zahájena kolektivní strategie k dosažení klimaticky neutrálního hospodářství do roku 2050 (Evropská komise, 2020). Ke splnění tohoto cíle je potřeba snížit spotřebu na mezní možnosti naší planety. K posunu společnosti tímto směrem napomůže, pokud bude lidem oběhové hospodářství poskytovat kvalitní, funkční, efektivní a cenově dostupné výrobky, které déle vydrží a budou koncipovány tak, aby bylo možné je opětovně využít, opravit či zajistit jejich kvalitní recyklaci (Evropská komise, 2020).

Správné nakládání s odpady je základem cirkulární ekonomiky (Evropská komise, 2018). Jedním z nejlepších způsobů, jak vynaložit s odpadem, je jeho recyklace. Krom klasických produktů vyrobených z recyklace (například sešity, novinové papíry, toaletní papír, lepenkové krabice, obaly na vajíčka, skleněné lahve apod.), se začínají objevovat další nápadité výrobky. Začíná se více využívat recyklovaný plast na výrobu zahradního nábytku, venkovního plotu, zatravnovací dlažby (Zelený bod, rok neuveden). Dále se zpracovává i stavební materiál k opětovnému využití. Nejčastěji jde o stavební suť, stržený asfalt nebo betonové bloky, které se používají do podlahy budov či základů komunikací (Vaškevič, 2017).

Hlavním motivem této práce je porovnání vlastností komerčního střešního substrátu a dvou substrátů právě se složkami z recyklovaných materiálů. Cílem je zjistit, zda se dá obvyklý komerční substrát nahradit substrátem se znovu využitelnými zdroji. Zelené střechy jsou častým tématem při zkvalitňování prostředí ve městech, díky mnoha jejich pozitivním přínosům. Snižují prašnost, zlepšují kvalitu ovzduší, pohlcují oxid uhličitý, redukují efekt tepelných ostrovů, jsou estetickým prvkem apod (Castleton a spol., 2010).

## 2 Cíle práce

Cílem práce bylo v první řadě zpracovat odbornou rešerši literatury na téma zelené střechy, střešní substráty, recyklované materiály používané v střešních substrátech a metody stanovení hydraulických charakteristik. Rešerše byla hlavně zaměřená na metody používané v praktické části praxe.

Cílem praktické části bylo vyhodnotit půdní charakteristiky vzorků substrátů odebraných z experimentální zelené střechy na budově pokladny přírodního Malvínského koupaliště ve městě Třešť na západě Moravy. Přesněji se vyhodnocovaly půdní charakteristiky nasycená hydraulická vodivost, průběh retenčních čar a vodní kapacita dostupná pro rostliny. Všechny charakteristiky se pak porovnály s dostupnými informacemi publikovanými výrobcem.

## 3 Rešerše

Součástí bakalářské práce je rešerše pojednávající o základních informacích spojených se substráty zelených střech. Následující kapitoly se zaměřují na zelené střechy, substráty zelených střech, substráty zelených střech z recyklovaných materiálů a způsoby určení jejich hydraulických vlastností.

### 3.1 Zelené střechy

Zelené střechy jsou definovány jako střechy budov, které jsou částečně nebo zcela pokryty vegetací (Mickovski a kol., 2013). Vzhledem k hojně výstavbě pozemních a dopravních staveb, dochází ke snižování zalesněných a zatravněných oblastí, které jsou ale důležité k zachování kvality životního prostředí (Getter a kol., 2006). Proto je stále důležitější výstavba a obnova ozeleněných prostorů. Dle Molineux a kol. (2015) se zelené střechy (obrázek 1) stávají oblíbeným nástrojem právě pro obnovu zelené infrastruktury v městských oblastech, zejména v biologicky rozmanitých stanovištích jako jsou postindustriální lokality.



Obrázek 1: Intenzivní zelená střecha (převzato z Jackson, 2021)

Blaustein a kol. (2016) představují mnoho kladných přínosů zelených střech, zejména k životnímu prostředí. Díky nim se zmírňují městské tepelné ostrovy, zvyšuje se izolace budov, omezuje se odtok a záplava dešťovou vodou v městském prostředí. Přináší účinný způsob hospodaření se srážkovou vodou a energetické úspory. Zlepšují kvalitu ovzduší sekvestrováním znečišťujících látek a zajišťují příznivé podmínky pro faunu a floru.

Rozšiřují stanoviště volně žijících živočichů ve městech. Napomáhají také ke zvýšení biologické rozmanitosti a využívají se specifická opatření například k sekvestraci uhlíku nebo k zajištění chladnějších střech. Doposud využívali zelené střechy převážně zahradníci, inženýři a architekti. V posledních letech je ale využívají i ekologové například jako nové biotopy pro testování a rozvíjení ekologické teorie.

Zelené střechy se stávají trendem dnešní výstavby. Nejen že zlepšují životní prostředí, ale jsou také estetickým prvkem měst, díky kterým se občané cítí lépe a příjemněji než v plně zastavěné oblasti. Dle Odborné sekce zelené střechy při svazu zakládání a údržby zeleně se v roce 2014 objevil přírůstek 110 000 m<sup>2</sup> plochy zelených střech. V roce 2020 byl roční přírůstek skoro trojnásobný, přibylo 312 000 m<sup>2</sup> zelených střech. Valně převládají střechy extenzivní (80 %) oproti střechám intenzivním (20 %) (Dostal, 2021).

Burian a kol. (2019) uvádí, že zelené střechy se podle nároků na péči a míry rozdělují na zelené střechy intenzivní, polointenzivní a extenzivní. Základním rozdílem mezi intenzivní a extenzivní střechou je míra potřebné péče o vegetaci na střeše. Intenzivní střechy si vyžadují pravidelnou údržbu. Zatímco střechy extenzivní si vystačí s minimální péčí (1 - 2krát do roka). Přechodným typem mezi střechou intenzivní a extenzivní je střecha polointenzivní, která potřebuje v sušších obdobích roku pravidelné zavlažování. Tato práce se zaměřuje hlavně střechy extenzivní, které jsou nejčastěji pokryty mechy, rozchodníky a dalším sukulenty.



Obrázek 2: Extenzivní zelená střecha (převzato z Clissitt, 2022)

## 3.2 Substráty zelených střech

Dle Odborné sekce Zelených střech (Burian a kol., 2019) tvoří jednotlivé funkční vrstvy vegetační souvrství. Vrstvy plní jednu nebo více funkcí. Musí ale dodržovat určité podmínky. Použité materiály, jejich technické parametry a množství musí být zvoleny tak, aby poskytly co nejlepší podmínky pro cílovou vegetaci. Dále musí jednotlivé vrstvy být vzájemně kompatibilní. Funkce jedné vrstvy nesmí negativně ovlivňovat vrstvu druhou. Zároveň je funkční kompatibilita vyžadována i mezi souvrstvím střešního pláště a souvrstvím vegetačním. Vegetační souvrství musí být zhotoveno z materiálů, které dlouhodobě musí vykazovat klíčové vlastnosti pro náležitou funkčnost souvrství. Dále je požadována i chemická a fyzikální stálost použitých materiálů. Je potřeba zachovat strukturální stabilitu vrstvy a nesmí se do vegetačního souvrství, okolí a do odtékající vody uvolňovat závadné chemické látky pro rostliny, živočichy ani člověka. Vegetační souvrství se skládá z následujících vrstev – kořenovzdorná, separační/dilatační, ochranná, drenážní, hydroakumulační, filtrační a vegetační.

Odborná sekce Zelené střechy (Burian a kol., 2019) dále uvádí, že vegetační vrstvu můžeme rozlišit na 2 typy – sypané substrátové směsi a kombinace substrátových směsí se substrátovými panely (hydroakumulační desky). Sypané substrátové směsi by měly mít následující vlastnosti: optimální objemová hmotnost, dlouhodobá stabilita, odolnosti k větrné a vodní erozi, dostatečné provzdušnění i při plném nasycení vodou, dostatečná hydroakumulační schopnost, dostatečná propustnost pro vodu, nízký podíl organických látek, nízký podíl jílovitých částic (aby nedocházelo k uspávání drenážní vrstvy), schopnost uvolňovat a poutat živiny, nesmí obsahovat vysoké množství semen plevelů, nesmí obsahovat škodlivé složky zatěžující životní prostředí a splňovat limity obsahu rizikových látek (vyhláška 131/2014 Sb.). Substrátové směsi zelených střech se především vyrábí z minerálních složek kvůli jejich dobrým hydroakumulačním a drenážním schopnostem. Díky tomu je jejich použití vhodnější než použití zemin. Velikosti používaných částic drcených minerálů se pohybují do 12 mm při mocnosti vegetační vrstvy do 100 mm a při mocnosti vyšší než 100 mm by neměly být částice větší než 16 mm.

### 3.3 Substráty zelených střech z recyklovaných materiálů

Tato kapitola rešerše se zaměřuje na substráty zelených střech z recyklovaných materiálů. Tyto substráty se začínají používat díky nastávajícímu potenciálu zvýšení udržitelnosti zelených střech využitím stavebních recyklovaných materiálů (Mickovski a kol., 2013). Znovupoužití nepotřebných materiálů podporuje ekologickou stránku a napomáhá ke snížení odpadu, což má kladný dopad na životní prostředí.

V dnešní době se objevuje hojné množství publikací, které představují různé studie, výzkumy a experimenty, popisující vlastnosti vybraných recyklovatelných materiálů použitelné jako příměsi do substrátů zelených střech. Nejčastěji se objevují studie s recyklovanými materiály jako jsou například červené cihly, drcený beton, hliněné pelety, pryžové drobků, kompost komunálního odpadu, papírový popel, sklo atp.

Následující kapitoly se věnují substrátům se složkami z recyklovaných materiálů a také substrátům s dalšími konvenčními materiály.

Níže se nachází přehledové tabulky (*tabulka 1*, *tabulka 2*) jak s recyklovanými, tak s dalšími konvenčními materiály, které se využívají ve střešních substrátech.

*Tabulka 1: Přehledová tabulka recyklovaných materiálů využívaných ve střešních substrátech*

<b>Recyklovaný materiál v substrátu</b>	<b>Složení směsi</b>	<b>Literatura</b>
Beton	80 % drcený beton, 20 % organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčího hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)
Carbon8	75 % pelety obsahující odpad z vápencových lomů s oxidem uhličitým, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jíl PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)
Červené cihly	složení nespecifikováno	(Molineux a kol., 2009)
	75 % drcené červené cihly, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jíl PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)
	80 % drcené červené cihly, 20 % organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčího hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)
Jílové pelety	75 % jílové pelety, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jíl PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)
Kal z čistíren odpadních vod	složení nespecifikováno	(Molineux a kol., 2009)

Recyklované stavební kamenivo	65 % inertní hlína, 20 % recyklované stavební kamenivo, 15 % kompost	(Mickovski a kol., 2013)
Kaučukové drošky	složení nespecifikováno	(Asman a kol., 2016)
Papírové pelety	75 % papírové pelety, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)
Sklo	složení nespecifikováno	(Chen a kol., 2018)
Superlite	75 % odpadem drcený pórobeton, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)
Žluté cihly	75 % drcené žluté cihly, 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100)	(Molineux a kol., 2015)

Tabulka 2: Přehledová tabulka ostatních materiálů využívaných ve střešních substrátech

<b>Materiál v substrátu</b>	<b>Složení směsi</b>	<b>Literatura</b>
Biouhel	větší část z drcených cihel, zbytek biouhel (složení více neupřesněno)	(Kuoppamaki a kol., 2016)
Lávové horniny	80% lávové horniny, 20% organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčích hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)
Pemza	80% pemza, 20% organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčích hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)
Perlit	80% perlit, 20% organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčích hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)
Zeolit	80% zeolit, 20% organické látky (kompost komunálního odpadu, směs ovčích hnoje, směs z pilin)	(Eksi a kol., 2020)

## Recyklované složky střešních substrátů

### 3.3.1 Beton

Ve studii Eksi a kol. (2020) byl použit drcený beton z demoličního odpadu jako složka do zkoumaného substrátu zelené střechy v severní části Istanbulu. Projekt nesl název Cerrahpassa Green Roof Research Project (IUCGRP) a trval po dobu jednoho roku od června 2016. Samotný substrát byl namíchan z 80 % drceného betonu a 20 % organickou směsí (kompost komunálního odpadu, ovčí hnůj, směs z pilin). Studií se zjistilo, že drcený beton napomáhá provzdušňování a odvodňování kořenů díky jeho hrubší struktuře, nevyhověl ale běžným požadavkům na zadržení vody a hmotnost. Také se zjistilo, že pro optimální růst rostlin je potřeba použít vrstvu substrátu alespoň o tloušťce 8 cm. Beton se dále ukázal být dobrou příměsí do substrátu pro růst druhů *Allium*.

### 3.3.2 Kal z čistíren odpadních vod

V článku Molineux a kol. (2009) je popsána charakteristika recyklovaného materiálu vyrobeného z alternativních pelet z kalu z čistíren odpadních vod. Studie byla prováděna v Londýně. Zřízené skleníkové pokusy prokázaly významné interakce mezi substráty a množstvím přidaného organického materiálu. Z toho vyplývá, že přidávání organických složek nemělo stejný vliv na růst jednotlivých rostlin ve všech substrátech. Výsledky hustoty částic a volné objemové hustoty ukázaly, že substrát je třeba klasifikovat jako lehký agregát. Dále analýza vyplavování potvrdila, že všechny substráty splňují zákonem dané limity průsakové vody pro pitnou vodu.

### 3.3.3 Recyklované stavební kamenivo

Studie Mickovskiho a kol. (2013) zkoumala použití recyklovaného kameniva v podkladové směsi pro extenzivní zelené střechy, kde je koberec rostlin podpořen lehkými pěstebními médii ležícími nad odvodňovací vrstvou. Byla zkoumána adekvátnost recyklovaného inertního stavebního odpadu jakožto růstového média. Dále se zjišťovaly drenážní vlastnosti směsi, její náchylnost k erozi a odolnost vůči skluzu při umístění do svažitých míst. Substrátová směs byla vyrobena z 20 % recyklovaného stavebního kameniva, 65 % inertní hlíny a 15 % kompostu. Experimentem se zjistilo, že substrát dokáže zajistit poměrně volné odvodnění, také útlum a zpomalování odvodňovacího toku. Kořeny prostoupený substrát měl zvýšenou pevnost, což umožnilo, aby i strmější svahy střech byly stabilní pro běžný chod střechy. Směs substrátu také podporuje růst rostlin, navíc je odolná vůči erozi a skluzu a je schopná zajistit dobrou drenáž střechy.



### 3.3.4 Biouhel

Experiment, který byl prováděn v jižním Finsku Kuoppamakinem a kol. (2016), ukázal, že ze stávajících zelených střech je mnohem vyšší koncentrace fosforu (F) a dusíku (N) v odtoku než z nedaleké živičné střechy bez vegetace. Jako prostředek pro uchování živin v substrátu zelené střechy byly navrženy střešní substráty s obsahem biouhlu. Pro výzkum vytvořili experimentální plošinu ke zkoumání změn biouhlu v substrátu, který se skládal převážně z recyklovaných drcených cihel. Využity byly dvě metody ozelenění – předpěstovanými rohožemi a osetím semeny v kombinaci se sazenicemi. Účinek biouhlu na odtok se monitoroval během jednoho roku ve všech ročních obdobích, včetně zimy s obdobími mrazu a tání. Na začátku experimentu byly zjištěny zanedbatelné dopady biouhlu. Ale v situaci, kdy systém na zelené střeše dokázal dozrát za méně než jeden rok, biouhel prokázal schopnost, zachování živin v soustavě. Celková roční zátěž obou živin byla změnou způsobenou biouhlu u obou typů zelených střech výrazně snížena. Podle výsledků studie by úprava substrátů zelených střech pomocí biouhlu mohla být částečným řešením problému znečištění živinami.

Dle Cao a kol. (2014) je biouhel (obrázek 3) užitečnou složkou do střešního substrátu pro lepší zadržování vody, aniž by se zatížil substrát kvůli jeho nízké objemové hmotnosti. Pokud se zvýší retence vody v substrátu, mohl by se výběr rostlin na zelené střeše rozšířit i na ty více náročné na spotřebu vody, což by také redukovalo odtok dešťové vody. Ve studii se zkoumaly účinky biouhlu zeleného odpadu ve dvou testovacích substrátech. Biouhel významně zlepšil retenční kapacitu, které se zvyšovala s vyšším přídávkem biouhlu. S 30 % příměsí biouhlu v substrátu se také o 16 % zvýšila vodní kapacita dostupná pro rostliny. Studie ukázala, že přídavek biouhlu zlepšuje kvalitu půdy, zvyšuje schopnost půdy držet vodu a potenciálně rozšiřuje výběr rostlin v suchém podnebí.



Obrázek 3: Biouhel (převzato z Warner, 2021)

### 3.3.5 Červené cihly

Zmínka o červených cihlách jakožto součást substrátu zelených střech je hned několik. Například Molineux a kol. (2009, 2015) provedli hned dvě studie, a to v roce 2009 a 2015, které byly provedeny v Londýně. Další studii pak prováděli Eksi a kol. (2020) v Istanbulu.

V experimentu z roku 2009 (Molineux a kol., 2009) byly skleníkovými pokusy zjištěny významné interakce mezi substráty a množstvím přidaného organického materiálu, což znamená, že přidávání organické části nemělo stejný vliv na růst rostlin v substrátu. Analýza vyplavování potvrdila, že substrát splňuje zákonem dané limity průsakové vody pro pitnou vodu.

O šest let později Molineux a kol. (2015) vydali studii, kde popisují substrát s drcenými červenými cihlami z vadné výroby domácích cihel za účelem určení jejich účinnosti ke zvýšení druhové rozmanitosti a hojnosti. Směs byla vytvořena z 75 % červených cihel a z 25 % organických látek (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100). Experiment trval 15 měsíců na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně. Na vzorkách docházelo k dobrému klíčení sazenic, pravděpodobně díky schopnosti červené cihly dobře zadržovat vodu a také jejímu nízkému pH v jejím surovém stavu. Její pH lze dokonce snížit na neutrální hodnotu přidáním určitých organických látek (Molineux a kol., 2009). Nejen že obsah červené cihly podpořil vyšší diverzitu, ale také se zde rostliny usadily poměrně rovnoměrně, což by mohlo být využitelné při designových úpravách zelených střech.

V další studii Eksiho a kol. (2020) smíchali drcené červené cihly (80 %) s organickými složkami (20 %) – kompost komunálního odpadu, směs ovčího hnoje a směs z pilin. Experiment trval rok a byl prováděn na střeše vysoké školy Istanbulské univerzity v severní části Istanbulu. Zjistilo se, že ostrohranná struktura drcených cihel způsobila nízkou retenci vody, příliš vysokou objemovou hmotnost substrátu a nedostatečnou pórovitost, což omezovalo provzdušnění kořenů. Jako další nevýhodou drcených cihel je možná přítomnost vyšších koncentrací těžkých kovů (Ye, 2013).

Na rozdíl od příznivých závěrů prvních dvou studií Molineuxe a kol. (2009, 2015) v té Eksiho a kol. (2020) studii došlo k opačnému úsudku, že jsou červené drcené cihly nevhodnou složkou do střešního substrátu. Nejspíše je tento rozpor názorů způsoben jinými okolními podmínkami míst zkoumaných střech jednotlivých studií.

### 3.3.6 Carbon8

Carbon8 je substrátová směs navržená a zkoumaná Molineuxem a kol. (2015) za účelem určení její účinnosti ke zvýšení druhové rozmanitosti a hojnosti. Experiment byl zřízen na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně a trval po dobu 15 měsíců. Testovaný substrát byl dodán společností Shire Green Roofs

Substrates Ltd. (Southwater, West Sussex, UK) a skládal se z 75 % pelet obsahujících odpad z vápencových lomů spolu s oxidem uhličitým a z 25 % organických látek (50 % směs kompostu a 50 % jílu PAS 100). Ukázalo se, že na vzorku dochází k dobrému klíčení sazenic a že pro zvýšení blahodárných podmínek růstu rostlin je dobré použít větší vrstvu substrátu.

### 3.3.7 Superlite

Superlite je název substrátu použitého ve studii Molineuxe a kol. (2015). Patnáctiměsíční výzkum byl prováděn na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně. Popisuje použití substrátu za účelem určení jeho účinnosti ke zvýšení druhové rozmanitosti a hojnosti. Superlite obsahuje z 75 % odpadem drcený pórobeton a z 25 % organické látky (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100). Klíčení sazenic se na substrátu zdálo být zvláště pomalé. U vzorku lze ale rozsah a druhová skladba posílit zvětšením tloušťky vrstvy substrátu.

### 3.3.8 Kaučukové drošky

Kaučukové drošky (*obrázek 4*) byly Asmanem a kol. (2016) použity ve studii, která měla za úkol prozkoumat hydrologické šetření výkonnosti k prokázání vhodných vlastností k podpoře infiltrace zelené střechy a k poskytnutí dočasných vodních skladovacích prostor. Drošky byly zkoumány na zkušebním lůžku. Výsledek naznačuje, že kaučukové drošky lze použít k regulaci dešťové vody a redukci odtoku při zajištění drobného odvodnění a provzdušňování podkladu střech. Z výsledků také vyplývá, že kaučukové drošky je vhodné použít v odvodňovacích vrstvách a sklon 6 % je vhodný pro lehké zelené střechy.



Obrázek 4: Kaučukové drošky (převzato z Salman, 2021)

### 3.3.9 Jílové pelety

Molineux a kol. (2015) popisují studii použití substrátu s obsahem jílových pelet („clay pellets“) obsahující kal z čistíren odpadních vod. Výzkum se zaměřoval především na jejich prospěšnost vůči zvýšení druhové rozmanitosti a hojnosti na zkoumané střeše. Testované substráty byly dodané společností Shire Green Roofs Substrates Ltd. (Southwater, West Sussex, UK). Směs byla vytvořena kombinací 75 % jílových pelet s 25 % organických látek (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100). Experiment byl zřízen na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně a trval 15 měsíců. Na vzorku se zdálo být klíčení rostlin obzvláště pomalé. Po konsolidaci se ale substrát ukázal být blahodárný pro růst rostlin, jelikož se na něm vytvořilo velice rozmanité společenství (v průměru 70–75 rostlin na 1 m<sup>2</sup>). Důvodem je pravděpodobně schopnost jílových pelet dobře zadržovat vodu a také jejich nízké pH v jejich surovém stavu, které lze snížit na neutrální hodnotu přidáním určitých organických látek (Molineux a kol., 2009). Ke zvýšení blahodárnosti je pak potřeba zvětšit vrstvu substrátu. Dále se ukázalo, že jílové pelety ještě v kombinaci s červenými cihlami nabízejí velmi slibné podklady pro maximalizaci rozmanitosti a rovnoměrnější usazení rostlin.

### 3.3.10 Papírové pelety

Molineux a kol. (2015) popisují použití papírových pelet vytvořených z popela spálených recyklovaných novin v substrátech používané pro zelené střechy. Jejich cílem bylo zjistit jejich míru významu při požadavku zvýšení druhové rozmanitosti a hojnosti. Experiment byl prováděn 15 měsíců na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně. Substrát byl dodán společností Shire Green Roofs Substrates Ltd. (Southwater, West Sussex, UK) a byl vytvořen smícháním 75 % papírových pelet s 25 % organických látek (50 % směs kompostu, 50 % jílu PAS 100). Vzorky s pelety popele spálených novin se ukázaly být obzvláště chabé co se týče samotného klíčení a růstu rostlin. Pravděpodobně kvůli jejich omezené schopnosti zadržovat vodu a vysokému pH (Molineux a kol., 2009). Teprve, když se pelety smíchaly s hlínou a červenými cihlami, byl výkon substrátu přijatelný. Pro zvýšení blahodárných podmínek pro růst rostlin se ještě může zvětšit tloušťka vrstvy substrátu.

### 3.3.11 Sklo

Výzkum popsany Chenem a kol. (2018) se zabýval testováním tří materiálů – normální pěstovaný substrát, komerční substrát zelené střechy a směsí substrátu s recyklovaným sklem. Výzkum byl zaměřen na využití recyklovaných skleněných materiálů ve střešních substrátech za cílem snížení znečištění průsakové vody tekoucí ze zelených střech. Jelikož je recyklované sklo lehký a porézní materiál, zlepšuje proto vstřebávání

škodlivin a čištění vody. Na substrátech byly testované 3 druhy rostlin – rozchodník (*sedum*), kapradí (*fern*) a keř (*shrub*). Pozorováním změn kvality vody v průběhu času se zjistilo, že substráty s vyžralými rostlinami snižovaly koncentrace škodlivin v odtoku s výjimkou koncentrací dusíku (N). Komerční substrát zelených střech obsahoval vysoké množství živin, proto rostliny pak rostly lépe než v dalších dvou substrátech, na druhou stranu vyprodukovalo větší znečištění. Směs normálního pěstebního substrátu se směsí substrátu s recyklovaným sklem si vedl dobře při neutralizaci kyselých dešťů, ale nijak výrazně nesnižoval množství jiných znečišťujících látek. Studie došla k závěru, že ke zvýšení čistící schopnosti recyklovaného skla je potřeba promístit poměr mezi recyklovaným sklem a organickými látkami.

### 3.3.12 Žluté cihly

Dalším zkoumaným recyklovaným materiálem Molineuxem a kol. (2015) byly drcené žluté cihly z vadné výroby cihel. Experiment byl zřízen na zelené střeše Bourneovy laboratoře vysoké školy Royal Holloway v Londýně a byl dlouhý 15 měsíců. Testovaný substrát dodaný společností Shire Green Roofs Substrates Ltd. (Southwater, West Sussex, UK) byl složený z 75 % drcených žlutých cihel a z 25 % organickými složkami (50 % směs kompostu, 50 % jíl PAS 100). Na vzorku došlo k dobrému klíčení sazenic. U ostatních zkoumaných materiálů ve stejné studii (např. drcené červené cihly, hliněné pelety, papírové pelety, ...) došlo ke zvýšení prospěšných podmínek pro růst rostlin při použití větší vrstvy substrátu. Jedinou výjimkou byl substrát s příměsí žlutých drcených cihel, v místech s tímto substrátem se druhová rozmanitost nezlepšila, a navíc došlo i k poklesu počtu druhů. Není známo, jaká vlastnost žluté cihly tento jev způsobila.

## 3.4 Další konvenční složky střešních substrátů

### 3.4.1 Perlit

Eksi a kol. (2020) použili perlit (80 %) jako hlavní přísadu do střešního substrátu spolu s recyklovanými organickými materiály (20 %) – kompost komunálního odpadu, ovčí hnůj a směs z pilin. Studie trvající jeden rok byla provedena na střeše vysoké školy Istanbul University v severní části Istanbulu a nesla název Cerrahpassa Green Roof Research Project (IUCGRP). Perlit má významný vliv na schopnost substrátů zadržovat vodu a pórovitost (Panayiotis a kol., 2003). Způsobuje ale vyšší uhlíkovou stopu v důsledku jeho zpracování. Navíc se snadno dokáže rozpadnout vlivem větru vzhledem k jeho lehkosti (Panayiotis a kol., 2003). Další nevýhodou je jeho vyšší tepelná vodivost, která je silně ovlivňována teplotou okolního vzduchu a negativně působí na růst rostlin. Směs perlitu s komunálním odpadem vykazovala přijatelné fyzikální a chemické vlastnosti a pozitivně ovlivnila růst rostlin. Perlit ale není vhodný pro použití v suchozemských klimatických oblastech.

### 3.4.2 Lávové horniny

Eksi a kol. (2020) se zabývali místně dostupným materiálem – lávovými horninami. Studie byla provedena na střeše vysoké školy Istanbul University v severní části Istanbulu. Směs substrátu byla složena z 80 % lávových hornin a z 20 % organických látek (kompost komunálního odpadu, ovčí hnůj a směs z pilin). Zjistilo se, že lávové horniny mají nevýhodu kvůli jejich vyšší tepelné vodivosti, která je silně ovlivňována teplotou okolního vzduchu a negativně působí na růst rostlin. Dále se ukázalo, že tloušťka vrstvy substrátu o velikosti 8 cm je pro růst rostlin dostatečná.

### 3.4.3 Pemza

Pemza byla z jedním ze zkoumaných materiálů Eksiho a kol. (2020). Byla použita jakožto hlavní složka (80 %) substrátu spolu s recyklovanými materiály (20 %) – kompost komunálního odpadu, ovčí hnůj a směs z pilin. Projekt probíhající na střeše vysoké školy Istanbul University v severní části Istanbulu s názvem Cerrahpassa Green Roof Research Project (IUCGRP) běžel jeden rok. Směs pemzy s komunálním odpadem vykazovala přijatelné fyzikální a chemické vlastnosti, pozitivně ovlivnila růst rostlin skoro stejně jako to dokáže klasický komerční substrát. Pemza může být dobrou volbou k požití vzhledem k její nižší tepelné vodivosti. Je také prospěšná pro toleranci sucha travního rašeliniště.

### 3.4.4 Zeolit

Eksi a kol. (2020) použili 80 % zeolitu (obrázek 3) v kombinaci s organickými látkami (20 %) ke studii prováděné na střeše vysoké školy Istanbul University v severní části Istanbulu. Výzkum trval jeden rok. Jako organické látky byly použity recyklované materiály, a to kompost komunálního odpadu, směs ovčích hnoje a směs z pilin. Pro všechny rostlinné druhy, které se pěstovaly na zelené střeše, bylo zjištěno, že je tloušťka vrstvy substrátu o velikosti 8 cm dostatečná pro růst rostlin. Směs se zeolitem ukázala, že zvládne dobře udržet vodu a živiny, ale nedokáže podpořit růst rostlin kvůli nevhodné distribuci velikosti částic.



Obrázek 5: Zeolit (převzato z Thazhamon, 2021)

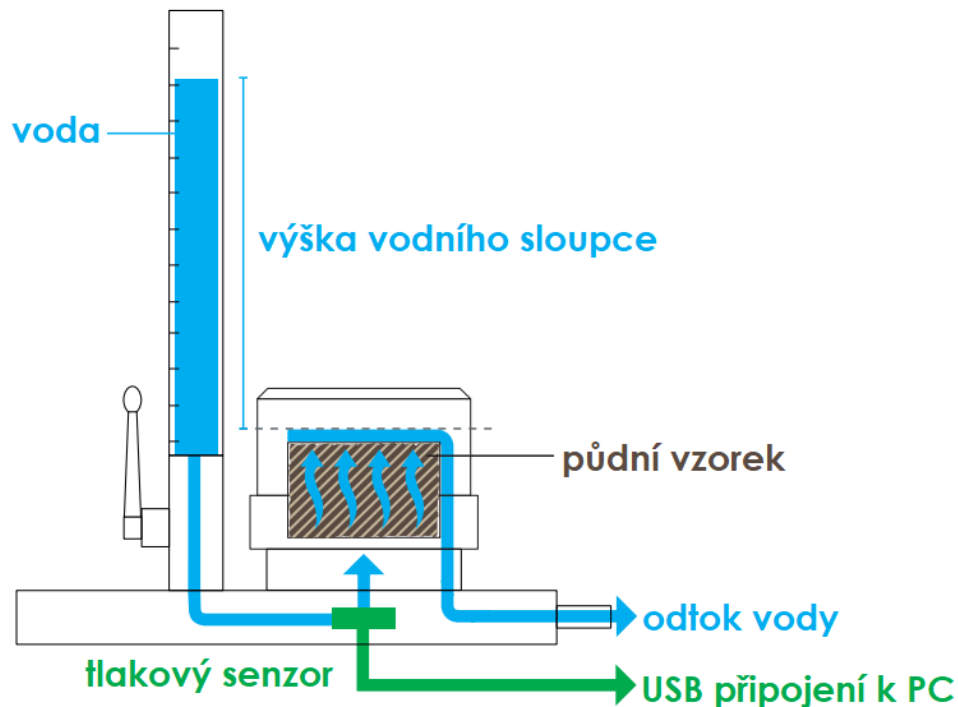
### 3.5 Stanovení hydraulických charakteristik substrátu

Hydraulické charakteristiky půdy popisují schopnost půdy vázat vodu a její rychlost proudění. Různé půdní druhy se v tomto směru liší. Písčité půdy vodu hůře drží a voda jimi lépe protéká. Naopak v jílovitých půdách se voda silně zadržuje, a proto v ní voda proudí velmi pomalu. Tyto vlastnosti slouží k informaci, jak s danou půdou nejlépe hospodařit (Schelle a kol., 2013).

K vyhodnocení hydraulických charakteristik se využívají různé laboratorní metody. Nicméně zatím neexistuje žádné dostupné měřicí zařízení, které by dovedlo určit retenční křivku v plném rozsahu vlhkosti půdy. Proto se často využívá kombinace více metod k dosažení plných výsledků (Schelle a kol., 2013).

### 3.6 Nasycená hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost se dá měřit jak v terénu, tak laboratorně. Přístroj KSAT (METER Group AG, USA) slouží k měření nasycené hydraulické vodivosti v laboratorním prostředí. Měření probíhá tak, že plně nasycený půdní vzorek ve válečku umístí do zařízení KSAT (obrázek 6, obrázek 7). Skrz vzorek pak proudí voda, která přepadá přes hranu vzorku. Měří se tlak vody působící na tlakové čidlo na spodním okraji. Tím se zjistí hodnoty průtoků v čase. Voda pak odtéká ze zařízení odtokovou trubicí. Měřením se pak zjišťují hodnoty rychlosti průtoku a hydraulický gradient (METER Group AG, 2012).



Obrázek 6: Schéma zařízení KSAT (upraveno z METER Group AG, 2012)

Měřit lze dvěma metodami, a to metodou s konstantním pádem a metodou s proměnným pádem. Při použití metody s konstantním pádem se hydraulická vodivost se vypočte z tohoto vzorce [1]:

$$K_S = \frac{L \cdot V}{H \cdot A \cdot t} \quad [1]$$

kde  $K_S$  [ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je hydraulická vodivost,  $L$  [cm] je délka půdního vzorku,  $V$  [ $\text{cm}^3$ ] je objemový tok vody,  $H$  [-] je hydraulický sklon,  $A$  [ $\text{cm}^2$ ] je plocha vzorku půdy a  $t$  [s] je čas.

Při použití metody s proměnným pádem se hydraulická vodivost se vypočte z tohoto vztahu [2]:

$$K_S = \frac{A_{bur}}{A_{sample}} \cdot L \cdot f \quad [2]$$

kde  $K_S$  [ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je hydraulická vodivost,  $A_{bur}$  [ $\text{cm}^2$ ] plocha průřezu byrety,  $A_{sample}$  [ $\text{cm}^2$ ] je plocha průřezu půdního vzorku,  $L$  [cm] je délka půdního vzorku a  $f$  [ $\text{s}^{-1}$ ] je koeficient proložené exponenciální funkce.

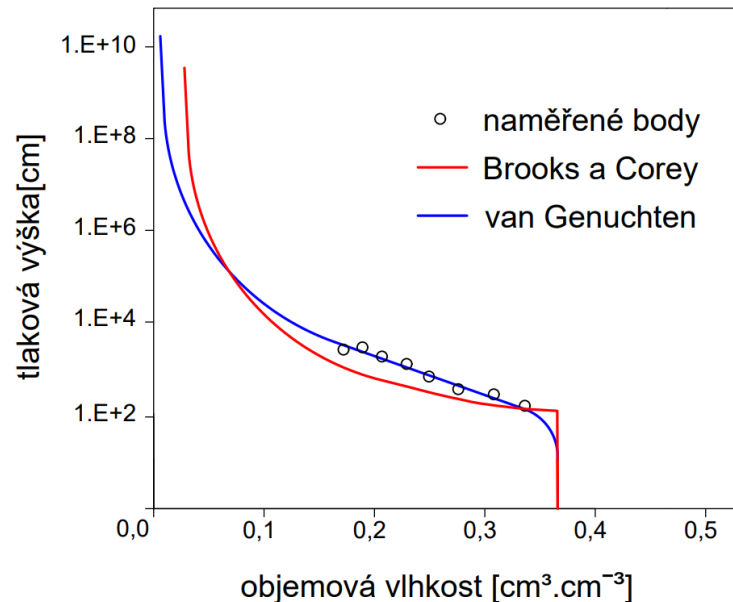


Obrázek 7: Zařízení KSAT



### 3.7 Retenční čára půdní vlhkosti

Za retenční čáru půdní vlhkosti se označuje grafické zobrazení vztahu mezi vlhkostí půdy a vlhkočním potenciálem (sací tlak, tlaková výška). Průběh retenční čáry je ovlivněn několika faktory jako je zrnitostní a mineralogické složení, struktura a objemová hmotnost půdy, obsah humusu a výměnných kationtů v půdě. Empiricky jsou retenční čáry vyobrazeny pomocí různými rovnicemi. Obvykle se využívá rovnice Brookse a Coreyho nebo rovnici van Genuchtena (Hillel, 1998). Grafy retenčních křivek jsou vykresleny na *obrázku 8*.



Obrázek 8: Retenční čáry podle van Genuchtena a Brooks-Coreyho

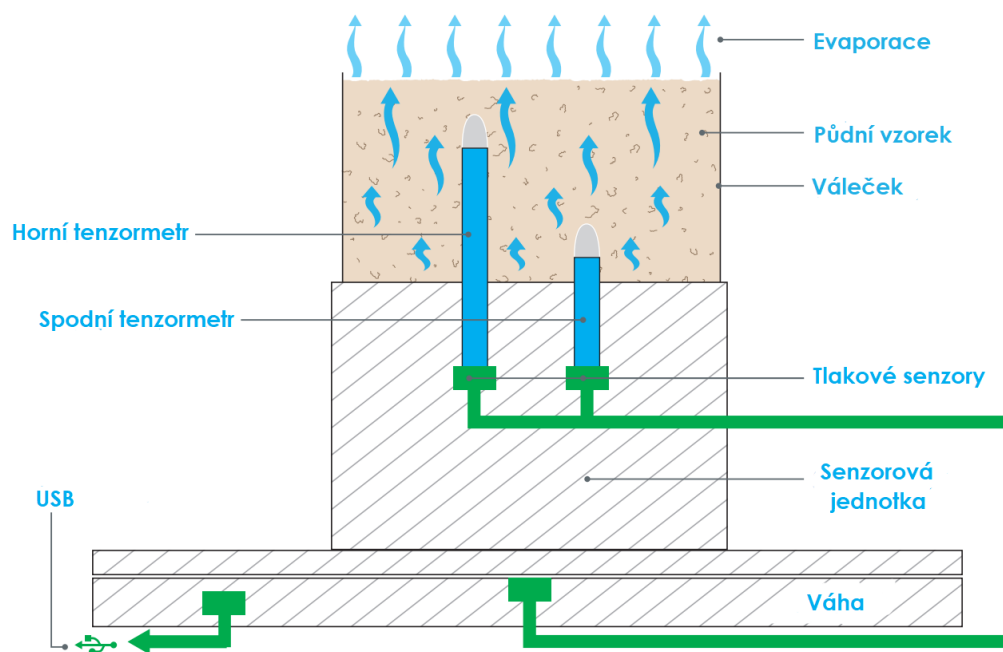
#### 3.7.1 Zařízení HYPROP

HYPROP (METER Group AG, Německo), nezkráceně HYdraulic PROPerty, je zařízení sloužící k měření klíčových hydraulických funkcí půdních vzorků pomocí odpařovacího experimentu (METER Group AG, 2018). Tato kapitola čerpala z návodu použití HYPROP (METER Group AG, 2018) a ze související odborné literatury.

Wind (1966) vyvinul vypařovací metodu v polovině šedesátých let 20. století. Princip spočíval v tom, že se 5 tenzometrů vložilo do půdního vzorku. Vzorek stál na vahách a během procesu odpařování se v čase měřila tlaková výška a změna hmotnosti vzorku. Na základě těchto údajů byla vypočítána retenční křivka a nenasycená hydraulická vodivost v rozmezí mezi nasycením a 500 hPa. Schindler (1980) pak tuto metodu zjednodušil a použil pouze 2 tenzometry. HYPROP pracuje na základě této metody. V průběhu let se ještě metoda dále

zjednodušila (Schindler a kol., 2006; Schindler a kol., 2010). Pomocí zařízení HYPROP je možné současně naměřit retenční křivku a funkci nenasyčené hydraulické vodivosti v rozmezí od nasycení vzorku vodou téměř po bod trvalého vadnutí. Doba měření závisí na typu půdy, pohybuje se od 2 až 10 dnů.

HYPROP (obrázek 9, obrázek 10) měří vztah mezi tlakovou výškou a vlhkostí půdního vzorku. Vyhodnocuje také závislost nenasyčené hydraulické vodivosti na napětí/obsahu vody („Kuova křivka“). Tato metoda je založená na měření dvou tenzometrů, které jsou umístěny v rozdílných hloubkách půdního vzorku ve válečku pro půdní vzorky. Tenzometry jsou umístěny ve stejné rovině. Měřený vzorek se nejdříve nasatí vodou, nasadí se na nástavec HYPROPu a položí se na váhu. Z vrchu povrch půdy není zakrytý, je tedy vystaven okolní atmosféře a voda se z půdy vypařuje. HYPROP měří tlakovou výšku vody ve dvou horizontech vzorku v průběhu odpařování vody (METER Group AG, 2018).



Obrázek 9: Zařízení HYPROP (upraveno z Meter Group AG, 2018)

Změna hmotnosti v čase se určí díky váze, na které vzorek stojí při celém procesu. Střední hodnota  $pF$  (dekadický logaritmus tlakové výšky v cm) se vypočítá na základě průměrných hodnot obou tenzometrů. Průměrná objemová vlhkost získá na základě změn hmotnosti (METER Group AG, 2018).

Rychlost vypařování se zjišťuje z rozdílů hmotnosti, na základě kterých se objemový průtok vypočte v čase. Hodnoty hydraulické vodivosti se odráží na schopnosti půdy dopravovat vodu na povrch. Je-li vodivost nízká, půda na povrchu vysychá a na dně zůstává vlhká. Naopak je-li vodivost vysoká, odpařuje se voda rovnoměrně z celého vzorku a oba tenzometry se dostanou na téměř stejné hodnoty (METER Group AG, 2018).



Obrázek 10: Celá soustava zařízení HYPROP (převzato z Meter Group AG, 2018)

Výpočet celkové hmotnosti vody  $w_i$  se provádí dle rovnice [3]:

$$w_i = w_{tot}(i) - w_{cyl} - w_{HYP} - w_{soil} \quad [3]$$

kde  $w_{tot}$  [g] je celková hmotnost,  $w_{cyl}$  [g] je hmotnost válce,  $w_{HYP}$  [g] je hmotnost zařízení HYPROP,  $w_{soil}$  [g] je hmotnost půdy.

Objem vody  $V_w$  [cm<sup>3</sup>] se získává vydělením  $w_i$  hustotou vody, u které se předpokládá, že je rovna hodnotě 1 g.cm<sup>-3</sup>. Průměrná vlhkost  $\theta$  [cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>] v čase  $t_i$  se vypočte vydělením objemu vody  $V_w$  objemem válce  $V$ .

Pro získání dat retenční křivky je potřeba střední vlhkost  $\theta_{i-1/2}$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] v intervalu mezi  $t_{i-1}$  a  $t_i$ , ta se spočítá pomocí rovnice [4]:

$$\theta_{i-1/2} = \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \quad [4]$$

kde  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je objemová vlhkost na počátku časového intervalu  $t_i$  a  $\theta_{i-1}$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je objemová vlhkost na konci intervalu  $t_i$ .

Při vyhodnocování parametrů retenční křivky se provádí optimalizace parametrů. Software HYPROP FIT se snaží přiblížit vyhodnocovanou naměřenou retenční křivku k předpokládanému modelu tak že se snaží optimalizačním algoritmem snížit hodnotu cílové funkce [5]:

$$\phi(b) = \omega_\theta \cdot \sum_{i=1}^r \omega_{\theta,i} \cdot [\theta_i - \theta_i(b)]^2 + \omega_K \cdot \sum_{i=1}^r \omega_{K,i} \cdot [K_i - K_i(b)]^2 \quad [5]$$

kde  $\omega_\theta$  [-] je váha dat vlhkosti,  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je naměřená hodnota objemové vlhkosti vzorku,  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je modelem předpokládaná hodnota objemové vlhkosti,  $b$  [-] je vektor parametrů retenční křivky,  $\omega_K$  [-] je váha dat hydraulické vodivosti,  $K_i$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je naměřená hydraulická vodivost vzorku a  $K_i$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je modelem předpokládaná hydraulická vodivost.

Software HYPROP umožňuje současně prokládat křivky retenčních křivek i hydraulické vodivosti. V našem případě se optimalizovala pouze část pro retenční křivku ( $\omega_K = 0$ ). Hodnoty  $\omega_\theta$  se přímo rovnají 1 ( $\omega_\theta = 1$ ). Dále tedy pracujeme pouze se zjednodušenou rovnicí [6]:

$$\phi(b) = \sum_{i=1}^r [\theta_i - \theta_i(b)]^2 \quad [6]$$

kde  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je naměřená hodnota objemové vlhkosti vzorku,  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je modelem předpokládaná hodnota objemové vlhkosti a  $b$  [-] je vektor parametrů retenční křivky.

Rovnice [7] pro výpočet efektivní saturace  $S_e$  [-] podle van Genuchtena (Peters a Durner, 2006):

$$S_e(h) = (1 + (\alpha|h|)^n)^{-m} \quad [7]$$

kde  $\alpha$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] je tvarový parametr retenční křivky,  $h$  [cm] je tlaková výška,  $m$  [-] je tvarový parametr retenční křivky.

Další rovnicí [8] (Peters a Durden, 2006) pro výpočet efektivní saturace  $S_e$  [-] je:

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [8]$$

kde  $\theta_i$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je naměřená hodnota,  $\theta_r$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je reziduální vlhkost a  $\theta_s$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ] je obsah nasycené vody.

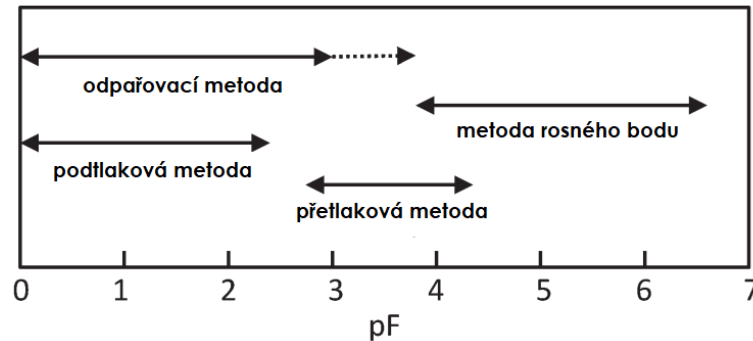
V případě, že má měřená retenční čára bimodálním charakter, se efektivní saturace  $S_e$  [-] počítá podle této rovnice pro dva pórové podsystemy (Peters a Durner, 2006) [9]:

$$S_e(h) = \sum_{i=1}^2 \omega_i \cdot S_{e_i} \quad [9]$$

kde  $\omega_i$  [-] váhový faktor pro pórový podsystem a  $S_{e_i}$  [-] je vážená efektivní saturace podsystemu.

### 3.8 Další laboratorní metody stanovení retenční křivky

Zatím neexistuje žádné dostupné měřicí zařízení, které by dovedlo určit retenční křivku v plném rozsahu vlhkost půdy. Proto se často využívá kombinace více laboratorních metod k dosažení plných výsledků (Schelle, 2013). Na *obrázku 11* jsou vyznačené limity jednotlivých metod, které jsou více popsány v podkapitolách.



Obrázek 11: Schéma rozsahů metod měření retenčních čar (upraveno z Schelle, 2013)

#### 3.8.1 Podtlaková metoda měření retenční čáry

V podtlakové metodě měření retenční čáry se postupuje následovně. Nenarušený půdní vzorek ( $100 \text{ cm}^3$ , výšky 4 cm) se umístí na porézní desku, kde je v hydraulickém kontaktu s vodou. Použitím spojených nádob se vodní fáze vzorku dostane do podtlaku. Voda pak odtéká ze vzorku, dokud není dosažena hydraulická rovnováha (Dane a Hopmans, 2002; Schelle a kol., 2013).

#### 3.8.2 Přetlaková metoda měření retenční čáry

V přetlakové metodě měření retenční čáry působí na vzdušnou fázi půdního vzorku přetlak v přetlakovém extraktoru. Vodní fáze vzorku je v kontaktu s atmosférickým tlakem prostřednictvím jemně pórovité porézní desky, skrze kterou je půda odváděna (Dane a Hopmans, 2002; Schelle a kol., 2013).

#### 3.8.3 Metoda rosného bodu

Principem metody rosného bodu je dosažení rovnovážného stavu mezi zakřivených povrchem vody v pórech vzorku půdy a vodní páry v prostoru nad vzorkem utěsněném komorou (Gee a kol., 1992). V měřicí komoře WP4C PotentioMeter© (METER ENVIROMENT, USA) se teplota vlhkého vzduchu v rosném bodě měří chlazeným zrcátkem a teplota vzorku infračerveným teploměrem. Tyto dvě hodnoty slouží k výpočtu relativní vlhkosti a dále se pomocí Kelvinovy rovnice vypočítá celkový potenciál půdní vody (Campbell a kol., 2007; Schelle a kol., 2013).

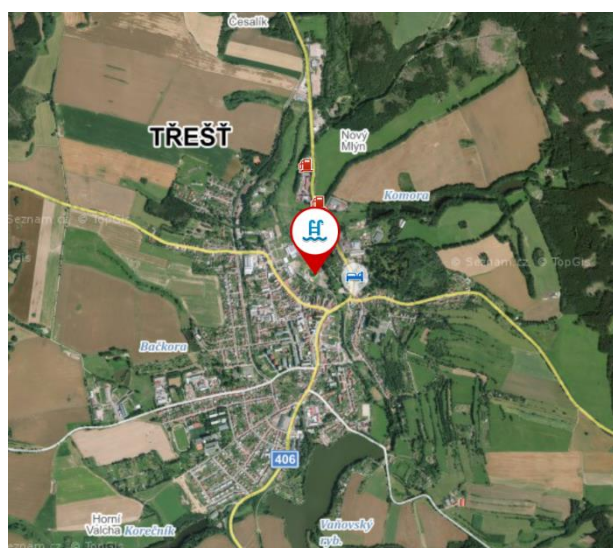
## 4 Praktická část

### 4.1 Popis stanoviště

Zelená střecha, ze které se odebíraly všechny půdní vzorky, se nachází ve městě Třešť ve střední části kraje Vysočina, na západě Moravy. Roční úhrn srážek se zde pohybuje od 500 mm do 800 mm. Nejintenzivnější srážky se objevují v letním období. Průměrný srážkový úhrn je 675,3 mm. Průměrná teplota vzduchu činí 6,6 °C (Bukáček, 2011; Český hydrometeorologický ústav, 2022). Na *obrázcích 12 a 13* jsou letecké snímky dané oblasti.



Obrázek 13: Letecký snímek přírodního koupaliště Malviny s vyznačenou zelenou střechou



Obrázek 12: Letecký snímek obce Třešť

Zelená střecha (obrázek 14) byla postavena v roce 2020 na budově pokladny (obrázek 15) přírodního koupaliště Malviny ve spolupráci s firmou GreenVille service s.r.o. v rámci projektu CAMEB REVOZIM. Je situována v rámci obce spíše na jejím okraji s GPS souřadnicemi: 49,2945069N, 15,824814E. Zelená střecha má půdorysnou plochu 43,9 m<sup>2</sup>, z čehož 20,3 m<sup>2</sup> obsazuje plocha se substrátem komerčního substrátu Optigrün, 13,8 m<sup>2</sup> je vyhrazeno pro testované substráty T1 a T2 a zbylých 9,8 m<sup>2</sup> plochy připadá na kačírkové obsypy. Vegetační souvrství má mocnost 100 mm a skládá se z 25 mm vysoké nopové fólie, na ní leží 10 mm tlustá textilie, na textilií je umístěn substrát a na něm rozchodníkový koberec (diplomová práce Petreje, 2021).



Obrázek 14: Zelená střecha na budově pokladny koupaliště Malviny



Obrázek 15: Budova pokladny přírodního koupaliště Malviny



## 4.2 Střešní substráty

Na střeše se testovaly 3 substráty, a to komerční substrát O (Optigrün), substrát TB s podílem recyklované složky s biouhlem a substrát T s podílem recyklované složky bez biouhlu. Nebyl specifikován přesný typ použitého substrátu Optigrün, nejspíše se ale jedná o extenzivní substrát typu E, v *tabulce 3 a 4* jsou doplněny informace o tomto substrátu (Optigrün international AG, 2013). Substráty TB a T byly namíchány ve stavební míchačce přímo na místě při realizaci. Nejdříve se přidávaly těžší hmoty pro lepší míšení materiálů, jelikož ty lehčí měly tendenci se usazovat na zadní straně míchačky. Substráty s recykláty (*obrázek 12*) vychází z Užitého vzoru 34 637 (Sněhota a kol., 2020).

Složení jednotlivých substrátů je popsáno v *tabulce 3* a doplňující informace v *tabulce 4* (diplomová práce Petreje, 2021):

Tabulka 3: Složení substrátů

Označení substrátu	Složení substrátu
O	expandovaná břidlice, láva, pemza, keramzit, cihlová drť, zelený kompost (poměr není specifikován)
TB	37,5% cihelná drť; 24,5% drcená opuka; 13,4 % expandovaný jíł; 15,1 % rašelina; 9,5 % biouhel
T	37,3 % cihelná drť; 25 % rašelina; 24,4 % drcená opuka; 13,3 % expandovaný jíł

Tabulka 4: Další informace o substrátech

Označení substrátu	MVK	Objemová hmotnost		Množství zadržené vody
		suchá	při MVK	
[-]	[% obj.]	[g/l] = [kg/m <sup>3</sup> ]		[g/l] = [kg/m <sup>3</sup> ]
O	min 35	min 750	max 1450	neuvedeno
TB	41,6	821,9	1238,4	416,5
T	48,2	818,8	1300,4	481,7

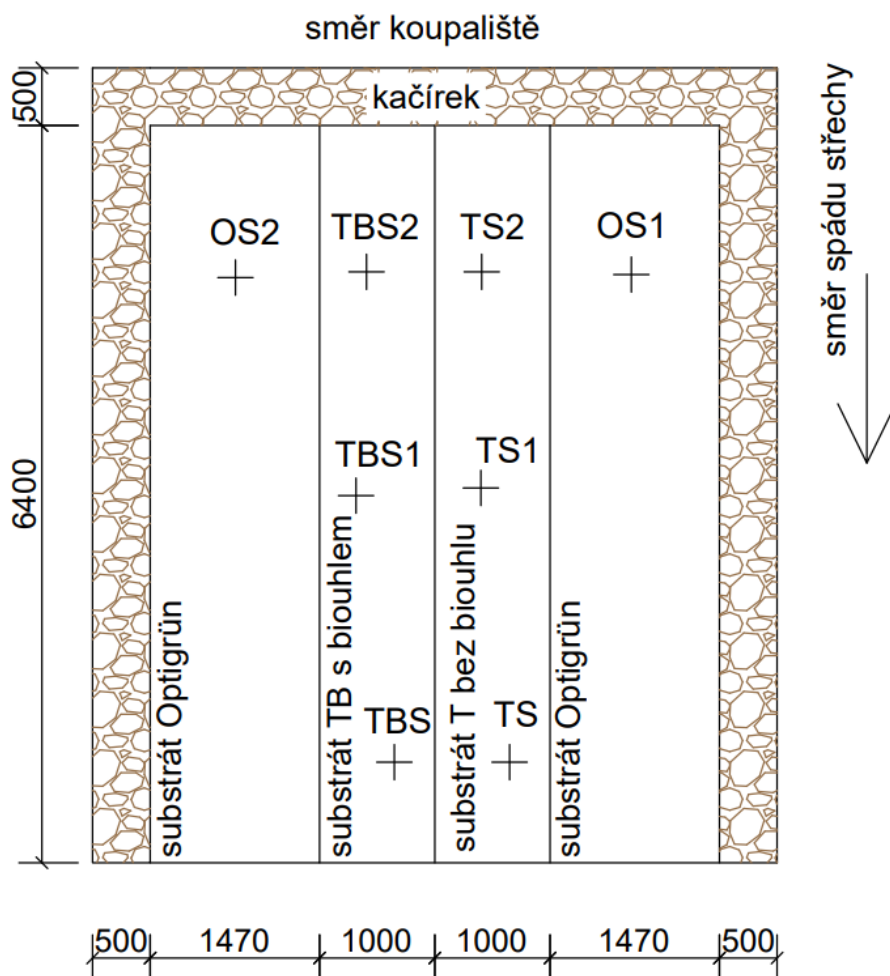


Obrázek 14: Porovnání substrátu T1 a T2

### 4.3 Odběr vzorků

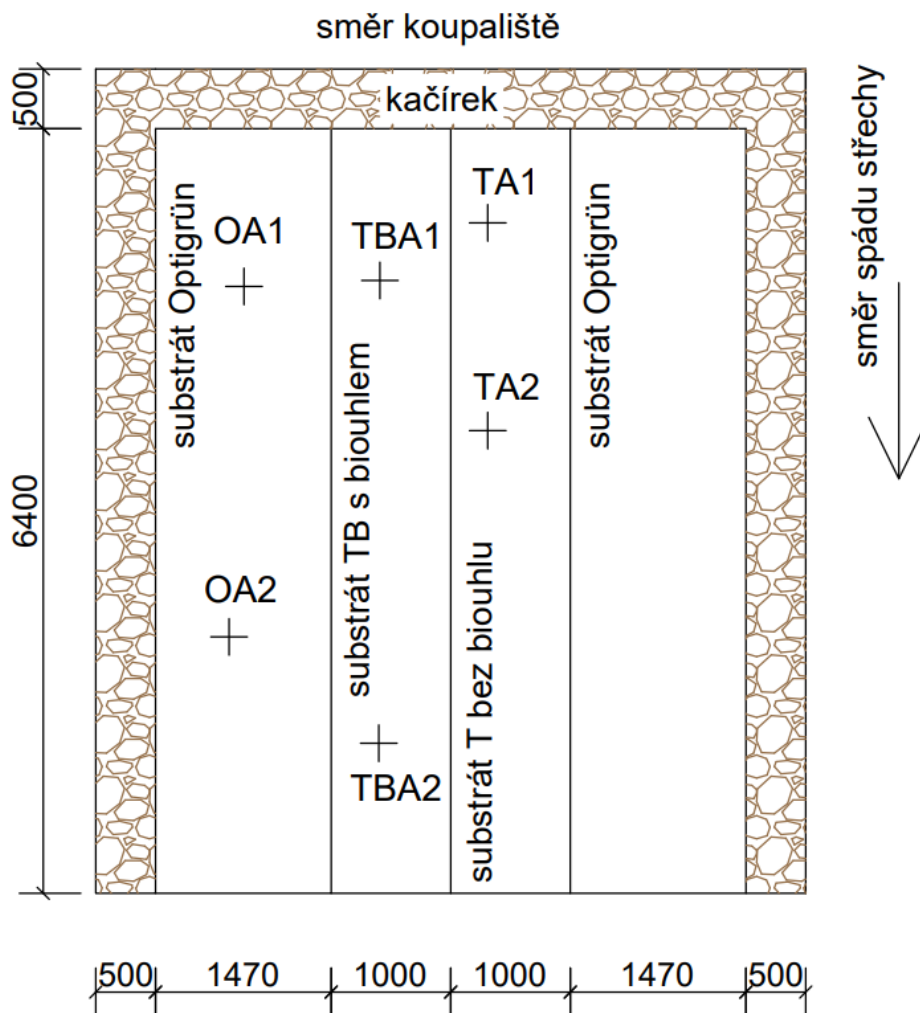
Odběry proběhly tak, že se nejdříve vybrala oblast, ze které se pak odejímal vzorek. Po výběru se nožem rozřízl koberec a odhrnula se jeho část. Do té části se do půdy pomocí kladívka a držadla natlačil kovový váleček. V dalším kroku se váleček společně se substrátem uvnitř něj vyjmul. Přebytečný substrát se nožem „odřízl“. Váleček se z obou stran zajistil plastovými víky. Vzorky se pak daly uschovat do lednice

První odběr byl proveden na jaře roku 2021, odebralo se celkem 8 neporušených vzorků - 2 vzorky komerčního substrátu Optigrün (OS1, OS2), 3 vzorky substrátu TB s podílem recyklované složky s biouhlem a 3 vzorky substrátu T s podílem recyklované složky bez biouhlu. Při laboratorní analýze se využily vzorky TBS1, TBS2, TS1 a TS2. Na *obrázku 17* jsou znázorněna místa jednotlivých odběrů spolu s rozměry celé zelené střechy.



Obrázek 15: Schéma jarního odběru vzorků na zelené střeše

Druhé vyznění vzorků se uskutečnil na začátku října roku 2021. Tentokrát se odebralo pouze 6 neporušených vzorků – 2 vzorky substrátu Optigrün (OA1, OA2), 2 vzorky substrátu TB s podílem recyklované složky (TBA1, TBA2) s biouhlem a 2 vzorky substrátu T s podílem recyklované složky bez biouhlu (TA1, TA2). Kde se vzorky odebíraly lze vidět na obrázku 18.



Obrázek 16: Schéma podzimního odběru vzorků na zelené střeše

Na obrázcích 12, 13, 14 a 15 je zdokumentovaný odběr vzorků z podzimu.



Obrázek 19: Rozřezání koberce



Obrázek 20: Odhrnutý koberec



Obrázek 21: Odebírání vzorku



Obrázek 22: Zelená střecha

## 4.4 Laboratorní analýza substrátů

Na všech 12 vzorcích odebraných jak z jara, tak z podzimu, byly změřeny hodnoty hydraulické vodivosti a retenční čáry půdní vlhkosti. Laboratorní analýza probíhala v laboratořích katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství na Fakultě stavební ČVUT od začátku března do poloviny května roku 2022.

### 4.4.1 Měření nasycené hydraulické vodivosti

K určení nasycené hydraulické vodivosti se použilo zařízení KSAT (METER Group AG, Německo) společnosti METER (METER Group AG, 2017). Princip přístroje je více popsán v části rešerše.

Testovaný substrát v kovovém válečku byl před měřením nejprve umístěn na pórovitou destičku a poté ponořen do vody tak, aby došlo k plnému nasycení vzorku (obrázek 23). Vzorek byl pokaždé sycen minimálně 48 hodin.



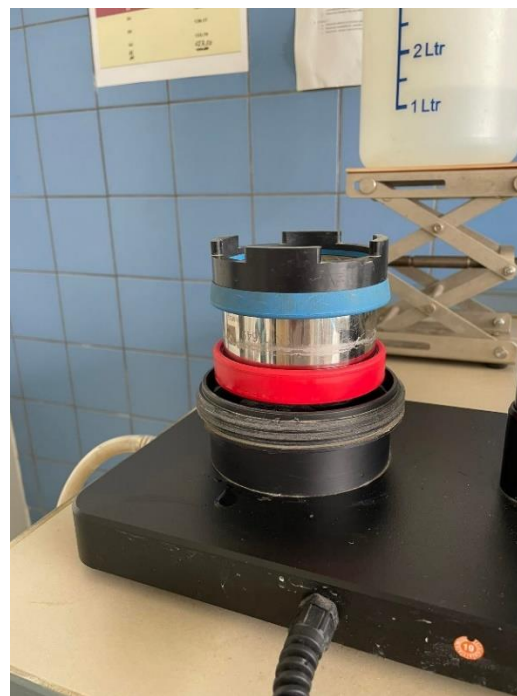
Obrázek 17: Vzorky vložené do vody k nasycení

Celý proces začíná stanovením nulové hladiny na přístroji. Dále se položil nasycený vzorek na měřicí zařízení (obrázek 24). Vrchní část vzorku se zakryla silikonovým víkem s kovovou mřížkou (obrázek 25), skrze kterou pak při měření proudí voda. Celý vzorek je pak upevněn hliníkovým víkem (obrázek 26). Soustava (obrázek 27) je připojená k PC. Před měřením se ještě vzorkem nechala protéct voda tak, aby se na vrchní části vzorku ustálila vrstva vody a skleněný váleček naplnil se vodou.

Měření se spustilo nejdříve na počítači a poté manuálně otevřením kohoutu. Naměřené hodnoty se pak vykreslily v počítačovém programu. Na jednotlivém vzorku se změřila hodnota hydraulické vodivosti třikrát. Z výsledků se pak vypočítala pro každý vzorek průměrná hodnota nasycené hydraulické vodivosti.



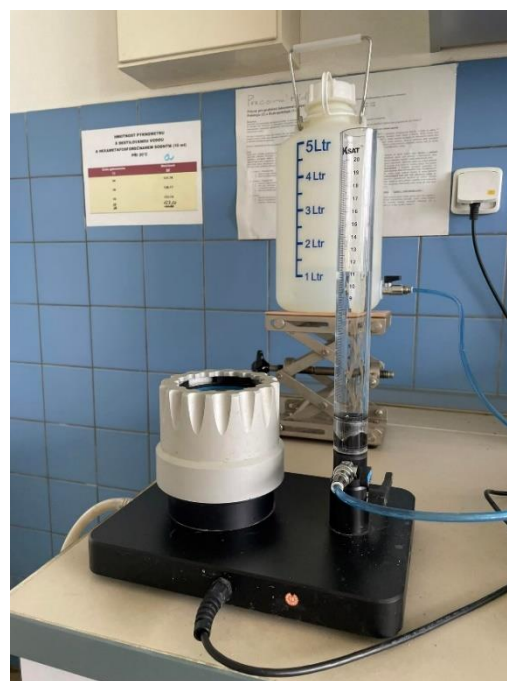
Obrázek 24: Umístění testovaného vzorku na KSAT



Obrázek 25: Zakrytý vzorek plastovým víkem s kovovou mřížkou



Obrázek 26: Testovaný vzorek upevněný hliníkovým víkem



Obrázek 27: Připravený testovaný vzorek k měření

#### 4.4.2 Měření retenčních čar

Ke stanovení retenčních čar byl použit přístroj HYPROP (METER Group AG, USA) společnosti Meter Environment (METER Group, 2017). Sledované veličiny měřicí soustava sama zapisuje do připojeného počítače a za pomoci softwaru HYPROP FIT (Meter Group, 2017) lze pak data vyhodnotit. Princip přístroje je podrobněji popsán v části rešerše.

Neporušené vzorky, které se zkoumaly, nejprve prošly analýzou na přístroji KSAT, poté se při přípravě měření daly opět sytit, než byly umístěny na HYPROP. Před měřením bylo také vždy potřeba připravit přístroj. Stručně je zde popsán postup:

- 1) Nasycení čidel pod tenzometry (obrázek 28) demineralizovanou vodou (tzv. odplyněná voda),
- 2) určení nulové hladiny,
- 3) nasycení tenzometrů demineralizovanou vodou (obrázek 29),
- 4) vložení tenzometrů do HYPROP podstavce (obrázek 30),
- 5) vynulování váhy (na váze se neobjevuje jak měřicí podstavec s tenzometry, tak ani vzorek),
- 6) příprava plně nasycených vzorků na měření – vyvrtání otvorů pro tenzometry do vzorku,
- 7) umístění testovacího vzorku na měřicí podstavec (obrázek 31),
- 8) připojení podstavce s celým měřicím systémem.



Obrázek 19: Nasycení čidel pod tenzometry demineralizovanou vodou (převzato z METER Group AG, 2017)



Obrázek 18: Nasycení tenzometrů demineralizovanou vodou (převzato z METER Group AG, 2017)



Obrázek 30: Vložení tenzometrů do HYPROP podstavce (převzato z METER Group AG, 2017)



Obrázek 31: vložení testovacího vzorku na měřicí podstavec HYPROP (převzato z METER Group AG, 2017)

Po splnění všech výše uvedených kritérií se spustí samotné měření na PC. Do programu se zapíše jedna vstupní hodnota, a to hmotnost kovového válečku. Měření pak probíhá bez nutnosti většího dozoru.

Doba měření se pohybovala od 4 do 6 dnů. Trvání jednotlivých experimentů bylo ovlivněno podmínkami v laboratoři. Při vyšší teplotě v místnosti bylo měření rychlejší kvůli intenzivnějšímu výparu z testovacího substrátu. Také v délce trvání experimentu hrálo roli složení jednotlivých zkoumaných substrátů.

Po skončení celého procesu byl testovaný vzorek vložen do sušárny a byl sušen při 105 °C, po dobu 72 hodin. Zjištěná hmotnosti suchého vzorku se pak použila jako vstupní hodnota pro výpočet objemové vlhkosti.



## 5 Výsledky

### 5.1 Nasycená hydraulická vodivost

Při vyhodnocování nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ) se dospělo k výsledkům znázorněným v *tabulce 5*.

*Tabulka 5: Výsledné hodnoty měření nasycené hydraulické vodivosti*

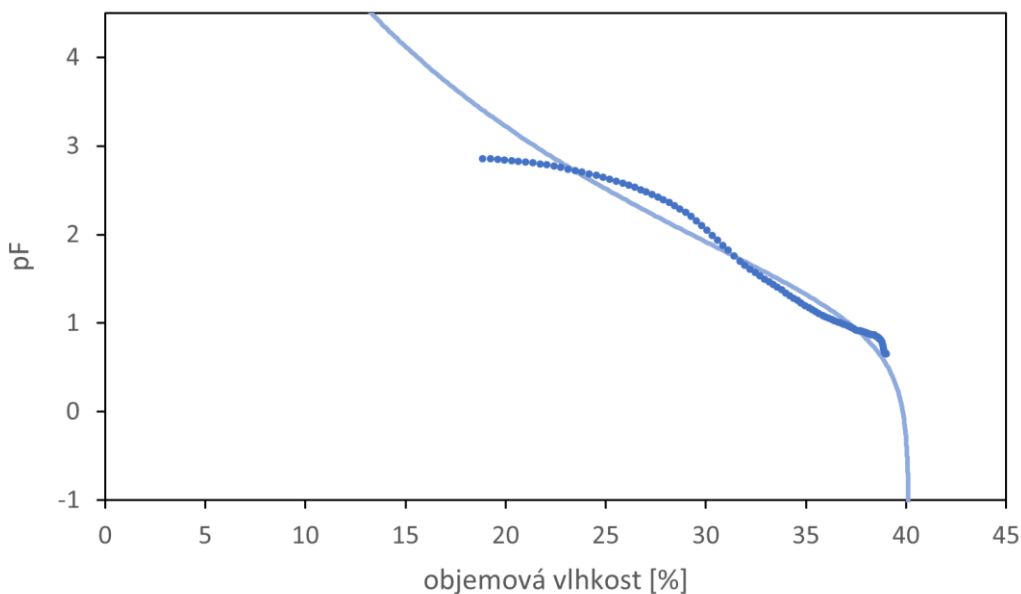
Typ substrátu	Název vzorku	$K_s$ při 25 °C	$K_s$ při 10 °C	Průměrné $K_s$ při 25 °C	Průměrné $K_s$ při 10 °C
[-]	[-]	$\cdot 10^{-3}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\cdot 10^{-3}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\cdot 10^{-3}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\cdot 10^{-3}$ [m.s <sup>-1</sup> ]
Optigrün typu E (O)	OS1	5,88	4,02	7,87	5,38
	OS2	5,17	3,48		
	OA1	14,9	10,3		
	OA2	5,49	3,71		
Substrát TB	TBS1	1,14	0,78	3,12	2,11
	TBS2	4,29	2,88		
	TBA1	3,76	2,56		
	TBA2	3,27	2,21		
Substrát T	TS1	4,53	3,09	4,7	3,2
	TS2	7,32	4,93		
	TA1	4,74	3,26		
	TA2	2,23	1,51		

Z *tabulky 5* lze vyčíst, že největší hydraulická vodivost připadá komerčnímu substrátu O (Optigrün). Nejvyšší hodnota vyšla při měření vzorku OS1, kdy hydraulická vodivost vyšla 14,9 cm.s<sup>-1</sup>. Dále lze vidět, že až na substrát T bez biouhlu vycházejí hodnoty u substrátu odebíraných z podzimu vyšší než u substrátů odebíraných z jara.

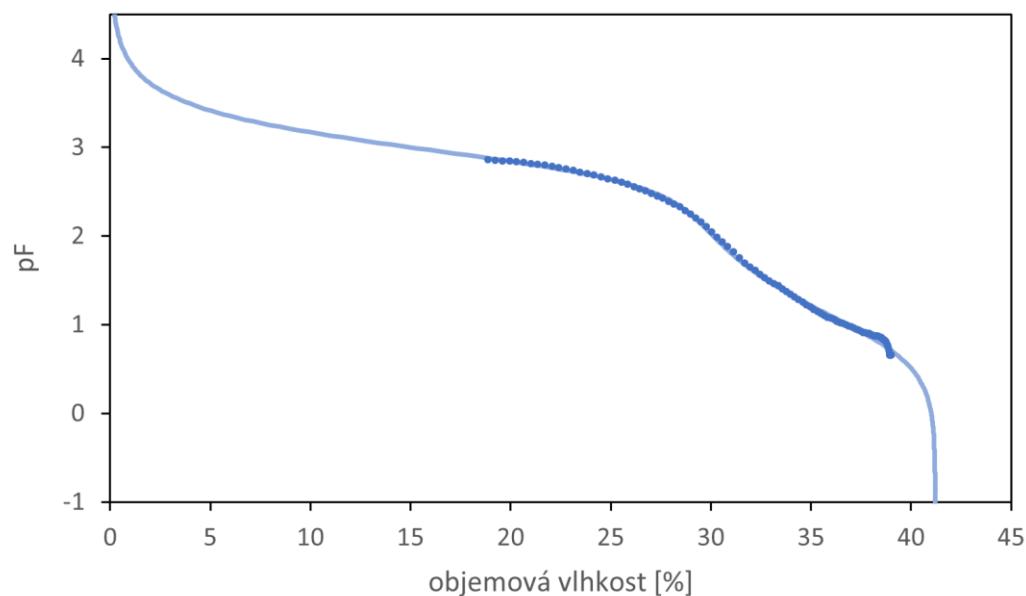
U 2 vzorků bylo obtížné určit jejich hydraulickou vodivost. Byla totiž tak vysoká, že překračovala limity měření (přesné limitní hodnoty nejsou u přístroje uvedeny). Stalo se tak u vzorků odebraných z jara 2021, přesněji u střešních substrátů Optigrün (vzorek OS1) a substrátu T bez biouhlu (vzorek TS2).

## 5.2 Retenční křivky

Vyhodnocení retenčních křivek jednotlivých substrátů probíhalo v softwaru HYPROP FIT. Pro vykreslení retenčních křivek se použil bimodální model podle van Genuchtena. Jednoduchý model vykreslování se nepoužil kvůli nepřilíživému proložení bodů retenční křivkou. Naměřené hodnoty jsou v grafech znázorněny body a vykreslení programem je zobrazeno křivkou. Na *obrázku 32* je vykreslení retenční čáry pomocí jednoduchého modelu a na *obrázku 33* je vykreslení modelem bimodálním.



Obrázek 32: Retenční čára vykreslená podle van Genuchtena – jednoduchý model



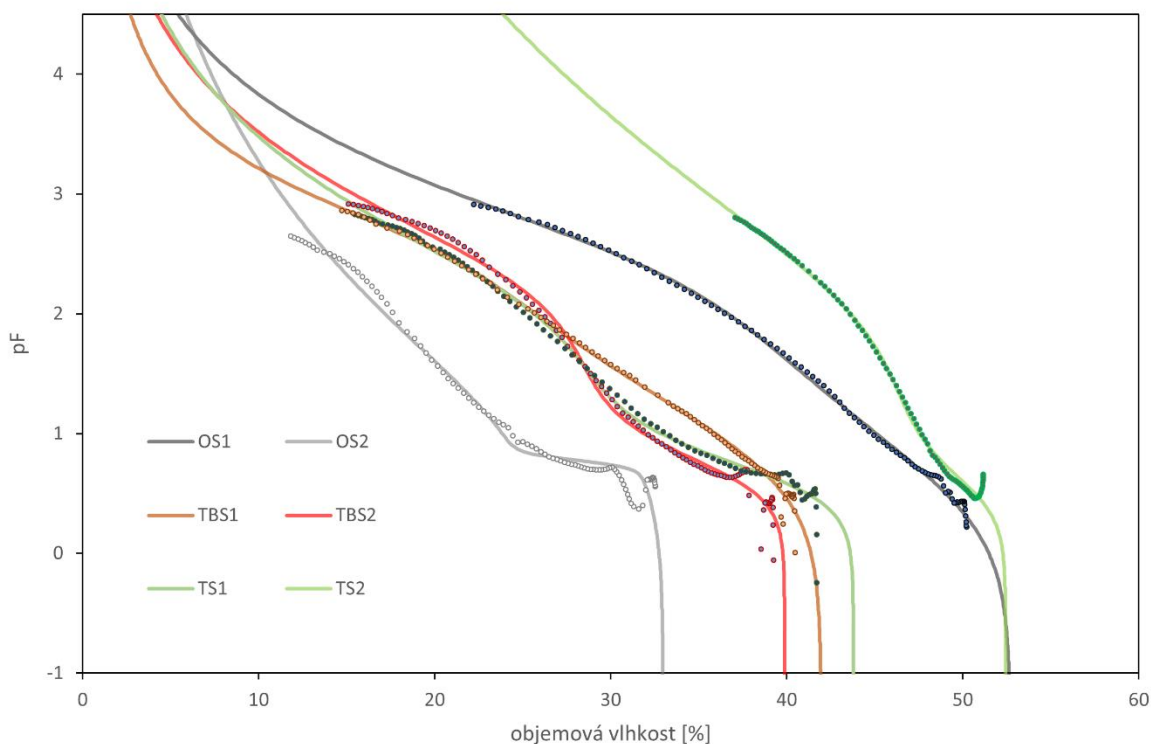
Obrázek 33: Retenční čáry vykreslená podle van Genuchtena – bimodální model

Pro lepší orientaci je níže přehledová *tabulka 6* označení substrátů a s vysvětlivkami.

Tabulka 6: Přehledová tabulka označení testovaných substrátů

Označení	Vysvětlení označení
O	komerční substrát Optigrün extenzivní typu E
TB	substrát s podílem recyklované složky s biouhlem
T	substrát s podílem recyklované složky bez biouhlu
S	vzorky odebírané na jaře
A	vzorky odebírané na podzim

Vykreslení retenčních čar jarních vzorků proběhlo následovně (*obrázek 34*):



Obrázek 20: Vykreslení retenčních čar jarních testovacích substrátů

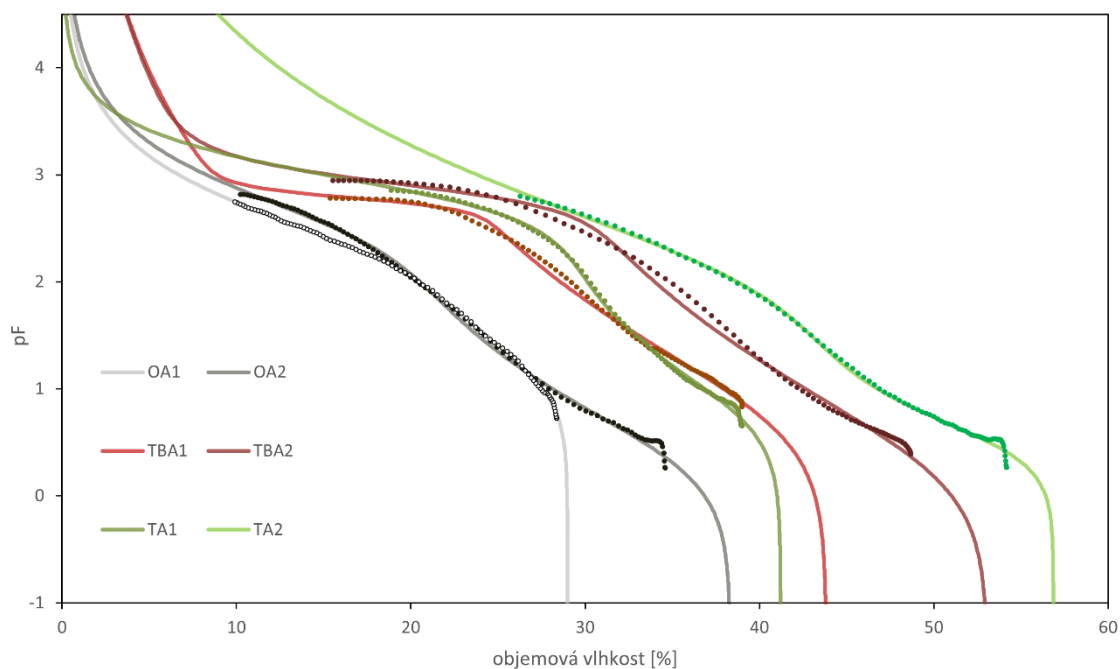
Nejvyšší objemové vlhkosti dosáhly vzorky OS1 a TS2. Vzorek OS1 dosáhl nejvyšší objemové vlhkosti 52,7 % a vzorek TS2 dosáhl skoro stejné hodnoty 52,44 %. Při hodnotě tlakové výšky pF 0,5 se retenční čára OS1 protнула s retenční čárou TS2. Podobných hodnot nabyly vzorky TS1, TBS1 a TBS2. Vzorek TS1 získal hodnotu objemové vlhkosti 43,78 %, vzorek TBS1 41,95 % a vzorek TBS2 39,88 %. Retenční čáry těchto tří vzorků se překřížily v hodnotě pF 1,9. V intervalu pF 1,9 – 2,4 vzorky TBS2 a TS1 mají skoro stejný průběh. V pF 0,8 se opět střetly retenční čáry vzorků TBS1 a TS1. Nejmenší objemové vlhkosti nabyli vzorek OS2 s hodnotou 32,99 %.

V tabulce 7 jsou vypsány van Genuchtenovy parametry pro jednotlivé testované vzorky z jarního odběru.

Tabulka 7: van Genuchtenovy parametry retenčních čar vzorků z jarního odběru

Parametr	Jednotky	Označení vzorku					
		OS1	OS2	TBS1	TBS2	TS1	TS2
$\alpha_1$	[cm <sup>-1</sup> ]	0,373	0,169	0,161	0,200	0,216	0,287
$n_1$	[-]	1,260	15,000	1,290	2,637	2,599	2,566
$\theta_r$	[cm <sup>-3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\theta_s$	[cm <sup>-3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	0,527	0,330	0,419	0,399	0,438	0,524
$\alpha_2$	[cm <sup>-1</sup> ]	0,003	0,093	0,002	0,005	0,007	0,010
$n_2$	[-]	1,476	1,188	1,912	1,384	1,343	1,117
$\omega_2$	[-]	0,544	0,801	0,317	0,720	0,665	0,894

Průběh retenčních čar testovaných vzorků z podzimního odběru je zobrazen na obrázku 35:



Obrázek 21: Vykreslení retenčních čar podzimních testovacích vzorků

Nejvyšší objemové vlhkosti dosáhl vzorek TA2 s hodnotou 56,86 %. Druhou nejvyšší objemovou vlhkost 53,07 % dosáhl vzorek TBA2. Retenční čáry vzorků TA2 a TBA2 se dotkly v pF 2,6. Podobných hodnot objemové vlhkosti nabyly vzorky TBA1 s 43,82 % a TA1 s 41,21 %. Retenční čáry TBA1 a TA1 se protly v pF 1,9. Podobný průběh měly retenční čáry vzorků TBA2 a TA1 na intervalu pF 2,9 – 3,3. Nejmenší hodnoty získaly vzorky OA2 s 38,32 % a OA1 s 28,99 %.

V tabulce 8 jsou vypsány van Genuchtenovy parametry pro jednotlivé testované vzorky z podzimního odběru.

Tabulka 8: van Genuchtenovy parametry vzorků z podzimního odběru

Parametr	Jednotky	Označení vzorku					
		OA1	OA2	TBA1	TBA2	TA1	TA2
$\alpha_1$	[cm <sup>-1</sup> ]	0,005	0,003	0,002	0,500	0,001	0,282
$n_1$	[-]	1,755	1,876	8,465	1,225	2,390	2,190
$\theta_r$	[cm <sup>-3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\theta_s$	[cm <sup>-3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	0,290	0,383	0,438	0,531	0,412	0,569
$\alpha_2$	[cm <sup>-1</sup> ]	0,069	0,396	0,179	0,001	0,141	0,008
$n_2$	[-]	1,872	1,439	1,242	3,974	1,631	1,288
$\omega_2$	[-]	0,279	0,559	0,689	0,387	0,327	0,763

### 5.3 Vodní kapacita dostupná pro rostliny

V tabulce 9 jsou popsány výsledky vodní kapacity dostupné pro rostliny jednotlivých vzorků různých rozsahů.

Tabulka 9: Tabulka vodních kapacit všech testovaných vzorků

Odebírané období	Název vzorku	PAW 33 kPa – 1 500 kPa	Průměrné PAW 33 kPa – 1 500 kPa
[-]	[-]	[%]	[%]
Substrát Optigrün typu E (O)	OS1	22,8	15,7
	OS2	7,1	
	OA1	12,6	
	OA2	14,3	
Substrát TB	TBS1	16,7	19,8
	TBS2	16,0	
	TBA1	20,4	
	TBA2	26,0	
Substrát T	TS1	14,3	18,8
	TS2	13,9	
	TA1	26,3	
	TA2	20,5	

Z tabulky lze vyčíst, že největší vodní kapacitu dostupnou pro rostliny byla naměřena nejvyšší hodnota 26,3 % u vzorku C3 a nejmenší 7,1 % u vzorku A2. Průměrně nejvyšší vodní kapacity nabývají ale vzorky B s hodnotami 19,8 %.

## 6 Diskuse výsledků

Při měření nasycené hydraulické vodivosti vyšly téměř všechny hodnoty testovaných substrátů ve stejném řádu  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Nedošlo k tomu ale ve dvou případech, a to u komerčního substrátu Optigrün typu E (vzorek OA1), kdy hodnota hydraulické vodivosti vyšla o 1 řád vyšší. Dále u substrátu TB (vzorek TBS) obsahující biouhel vyšly hodnoty naopak o 1 řád nižší. Oba jevy se dají logicky vysvětlit. Jelikož je substrát Optigrün více agregátový a neobsahuje příliš organické hmoty, voda jím protéká tedy rychle a není příliš vázána. Substrát TB s příměsí biouhlu nabývá nižších hodnot, protože voda protéká substrátem pomaleji. Způsobeno je to nejspíš schopností biouhlu dobře vyplňovat póry systému. Nejvyšší hydraulická vodivost se naměřila na substrátech Optigrün typu E, další v pořadí je substrát T bez příměsí biouhlu a nejmenší hydraulickou vodivost má substrát TB s příměsí biouhlu. Tyto výsledky nelze porovnat, jelikož výrobci neuvádí žádné informace o nasycené hydraulické vodivosti substrátů.

Retenční čáry stejných substrátů mají výraznou variabilitu. Tato skutečnost může být způsobena několika faktory. Jelikož byly testované substráty v podobě neporušených vzorků. Je možné, že jsou vzorky ovlivněny samotnou instalací zelené střechy, kdy například nemuselo dojít k úplně rovnoměrnému rozložení substrátů, a tak vzorky stejných substrátů obsahují jiné poměry materiálu. Také podzimní vzorky mohly být prorostlé kořeny nebo ovlivněny spádem střechy, časem se mohl substrát posunout po ploše směrem dolů, ale není to příliš pravděpodobné. Dále se měření retenčních čar provádělo na vzorku, který prošel těsně předtím měřením nasycené hydraulické vodivosti na přístroji KSAT, kde mohlo dojít k vyplavení menších složek. Také je možné, že u substrátu Optigrün typu E mohlo dojít k rychlé drenáži při pohybu se vzorkem před spuštěním měření.

Získané retenční křivky jsou podobné retenčním křivkám zjištěnými na malých nahutněných válečcích stejných substrátů pomocí kombinace podtlakové a přetlakové metody (diplomová práce Petreje, 2021). Nasycené vlhkosti se u vzorků z jara pohybovaly od 33,0 % do 52,7 %. Nejmenší nasycenou vlhkost měl substrát OS2 a paradoxně největší vzorek stejného substrátu OS1. U vzorků z podzimu se nasycená vlhkost pohybovala od 29,0 % do 56,9 %. Nejmenší nasycenou vlhkost měl substrát OA1 a největší vzorek substrátu TA2. Největší odchylky se objevily u podzimních vzorků jednotlivých substrátů. Komerční substrát Optigrün má podle dostupných informací mít min. 35 % objemové vlhkosti, při měření vzorku OA1 ale nabylo pouze hodnoty 28,99 %. Substrát TB s příměsí biouhlu by měl dosahovat něco kolem hodnoty 41,6 % objemové vlhkosti, při výzkumu vzorku TBA2 ale vyšla hodnota vysoká 53,07 %. A u substrátu TS2 bez příměsí biouhlu, kdy z dostupných informací by objemová vlhkost měla být kolem 48,2 %, tak u vzorku TA2 dosáhlo až 56,86 %. U mnoha vzorků stejného substrátu odebíraných ze stejného období dochází k velkým rozdílům hodnot objemové vlhkosti jako například u křivek OA1 a OA2, avšak v tlaku kolem polní vodní kapacity (vlhkost při tlaku 330 hPa) je jejich objemová vlhkost téměř totožná, nabývá zde hodnoty kolem 19 %. Podobný případ nastal i u křivek

substrátů TA1 a TA2, kdy se jejich objemová vlhkost liší o 15,65 %, ale jejich polní kapacita dosahuje podobné hodnoty kolem 33 %.

Nulové hodnoty reziduální vlhkosti ( $\theta_r$ ) u všech vzorků jsou způsobené velkou extrapolací bodů retenční čáry. Jelikož nejsou dostupné další body, které by byly doplněné nějakou další metodou (přetlakový aparát, měřič vodního potenciálu), dochází při vyhodnocování k velké nejistotě, a tak zde software HYPROP FIT nastavuje nulovou hodnotu.

U naměřené vodní kapacity dostupné pro rostliny se ukázala nejvyšší hodnota 26,3 % u vzorku (TA1) substrátu T, nejmenší hodnota pak připadá vzorku (OS2) komerčního substrátu Optigrün 7,1 %. I přes nejvyšší naměřenou hodnotu vodní kapacity dostupné pro rostliny u substrátu T, má největší průměrnou hodnotu substrát TB s příměsí biouhlu.

## 7 Závěr

Rešerše přináší širší pohled a vědomosti o zelených střeších a střešních substrátech. Dále poukazuje na možné recyklované materiály, které lze ve substrátech použít. Popisuje několik půdních charakteristik, způsoby jejich laboratorního měření a přístroje používané k určení charakteristik. Některé poznatky z rešerše mohou být užitečné pro budoucí experimenty s měřením stejných půdních charakteristik.

Cílem práce bylo vyhodnotit půdní charakteristiky vzorků substrátů odebraných z experimentální zelené střechy na budově pokladny přírodního Malvínského koupaliště ve městě Třešť na západě Moravy. Přesněji se vyhodnocovaly půdní charakteristiky nasycená hydraulická vodivost, průběh retenčních čar a vodní kapacita dostupná pro rostliny. Měření proběhlo v laboratořích na přístrojích KSAT a HYPROP (METER Group AG, Německo). Byly zkoumány tři typy substrátů. Porovnával se komerční substrát Optigrün typu E s dvěma namíchanými substráty se složkami ze stavebního recyklátu, jeden navíc obsahoval biouhel. Celkem se měřilo 12 vzorků, polovina vzorků byla odebrána na jaře 2021 a polovina na podzim 2021. Jednalo se tedy vždy o 2 vzorky z jara a 2 vzorky z podzimu každého substrátu.

Výsledky nasycené hydraulické vodivosti ukázaly, že největších hodnot dosáhl komerční substrát Optigrün typu E. To je nejspíše způsobeno nízkým obsahem organické složky v substrátu. Naopak nejmenší hodnot nabývá substrát TB s příměsí recyklované složky s biouhlem, nejspíše díky schopnosti biouhlu vyplňovat póry systému.

Vykreslené retenční křivky vykazaly velkou variabilitu. Přesto výsledky ukázaly, že substráty dosahují takových hodnot objemové vlhkosti, jakých by přibližně měly. Nastaly však tři situace, kdy odchylka mezi hodnotami byla dost velká, shodou okolností byly všechny 3 vzorky z podzimního odběru. V případě komerčního substrátu Optigrün typu E se došlo k výrazně nižší hodnotě objemové vlhkosti, než bylo předpokládáno. Naměřená



hodnota objemové vlhkosti vzorku byla o 6,01 % nižší, než je minimální hranice nasycené objemové vlhkosti uvedené dodavatelem substrátu. Dále u substrátu TB s příměsí recyklované složky s biouhlem dosáhla objemová vlhkost o 11,47 % vyšší hodnoty. A objemová vlhkost u substrátu T s příměsí recyklované složky bez biouhlu nabyla hodnoty o 8,66 % více.

Naměřená vodní kapacita dostupná pro rostliny také potvrdila studii [Cao a kol. \(2014\)](#). Průměrně nejvyšších hodnot totiž dosahoval substrát T1 s příměsí biouhlu. Nejnižší hodnoty pak připadaly komerčnímu substrátu Optigreen typu E.

Práce nese poznatky, které bude možné použít při dalších výzkumech. Z praktické části práce plyne několik doporučení pro navazující experimenty. Například by bylo vhodné, aby se měření retenčních čar neprovádělo po měření nasycené hydraulické vodivosti, při nesprávném postupu by mohlo dojít k poškození nebo ke změně složení vzorku. Dále by bylo žádoucí provádět experiment i na zhutněných vzorcích, aby se snížila variabilita změřených charakteristik. U hrubého materiálu by bylo dobré ověřit metodu zvlhčení do nasyceného stavu přímo v aparátu HYPROP, aby ze vzorku neodtekla gravitačně voda při manipulaci. Touto metodou by se dala určit nasycená vlhkost.

## 8 Použitá literatura

Asman, N. S. A., S. Dullah, J. L. Ayog, A. K. Mirasa & H. Djamila. 2016. The Hydrological Performance of Lightweight Green Roofs Made From Recycled Waste Materials As the Drainage Layer. In *International Symposium on Civil and Environmental Engineering (ISCEE)*. Malaysia.

Berndtsson, J. C. (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36, 351-360.

Campbell, G.S., Smith, D.M. & Teare, B.L. 2007. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. In: *Experimental Unsaturated Soil Mechanics* (ed. T. Schanz), pp. 71–77. Springer, New York.

Dane, J.H. & Hopmans, J.W. 2002. Water retention and storage: laboratory. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods* (eds J.H. Dane & G.C. Topp), pp. 675–720. Soil Science Society of America, Madison, WI

Eksi, M., O. Sevgi, S. Akburak, H. Yurtseven & I. Esin (2020) Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. *Ecological Engineering*, 156.

Gee, G.W., Campbell, M.D., Campbell, G.S. & Campbell, J.H. 1992. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1068–1070.

Chen, C. F., S. F. Kang & J. H. Lin (2018) Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. *Ecological Engineering*, 112, 10-20.

Molineux, C. J., C. H. Fentiman & A. C. Gange (2009) Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK. *Ecological Engineering*, 35, 1507-1513.

Molineux, C. J., A. C. Gange, S. P. Connop & D. J. Newport (2015) Using recycled aggregates in green roof substrates for plant diversity. *Ecological Engineering*, 82, 596-604.

Peters, A., and W. Durner. 2006. Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments, *Water Resour. Res.*,42, W11401, doi:10.1029/2006WR004952.

Sněhota, M., Petreje, M., Pavlů, T., Chorazy, T., Raček., J. Užiténý vzor 34 637. Česká republika. Uděleno 2020.

Ye, J., Liu, C., Zhao, Z., Li, Y., Yu, S., 2013. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive green roofs. *Ecol. Eng.* 55, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.012>.

Schindler, U. and Müller, L. (2006): Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169 (5): 623-629.

RUKSHAN, Azoor. <https://www.researchgate.net/> [online]. [cit. 30.3.2022]. Dostupný na WWW: <https://www.researchgate.net/profile/Rukshan-Azoor/publication/334659960/figure/fig3/AS:793496080351234@1566195616780/Schematic-of-the-HYPROP-equipment-assembly-used-for-developing-soil-water-retention.jpg>

Wind, G.P. (1968): Capillary conductivity data estimated by a simple method. p.181–191. In R.E. Rijtema and H. Wassink (ed.) *Water in the Unsaturated Zone: Proc. UNESCO/IASH Symp., Wageningen, the Netherlands.*

Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 24 (1): 1-7

Schindler, U., Durner, W., von Unold, G. and Müller, L. (2010): Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: Extending the measurement range. *Soil Science Society of America Journal* 74 (4): 1071-1083.

H. F. Castleton, V. Stovin, S. B. M. Beck, & J. B. Davison, „Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit“, *Energy and Buildings*, vydání 42, s. 1582–1591, 2010.

Panayiotis, N., Panayiota, T., Ioannis, C., 2003. Soil Amendments Reduce Roof Garden Weight and Influence the Growth Rate of Lantana. *HortScience* 38, 618–622.

Petreje, Marek. 2021. Mokřadně-extenzivní vegetační střecha se substrátem s příměsí recyklovaných materiálů. *České vysoké učení technické v Praze. Praha: autor neznámý, 2021. Diplomová práce.*

Biochar: the next carbon gamechanger. Warner, Erik. 2021. nevedeno: Taking Root, 2021. <https://takingroot.org/>.

Bukáček, Miloš. 2011. Podnebí kraje Vysočina. Poznejme Vysočinu nástroji GIS. [Online] 2011. <https://www.gynome.cz/gisvysociny/index.php?ln=cz&id=3&cat=c&typ=menu>.

Everything You Should Know About Crumb Rubber. Safar, Zalmar. 2021. nevedeno: Blogging hub, 2021. <https://www.cleantechloops.com/>.

Hillel, Daniel. 1998. *Environmental Soil Physics*. 1. London, UK: ACADEMIC PRESS, 1998.

Recyklovaný stavební materiál – nový fenomén? Vaškevič, Štěpán. 2017. 1, 2017, *Zajímej se*, Sv. 1, str. 1.

2020. Sdělení komise evropskému parlamentu, radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů. Brusel: autor neznámý, 2020.

Schelle, H., L. Heise, K. Janicke & W. Durner (2013) Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods. *European Journal of Soil Science*, 64, 814-821.

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2010). Green roofs and roof gardens. In J. Aitkenhead-Peterson, & A. Volder (Eds.), *Urban ecosystems ecology* (pp. 391–412). WI: Agronomy Monographs 55. American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America Madison.

Cao, C. T. N., C. Farrell, P. E. Kristiansen & J. P. Rayner (2014) Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71, 368-374.

Blaustein, L., G. J. Kadas & J. Gurevitch (2016) Integrating ecology into green roof research. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 62, 1-6.

2020. Sdělení orgánů, institucí a jiných subjektů evropské unie. nevedeno: autor Evropská komise

Technický list Optigreen. nevedeno, Sv. 2013, str. 1. —. 2013. nevedeno: Optigrün international AG, 2013. <https://ekrost.cz/>.

Dostal, Pavel. 2021. Zelené střechy v České republice: Zpráva o trhu. 1, místo neznámé: Sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně, 2021, Zelené střechy v České republice, Sv. 1, stránky 1-54.

Kuoppamaki, K. & S. Lehvavirta (2016) Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. *Landscape and Urban Planning*, 152, 39-48.

Mickovski, S. B., K. Buss, B. M. McKenzie & B. Sokmener (2013) Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 61, 706-714.

S. Burian, J. Dostálová, M. Dubský, P. Halama, K. Chaloupka, & J. Komzák, Vegetační souvrství zelených střech - Standardy pro navrhování, provádění a údržbu. Odborná sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně, 2019.

Zeolite. Thazhamon, Dennis Abraham. 2021. nevedeno: *Water conditioning & purification international magazine*, 2021. <https://wcponline.com/>.

2018. Zpráva komise evropskému parlamentu, radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů. Brusel: Evropská komise, 2018

JACKSON, Chris. All You Need to Know About Green Roof Construction. In: *Construction21 international* [online]. nevedeno: nevedeno, 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.construction21.org/data/sources/users/44110/20210708081417-green-roof-construction.jpg>

CLISSITT, Charie. Green Roofs vs Solar Panels. In: The eco experts [online]. neuedeno: neuedeno, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://images.theecoexperts.co.uk/wp-content/uploads/2020/03/green-roof.jpeg>

METER Group AG. Operation Manual HYPROP 2. HYPROP [online]. 2018, 2018, neuedeno(neuedeno), 1-98 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [http://library.metergroup.com/Manuals/18263\\_HYPROP\\_Manual\\_Web.pdf](http://library.metergroup.com/Manuals/18263_HYPROP_Manual_Web.pdf)

METER Group AG. Operation Manual KSAT. KSAT [online]. 2018, neuedeno(neuedeno), 1-46 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [http://manuals.decagon.com/Manuals/UMS/KSAT\\_Manual.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/UMS/KSAT_Manual.pdf)