



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

ANALÝZA METOD MĚŘENÍ VLHKOSTI V SUBSTRÁTECH ZELENÝCH STŘECH

ANALYSIS OF MOISTURE MEASUREMENT METHODS IN GREEN ROOF SUBSTRATES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Skalková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Studentka:	Bc. Markéta Skalková
Vedoucí práce:	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	N0732A260027 Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza metod měření vlhkosti v substrátech zelených střech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zelené střechy (vegetační střechy) jsou střechy pokryté vegetačním souvrstvím s vegetací. Zelené střechy zvyšují podíl zelených ploch zejména ve městech, kde se potýkáme s nedostatkem pozemků určených pro zatravněné plochy, parky, zahrady atd. Mezi hlavní výhody zelených střech lze zařadit redukci přehřívání konstrukcí zejména v horkých letních dnech, zvyšování vlhkosti v blízkém okolí, zadrž přirozených vodních srážek, snižování koncentrace CO₂ v ovzduší a v neposlední řadě se jedná také o estetickou funkci. Diplomová práce bude zaměřena na metody stanovování vlhkosti v substrátech zelených střech.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Aby zelená střecha plnila všechny požadované funkce, je třeba zvolit vhodnou skladbu a tuto realizovat v požadované kvalitě. Jedním z předpokladů úspěšného růstu vegetace je vhodné složení substrátu zachovávajícího potřebnou vlhkost, a právě na metody stanovování vlhkosti v substrátech zelených střech bude zaměřena tato DP. V práci proveďte:

1. Za použití tuzemské a zahraniční odborné literatury zpracujte rešerši zaměřenou na skladbu konstrukcí zelených střech.
2. V rámci rešeršní práce popište možnosti měření vlhkosti zemin a možnosti využití pro stanovení vlhkosti substrátů používaných pro zelené střechy.
3. Vyberte vhodné metody, případně navrhnete vlastní postupy a tyto ověřte jak v laboratorních podmínkách, tak na modelech vybraných zelených střech.
4. Dosažené výsledky vyhodnoťte formou tabulek a grafů.
5. Proveďte analýzu dosažených výsledků a vyvoďte závěry týkající se vhodnosti použití navržených postupů pro vegetační střechy.

Rozsah práce 60–80 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- [1] Giacomello, E. Green Roofs, Facades, and Vegetative Systems: Safety Aspects in the Standards analyses codes, 1st ed: Elsevier, 2021, ISBN 978-0-12-817694-8.
- [2] Abdalla, E., M., H. et al. Towards improving the calibration practice of conceptual hydrological models of extensive green roofs, *Journal of Hydrology*, 607 (2022).
- [3] Werdin, J. et al. Biochar particle size and amendment rate are more important for water retention and weight of green roof substrates than differences in feedstock type, *Ecological Engineering* 171 (2021).
- [4] Burian, S. et al. Vegetační souvrství zelených střech – standardy pro navrhování, provádění a údržbu, Svaz zakládání a údržby zeleně, Brno 2019.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2022

L. S.

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou zelených střech a způsoby měření vlhkosti ve střešních substrátech. Studuje vlastnosti zemin, zejména pak ty, které mohou mít vliv na vlhkost, dále pak druhy vod, které se v zeminách mohou nacházet. Popisuje nejběžněji užívané metody stanovení vlhkosti v půdách a posuzuje vhodnost jejich použití ve střešních substrátech. Stanovuje potenciál praktického využití zvolených metod a navrhuje další postup výzkumu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zelená střecha, fyzikální vlastnosti zemin, druhy vod v zeminách, metody stanovení vlhkosti půdy, odporový princip měření vlhkosti, kapacitní metoda měření vlhkosti, ultrazvuková metoda měření vlhkosti.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of measuring soil humidity in the green roofs. It studies the soil properties, especially those influencing the humidity, and also types of water present in soils. The work describes the most frequently used methods of soil humidity determination and examines their suitability in the green roof substrates. It also determines the potential for practical use of the chosen methods and suggests further progress of the research.

KEYWORDS

Green roof, physical properties of soils, types of water in soils, methods of soil humidity determination, resistance principle of humidity measurement, capacitive method of humidity measurement, ultrasonic method of humidity measurement.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKALKOVÁ, Markéta. *Analýza metod měření vlhkosti v substrátech zelených střech*. Brno, 2023. 74 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci s názvem *Analýza metod měření vlhkosti v substrátech zelených střech* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 01. 2023

.....

Bc. Markéta Skalková

PODĚKOVÁNÍ

Největší poděkování náleží mé setře a její partnerce a především mým rodičům za celoživotní všestrannou oporu. Velké díky také patří mému příteli, Ing. Davidu Foldynovi, především za ohromnou, nikdy nekončící a velice potřebnou psychickou podporu. Dále bych chtěla poděkovat paní doc. Ing. Nikol Žížkové Ph.D., za profesionální vedení při tvorbě mé práce a paní doc. Ing. Janě Pařílkové CSc., za její doporučení, vstřícnost a cenné rady jak v oblasti vědeckých poznatků, tak praktických zkušeností. V neposlední řadě bych touto cestou ráda poděkovala také Martinu Veselému za oporu při realizaci laboratorních experimentálních měření a zaměstnancům experimentálního centra DERIC za poskytnutí možnosti provádění experimentální činnosti na modelech zelených střech.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	3
3	ZELENÉ STŘECHY	4
3.1	Vlhkost substrátu zelených střech	5
3.1	Podpora výstavby zelených střech	6
4	VLHKOST ZEMIN A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZEMIN	7
4.1	Základní vlastnosti zemin	7
4.1.1	Fyzikální a indexové vlastnosti	7
4.1.2	Další vybrané vlastnosti zemin.....	11
4.2	Druhy vody v zemině	11
4.2.1	Voda v kapalném skupenství.....	11
4.2.2	Vodní pára a led	12
5	METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI	14
5.1	Přímé metody stanovení vlhkosti	14
5.1.1	Gravimetrická metoda	14
5.1.2	Pyknometrická metoda.....	15
5.2	Nepřímé metody stanovení vlhkosti	15
5.2.1	Tenzometrické měření.....	16
5.2.2	Sádrové bločky	18
5.2.3	GMS – Granular Matrix Sensor (senzory s granulární matricí)	18
5.2.4	Gamaskopická metoda	19
5.2.5	Neutronová sonda	20
5.2.6	Kapacitní metoda	21
5.2.7	TDR (Time Domain Reflectometry) – metoda pulsní reflektometrie	22
5.2.8	TDT (Time Domain Transmission) – Měření přenosu v časové oblasti ...	22
5.2.9	Metoda fázového posunu.....	23
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
6.1	Střešní substráty	24

6.1.1	Stanovení charakteristik střešních substrátů.....	25
6.2	Diskuse vhodnosti komerčně užívaných metod měření vlhkosti pro stanovení v substrátech zelených střech	31
6.2.1	Vhodnost metod.....	31
6.2.2	Alternativní metoda stanovení vlhkosti střešních substrátů	32
6.3	Zařízení pro experimentální měření	34
6.3.1	Vybrané měřicí metody a zařízení.....	34
6.3.2	Kalibrace jednotlivých zařízení.....	41
6.4	Experimentální měření na konstrukci zelených střech	52
6.4.1	Měření vlhkosti ve střešních substrátech na modelech experimentálních zelených střech	53
6.5	Vyhodnocení	61
6.5.1	Diskuse dosažených výsledků	61
6.5.2	Návrh dalšího výzkumu	63
7	ZÁVĚR.....	65
	BIBLIOGRAFIE	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	72
	SEZNAM TABULEK	74

1 ÚVOD

Žádná živá bytost nemůže existovat bez vody a stejně tak rostliny, přičemž jejich spotřeba vody je v porovnání s člověkem, vzhledem k jejich vzájemnému poměru, mnohem vyšší. Na vytvoření jednoho gramu rostlinné sušiny se spotřebuje 300–2000 g vody [1]. Vodu rostliny přijímají svým kořenovým systémem z půdy, přivádí ji do všech částí a 95 % z celkového přijatého množství vody opět odevzdávají do atmosféry. Právě přijímání vody z půdy je pro rostliny jediným přímým zdrojem, a proto zabezpečení rostliny vláhou přímo závisí na obsahu vody v půdě. Obsah vody v půdě se především s atmosférickými srážkami (vodní kapky, krystalky nebo oboje) zvyšuje a při vysokých teplotách, intenzivním proudění vzduchu či při spotřebovávání rostlinami zase snižuje.

Vlhkost půdy má vliv nejen na růst, příjem živin a látkovou výměnu kořenového systému, ale také na aktivitu půdních živočichů a mikroorganismů a dokonce hraje důležitou roli při tvorbě půdy, jelikož se účastní mnoha procesů souvisejícími s přeměnami půdního materiálu [2]. Stanovení půdní vlhkosti je proto velice důležité pro optimalizaci zemědělského průmyslu při obhospodařování pěstebních ploch.

Rostliny na zelené střeše plní většinu funkcí, které jsou na ni kladeny, jako například zdržování srážek a tím menší odtok vody ze střechy do kanalizace, pohlcování slunečního záření, tepelně a akusticky izolační vlastnosti atd. Proto je vhodné, aby rostlinná vrstva zelené střechy byla hustá a v dobrém stavu, což zajišťuje především dostatečné množství vody ve střešním substrátu. Monitorování vlhkosti střešního substrátu může pomoci určit suchá období, kdy je potřeba dodat na zelenou střechu vláhu nebo naopak, například v období dlouhodobých nebo silných dešťů, rostliny nezalévat kvůli podmáčení.

Měření vlhkosti na zelených střeších s sebou ovšem nese mnoho komplikací. Střechy jsou vystaveny všem povětrnostním vlivům, proti kterým musí být odolné. Ať už se jedná o vysoké teploty v létě, či mráz v zimě apod. Současné komerčně dostupné sondy pro měření vlhkosti ve většině případů neumožňují sběr a ukládání měřených dat, proto je potřeba data transportovat do zařízení, které tuto funkci mají, což většinou probíhá přes různé kabely, které jsou taktéž celoročně vystaveny přirozenému okolnímu prostředí konstrukce střech. Nejvíce omezující komplikací stanovení vlhkosti ve střešních substrátech je výška samotného substrátu, která ve většině případů dosahuje hodnot 0,05 m až 0,15 m, což je pro většinu přístrojů, užívaných například pro stanovení vlhkosti v zemědělských půdách, v lesním podrostu, na návětrných stranách hrází apod., příliš malý prostor. Některé měřicí systémy nevyhoví svými rozměry, neboť jejich sondy jsou delší, než výška substrátu a měřené hodnoty by tak byly ovlivněny vzdušnou vlhkostí nebo konstrukčními prvky zelených střech. Další nevyhoví z hlediska měřicího rozsahu, kdy měří vlhkost například až v řádech desítek procent, což je pro střešní substráty nedostačující. Nebo nejsou do substrátu vhodné z hlediska fyzikálně chemického – salinita, pH, tepelná a elektrická vodivost, tvrdost, teplota tání apod. Tato práce se proto zabývá především posouzením jednotlivých komerčně užívaných metod měření vlhkosti v zeminách a jejich možnou aplikací v substrátech zelených střech.

Předložená diplomová práce má teoreticko-empirický charakter s přesahem do několika vědních oborů (stavebnictví, zemědělství, pedologie, hydropedologie, elektrotechnika a další). Z uvedeného důvodu bylo poměrně obtížné sjednotit terminologii užívanou v jednotlivých oborech. Nejvýrazněji se snaha o sjednocení terminologie profilovala u pojmenování použitého zkoumaného materiálu, kde v případě zelených střech je označován jako substrát a lze jej chápat jako prostředí (včetně zeminy), ve kterém žijí organismy. Zemina

je termín používáný v inženýrsko-geologické klasifikaci hornin a nazývají se tak nezpevněné horniny soudržné (jíly), nesoudržné (písek, štěrk), organické (rašelina) a umělé (skládky, navážky atd.). Z inženýrského a stavebního hlediska jsou posuzovány především mechanické vlastnosti zemín (únosnost, zrnitost, plasticita, tvar zrn, atd.). V oboru pedologie je pevná složka vzniklá rozpadem a rozkladem hornin nazývaná půda, přičemž se do této složky zpravidla zahrnuje organická neživá (humus) i živá složka (edafon). Vzniká pod vlivem času a je produktem přeměn minerálních a organických látek a zaniká procesem eroze. Vždy se však jedná o posouzení nezpevněného materiálu s různým zastoupením pevné, kapalné i plynné složky, jejichž vzájemné reakce probíhají odlišně v čase a prostoru a předurčují fyzikální a chemické vlastnosti zkoumaného materiálu. V tomto pojetí jsou termíny substrát, zemina a půda použity v diplomové práci.

Na základě provedeného rešeršního průzkumu tuzemské i zahraniční literatury se diplomová práce zabývá posouzením vhodnosti (z hlediska konstrukčního, principu měření, citlivosti vzhledem k měřené veličině, uvažováno není hledisko dostupnosti ani ekonomické) nalezených komerčně užívaných měřicích systémů a metod měření vlhkosti v zemínách (zemědělské půdy, lesní porosty, zemní hráze, komposty, atd.) a jejich možnou aplikaci v substrátech zelených střech. Na základě teoretických zjištění byla realizována praktická část řešení, která byla soustředěna na volbu měřicí metody, návrh postupu měření s ohledem na měřený substrát a konstrukci zelených střech a jejich ověření v laboratorních podmínkách i na vybraných modelech zelených střech.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je stručně popsat funkci zelených střech s ohledem na význam měření vlhkosti střešních substrátů pro růst osázené vegetace. Je zřejmé, že střešní substráty představují z hlediska měření složitě třífázové prostředí proměnné v čase a prostoru, které se obecně skládá z pevných částic, vody a vzduchových mezer. Vlhkost střešních substrátů je ovlivněna především jejich:

- Strukturní soudržností;
- Obsahem jednotlivých prvků (v návaznosti na inženýrsko-geologickou klasifikaci zemin a mechaniku zemin je možno konstatovat, že nejčastěji bývá zastoupen křemík-hliník-uhlík-vápník);
- A zastoupením vody v jejich rozdílných formách (obalová, volná, vázaná) a skupenství (pevné – led, ledové krystaly, kapalné a plynné – vodní pára, aerosol).

Hlavním cílem práce bylo na základě teoretického rozboru navrhnout vhodné metody stanovení vlhkosti v substrátech zelených střech, u navržených metod zvolit přístroje vhodné pro měření vlhkosti ve střešních substrátech a následně experimentálním měřením v laboratorních podmínkách a na vybraných modelech zelených střech jejich vhodnost ověřit. Poměrně výrazné omezení práce představovalo hledisko časové a dostupnosti měřicích systémů. Jednotlivé metody budou posuzovány především podle splnění podmínek na měření v malých hloubkách, vzhledem k výšce substrátů a také vzhledem k možnosti dlouhodobého monitorování vlhkosti. Při experimentálním měření v laboratorních podmínkách bylo zpracováno několik vybraných vzorků střešních substrátů, v terénu bylo měření provedeno přímo na zvoleném modelu konstrukce zelených střech.

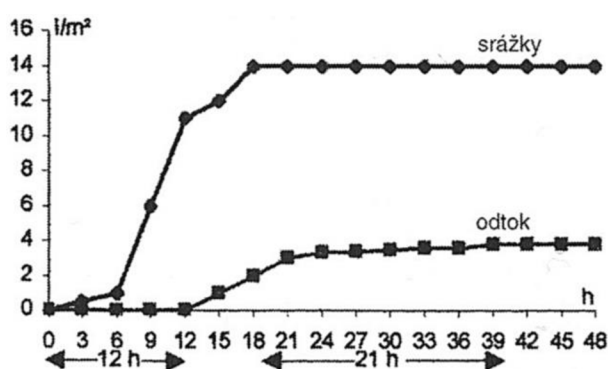
Praktickým cílem experimentální práce je jak ověření vhodnosti užití zvolených metod a přístrojů, tak navržení dalšího postupu se záměrem vytvoření měřicích čidel pro dlouhodobé monitorování vlhkosti střešních substrátů.

3 ZELENÉ STŘECHY

Zelená střecha představuje technologický systém, na kterém je záměrně pěstována vegetace. Kromě samotné vegetace zahrnuje pěstební substrát, drenážní vrstvu, různé druhy izolace (proti prorůstání kořínků, tepelnou, hydroizolaci atd.), nosnou konstrukci a případně další vrstvy jako například systém zavlažování. Vegetace, substrát a popřípadě závlaha představují tzv. živou část střechy, která se vyznačuje proměnlivým a adaptabilním chováním souvisejícím s klimatem a mikroklimatem a jejich faktory, kterými jsou kupříkladu vystavení slunci, souhrn srážek, vzdušné víry, ale také možné onemocnění rostlin a další [3]. V posledních dvou desetiletích se celosvětově dostalo vegetativním systémům velké pozornosti, díky čemuž i technologie střech byla značně vylepšena, vznikly například modulární a biodiverzní zelené střechy nebo zeleninové střešní zahrady, hnědé střechy a dokonce extrémně lehké zelené střechy. Aplikace vegetativních systémů na budovy se stala populární především díky uznání jak ze strany uživatelů budov, tak developerů, kteří budovy vlastní a zajišťují jejich provoz. Pozitivní ohlasy dnes získávají i v rámci široké veřejnosti.

Expanze zelených střech vyvolala otázky ohledně jejich bezpečnosti. Od počátku 80. let minulého století se nejčastěji jako referenční dokument užívají německé směrnice FLL-Green Roofs Guidelines¹, které zahrnují požadavky na navrhování, aplikaci a údržbu zeleně [3]. V několika státech vznikly nové normy, předpisy směrnice a městské předpisy podobného charakteru, které byly publikovány v celosvětovém měřítku. Vzhledem k tomu dnes vybudování konstrukce zelených střech nabízí většina stavebních firem.

Zelená střecha má mnoho předností, které především v dnešní době, kdy se lidstvo soustředí zejména na ekologickou situaci na Zemi, přinášejí znatelné zlepšení. Mezi výhody zelených střech patří snížení podílu dlážděných ploch, zadržení většiny přirozených srážek (viz. Obrázek 1) a jejich následné uvolnění v prostředí měst, spotřeba oxidu uhličitého a produkce kyslíku, zachycování prachu a zabránění jeho víření, ochrana vnitřních prostorů před přehříváním v létě a naopak snížení energetických nároků stavby v zimě, zvuková izolace, protipožární ochrana, úsporné zacházení s půdou, vytvoření přirozeného prostředí nejen pro ohrožené druhy hmyzu a drobných živočichů, poskytování psychického pohodlí obyvatel a další.



Obrázek 1: Množství srážek a odtoku vody u šikmé zelené střechy po osmnáctihodinovém vytrvalém dešti [4].

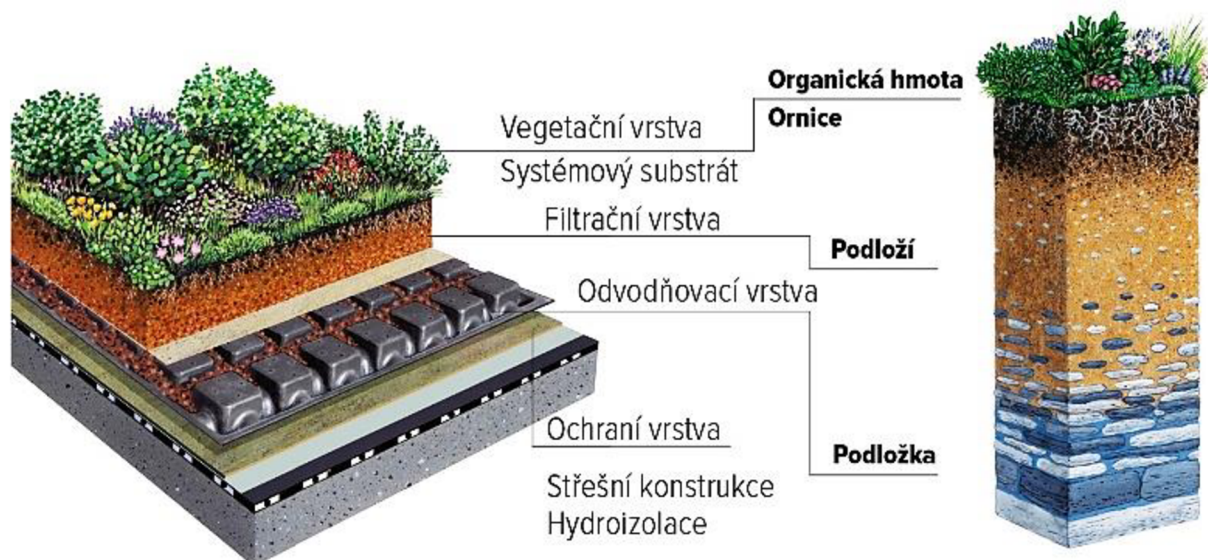
Dnes již více jak polovina světové populace žije v městských oblastech a města se stále rozrůstají a zvyšuje se i hustota obyvatel v nich. Tímto způsobem je ovšem zabírána zeleň a toto „zahuštění“ ještě více přispívá k některým environmentálním problémům. Téměř všechny tyto městské syndromy lze alespoň částečně kompenzovat vytvořením vegetačních oblastí ve městech. Jestliže výstavba některé z budov zabere místo přirozeného zeleného

pokryvu, pak vytvoření zelené střechy je nejjednodušší způsob kompenzace dané vegetační plochy.

3.1 VLHKOST SUBSTRÁTU ZELENÝCH STŘECH

Rozvoj měst mění ráz krajiny a s lehkou nadsázkou lze říci, že zelené plochy mění na nepropustný, většinou betonový povrch. Vznik a v dnešní době především rozšiřování velkých měst inhibuje přirozené procesy v hydrologickém cyklu. Pokud je voda nepřírodně zadržována například v umělých nádržích, ve městech vznikají tepelné ostrovy a zbytečně se spotřebovává energie na chlazení vnitřních prostorů. Studie prováděná na National Central University v Taiwanu v dubnu roku 2021, zabývající se vlivem meteorologických vlivů a vlhkosti substrátu na evapotranspiraci a tepelné vlastnosti zelené střechy [5] dokazuje, že zelená střecha řeší problémy městských tepelných ostrovů. Snižuje průměrné letní teploty v hustě osídlených prostorech a v důsledku toho šetří energii na ochlazování budov. Míra takového vlivu je závislá především na meteorologických podmínkách, například na slunečním záření a cirkulaci větru a také na stavu zelených střech, zvláště pak na výšce substrátu a listové ploše rostlin na střeše. V důsledku těchto a dalších vlastností a charakteristik zelené střechy více či méně zadržují vodu v substrátu a tím napomáhají zabránění přetížení kanalizací ve městech. Ve studii byl sledován také vliv vlhkosti na tepelné ztráty budovy. Závěry studie prokázaly, že substrát s vyšší vlhkostí vede teplo lépe a v důsledku toho jsou tepelné ztráty vyšší.

Měření obsahu vody, tedy vlhkosti, v pěstebních substrátech může poskytovat informace o hydroakumulačních a drenážních vlastnostech souvrství. Pravidelné zavlažování vyžadují pouze intenzivně ozeleněné střešní systémy, ale měření vlhkosti lze využít i v případě extenzivně ozeleněných střech, zejména pokud jejich vegetace zahrnuje druhy rostlin se specifickými požadavky na množství vody obsažené v substrátu.



Obrázek 2: Vyobrazení shodné povahy jednotlivých vrstev zelené střechy a půd nacházejících se v přírodě [6].

3.1 PODPORA VÝSTAVBY ZELENÝCH STŘECH

V průběhu 19. století došlo k nárůstu počtu zelených střech a to zejména po roce 1867, kdy byl patentován železobeton, díky kterému se vyřešila otázka vysoké hmotnosti zelených střech. A již v průběhu 20. století počaly v některých zemích vznikat dotační programy pro podporu jejich výstavby.

V Německu počátkem 21. století vznikl v rámci ochrany životního prostředí program podpory s názvem 1.000 grüne Dächer (1 000 zelených střech), v rámci kterého obyvatelé Berlína mohou při výstavbě zelené střechy získat dotaci až ve výši 75 % z nákladů a dokonce až 100 % u inovativních a experimentálních projektů [7].

Nizozemsko koncem roku 2021 vytvořilo program podpory pro výstavbu zelených střech. Dotace je určena pro vlastníky domu nebo nemovitosti, jako je například obchod nebo škola a také pro vlastníky bytové společnosti a pro sdružení vlastníků domů. O tuto dotaci mohou obyvatelé žádat až do konce března 2023, ale k dispozici je rozpočet 300 000 eur (asi 7 250 000,- Kč), po jehož vyčerpání již nelze o dotaci požádat a v rámci projektu lze zažádat až o 50 % ze stavebních nákladů [8].

V České republice již od počátku 21. století také vznikaly různé programy a granty pro podporu výstavby zelených střech. V roce 2021 v rámci Národního programu Životní prostředí vznikl Národní dotační program s názvem Nová zelená úsporám 2021+. Dotace v rámci tohoto programu lze využít jak při rekonstrukci střechy, tak při výstavbě nové zelené střechy a mohou o ni zažádat jak vlastníci bytových domů nebo jednotek, tak vlastníci rodinných domů. Výše dotačních financí může v některých případech činit až 100 % celkových výdajů, na program je vyčleněno 1,754 mld. Kč a projekt je nutné realizovat do konce června roku 2025 [9].

Dotační programy pro tvorbu zelených střech nevytváří jen státy, ale také obce, zejména různé metropole. Například Brno vytvořilo již několik programů týkajících se tohoto tématu, navíc také pravidelně pořádá semináře o zelených střechách a dokonce festivaly zelených střech a v roce 2020 byla dokonce vyhlášena soutěž s názvem Zelená střecha roku. Soutěž se vzhledem k velké účasti opakuje každoročně. Na Obrázku 3 je fotografie zelené střechy, která toto ocenění získala v roce 2022.



Obrázek 3: Zelená střecha v ZOO Praha, výherce soutěže Zelená střecha roku 2022 [10].

Město Brno v roce 2021 nabízelo v rámci dotačních programů ‚Zeleň střechám‘ a ‚Nachytej dešťovku‘ finanční podporu až v hodnotě 1400,- Kč na m² zelené střechy. V rámci těchto dvou programů je možné získat dotaci i v tomto roce při podání žádosti do 31. 10. 2023. Podpora od Státního fondu životního prostředí v rámci projektu činí 50 % z výše poskytnutých financí [11].

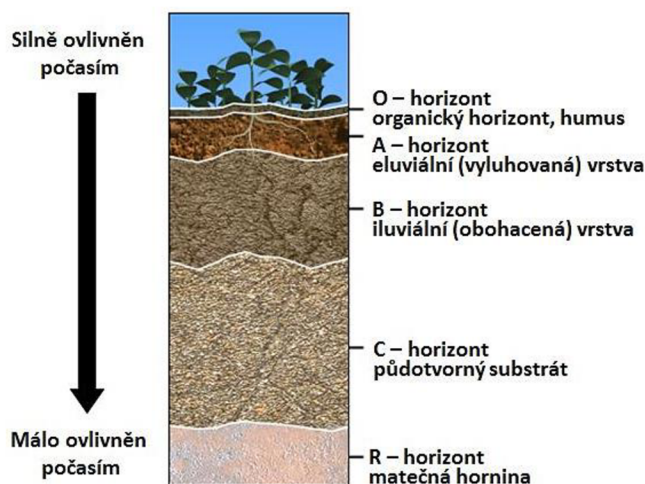
4 VLHKOST ZEMIN A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZEMIN

Zemina na zelené střeše, stejně jako zemina v přírodě, prakticky nemůže dosahovat nulové vlhkosti, jedná se tedy o trvalou složku půdy. Množství vody v ní je proměnlivé v čase a ovlivňují jej především meteorologické a pedologické faktory. Právě z pedologického hlediska se vlhkostí půdy rozumí ty nejvýznamnější vlhkostní charakteristiky, kterými jsou polní vodní kapacita (ta je definována jako obsah vody ve vzorku stanovený při tlaku od 10 do 50 kPa) [12], bod vadnutí (udává vlhkost půdy, kdy jsou rostliny vystaveny trvalému nedostatku vody a v důsledku toho následně vadnou) atd. [13]. Zatímco z hlediska agrometeorologického se termínem vlhkost půdy vyjadřuje obsah vody v půdě, ať už objemově či hmotnostně. Z tohoto hlediska bude vlhkost hodnocena i v této práci.

4.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZEMIN

Z fyzikálního hlediska je zemina netypická svým složením, jelikož obsahuje jak pevnou a kapalnou, tak i plynnou fázi. Vlastnosti zemín se nejčastěji stanovují pomocí laboratorních zkoušek pro co největší přesnost, případně pomocí zkoušek přímo v terénu. Vlastnosti se třídí podle následujícího rozdělení:

- Fyzikální a indexové vlastnosti – charakterizují pevné částice, vodu a vzduch ve vzorku a vztahy mezi nimi.
- Mechanické vlastnosti – charakterizují zeminy při jejich deformaci či porušení.
- Chemické vlastnosti – určují mineralogické složení apod.
- Další speciální vlastnosti – např. Proctorova zkouška zhutnění, Kalifornská zkouška únosnosti atd. [14].



Obrázek 4: Půdní horizont [15].

4.1.1 Fyzikální a indexové vlastnosti

4.1.1.1 Vlhkost

Půdní vlhkost je jednou z nejdůležitějších charakteristik půdy, jelikož hraje mimořádně důležitou roli při samotné tvorbě půdy, účastní se mnoha procesů přeměny půdního materiálu a je hlavním zdrojem vody absorbované rostlinami. V přírodních podmínkách je ovšem půda výrazně ovlivněna dešťovými srážkami, případně zavlažováním, během nichž

pokračující infiltrace a proudění vody vede k redistribuci půdní vlhkosti v důsledku interakcí mezi adsorpcí vody, kapilárními silami a gravitačním působením. Kromě toho se půdní částice přeskupují a spojují do nového strukturního systému, čímž ovlivňují tvorbu půdních agregátů, schopnost zadržovat vodu a strukturální stabilitu půdy a výrazně mění distribuci a hydraulické chování půdní vlhkosti [2].

Vlhkostí se z pohledu mechaniky zemin rozumí voda, která zcela nebo z části vyplňuje mezery mezi pevnými částicemi zeminy [14]. V půdě se může vyskytovat od prakticky zanedbatelného množství (blížícího se nule) až po úplné zaplnění všech pórů v mokré půdě, tj. při hodnotě plné vodní kapacity. Jedná se ovšem pouze o vodu, kterou lze ze zeminy odstranit vysušením při teplotě 105 °C. Momentní vlhkost půdy je definována poměrem hmotnosti/objemu vody obsažené v zemině k hmotnosti/objemu zeminy vysušené a vyjadřuje se v procentech:

- $\theta = \frac{V_w}{V_s}$ θ ... objemová vlhkost půdy [%];
 V_w ... objem vody obsažené ve vzorku půdy [l];
 V_s ... objem vzorku půdy [l].
- $w = \frac{m_w}{m_s}$ w ... hmotnostní vlhkost půdy [%];
 m_w ... hmotnost vody obsažené ve vzorku půdy [g];
 m_s ... hmotnost vzorku půdy [g].

Vlhkost obsažená ve vzduchu se dělí na absolutní a relativní. Absolutní vlhkost je dána množstvím páry, která je při dané teplotě a tlaku přítomna v jednotkovém objemu vzduchu. Pokud se počet odpařených molekul rovná množství molekul zkondenzovaných [16], což znamená, že je vzduch plně nasycený vodní parou, jedná se o mokrý vzduch. Naproti tomu relativní vlhkost je dána poměrem mezi množstvím vodních par obsažených ve vzduchu a množstvím vodních par, které by měl vzduch plně nasycený při totožném tlaku a teplotě. Udává tedy procentuální zastoupení vodní páry v suchém vzduchu při stanovených klimatických podmínkách. Absolutní a relativní vlhkost se počítají podle následujících vzorců:

- $\phi = \frac{m}{V}$ ϕ ... absolutní vlhkost vzduchu [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$];
 m ... hmotnost vodní páry [g];
 V ... objem vzduchu [m^3].
- $\varphi = 100 \cdot \frac{p_v}{p''_v}$ φ ... relativní vlhkost vzduchu [%];
 p_v ... parciální tlak vodní páry ve vzduchu [Pa];
 p''_v ... parciální tlak nasycené vodní páry [Pa].

Vlhkost zeminy se pro běžné technické účely stanovuje jako povrchová půdní vlhkost, jedná se tedy o relativní obsah vody ve svrchní části půdy. Přičemž se za svrchní část půdy považuje hloubka do několika centimetrů. Měření povrchové půdní vlhkosti popisuje míru vlhkosti nebo suchosti v nejvyšších vrstvách půdy. V této práci bude prováděno právě stanovení vlhkosti v povrchových vrstvách, jelikož měření bude aplikováno na experimentálních zelených střechách, kde výška substrátu dosahuje mocnosti maximálně 0,20 m. Výsledné hodnoty jsou ukazatelem lokálních srážek a půdních podmínek. Povrchová půdní vlhkost se stanovuje především z důvodu její důležitosti pro zdraví vegetace, je ovšem

velmi citlivá na vnější činitele, kterými jsou srážky, teplota, sluneční záření, vlhkost a vítr. Proto bude k měření užito více způsobů stanovení vlhkosti, pro určení co nejoptimálnější metody. Znalosti o hodnotách půdní vlhkosti v čase jsou důležité především pro pochopení procesů v mnoha environmentálních a sociálně-ekonomických oblastech, kterými mohou být například dopad na vitalitu vegetace, úroda plodin, sucho nebo vystavení povodňovým hrozbám [17].

Celková půdní vlhkost je dána srážkami, které se do půdy dostávají procesem infiltrace. Ta je ovlivněna především vlastnostmi půdy a typem odvodňovacího systému. Půdní vlhkost je důležitým parametrem v oblasti většiny environmentálních oborů, jako například hydrologie, meteorologie, zemědělství apod.

4.1.1.2 Salinita půdy

Orná půda na celém světě je z 10 % alkalická, jedná se především o půdy v blízkosti říčních toků a na mořských pobřežích. Tyto půdy jsou označovány jako zasolené, jelikož obsahují vysoké množství rozpustných solí, které ovlivňují fyzikálněchemické, chemické a biologické vlastnosti půdy. Jejich koncentrace v roztoku půdy se nepřímo úměrně mění s obsahem vody v půdě [18]. Jedná se především sírany, chloridy, uhličitany, nitráty, fosfáty, ionty vápníku, hořčíku, draslíku, sodíku, hliníku a železa.

Příčinami zasolení půd může být nedostatek srážek v suchých oblastech, kde není umožněno vyplavování soli, které se tak hromadí v půdě. Další příčinou může být velký výpar vody v teplých oblastech, kde je výpar větší, než srážky, což vede ke zvyšování koncentrace solí. Nebo také zhoršená propustnost půdy pro vodu, používání zasolené půdy pro závlahu, velké dávky průmyslových hnojiv atd.

Hodnocení (viz. Tabulka 1) zasolení půd se provádí na vzorku půdního roztoku, ve kterém se stanovuje obsah solí na základě měření vodivosti.

Tabulka 1: Hodnocení zasolení podle USDA [18].

Třída	Obsah solí [%]	Vodivost [$\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$]	Slovní označení
0	0,00–0,15	0–4	nezasolené
1	0,15–0,35	4–8	slabě zasolené
2	0,35–0,65	8–16	středně zasolené
3	nad 0,65	nad 16	silně zasolené

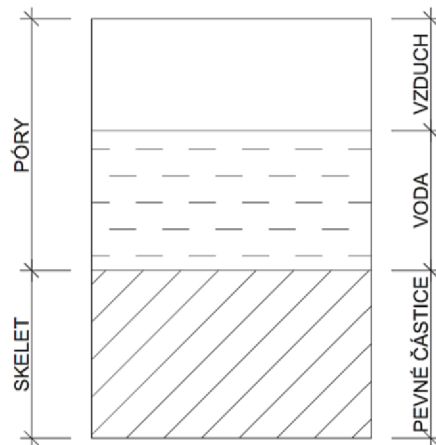
4.1.1.3 Objemová hmotnost a měrná hmotnost pevných částic

Měrná hmotnost pevných částic (nebo také hustota) se stanoví jako poměr hmotnosti pevných částic k jejich objemu. Na rozdíl od objemové hmotnosti se zde nezapočítávají póry, viz. Obrázek 5. Voda se započítává pouze pevně vázaná, tedy taková, která nelze odstranit sušením při teplotě 105 °C [14]. Obě veličiny je potřeba stanovovat u půd v neporušeném stavu [12].

Objemová hmotnost se stanoví poměrem hmotnosti vzorku a jeho objemu. Jedná se tedy v podstatě o hmotnost objemové jednotky zeminy včetně přirozeně obsažených pórů. Póry jsou částečně nebo úplně vyplněny vodou či vzduchem – viz Obrázek 2. U zemin se určuje objemová hmotnost v přirozeném uložení, objemová hmotnost nasycené zeminy, objemová

hmotnost suché zeminy a objemová hmotnost pod hladinou vody [14]. Pomocí objemové hmotnosti je také možné stanovit pórovitost zeminy, stupeň nasycení apod.

Objemová hmotnost půdy je po vlhkosti nejspíše druhým nejdůležitějším parametrem půdy. Pokud je při dlouhodobém monitorování půdní vlhkosti uvažována pouze samotná měřená změna obsahu vlhkosti, ale odpovídající změna objemové hmotnosti je ignorována, může být vážně ovlivněna přesnost předpovědi parametrů pohybu půdní vlhkosti [2]. Proto je v případě dlouhodobého měření velmi důležité komplexně zvážit strukturu půdy a dynamiku změn obsahu vody během cyklu vysychání a smáčení. Tyto parametry jsou totiž zásadními ukazateli pro racionální formulaci politiky hospodaření s vodními zdroji atd.



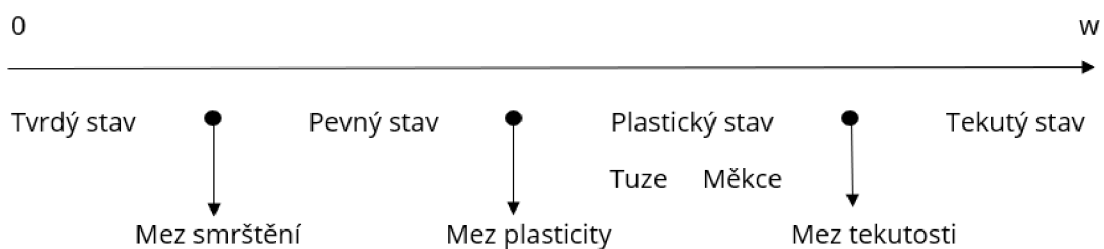
Obrázek 5: Trojfázový systém půd [14].

4.1.1.4 Zrnitost

Zrnitost, nebo-li granulometrie udává podíl zrn určité velikosti vzhledem k celkovému složení zeminy. Zobrazuje se graficky, pomocí síťového rozboru, jako křivka zrnitosti do souřadnicového systému se semilogaritmickou stupnicí, jelikož zrna menších průměrů mají na vlastnosti zeminy větší vliv, než zrna průměrů větších [14]. Nezáleží ovšem jen na průměru zrn, ale také například na tvarovém indexu zrn apod.

4.1.1.5 Konzistenční meze

Voda může být v zemině vázaná různými silami a v různých sloučeninách. Při stejné vlhkosti tedy mohou dvě různé zeminy vykazovat jinou konzistenci. Při určité konzistenci je ovšem pro danou zeminu vlhkost charakteristickou veličinou a díky tomu specifikuje danou zeminu [14]. Podle obsahu vody řadíme zeminy do následujících kategorií: tekutý stav, stav plastický, stav pevný a stav tvrdý. Na rozhraní těchto konzistenčních stavů se nachází smluvní meze, které jsou vyznačeny na Obrázku 6.



Obrázek 6: Konzistenční meze [19].

4.1.2 Další vybrané vlastnosti zemin

Pevnost zemin se stanovuje pro statické řešení, především v úlohách mechaniky zemin. Zjišťuje se především smyková pevnost, jelikož k ní při namáhání zeminy dochází nejčastěji a odpor ve smyku je hlavním zdrojem pevnosti půdy. A také vstupuje do výpočtů při stanovení únosnosti zemin či zemních tlaků nebo zajištění stability svahů [14].

Stlačitelnost zemin se stanovuje v rámci deformačních charakteristik, které jsou důležité především pro stanovení sedání. Při zatížení půdy se mění její stav napjatosti, v půdě vznikají deformace a ty následně vyvolávají sedání konstrukcí [14]. Většina konstrukcí má příliš velkou plochu na to, aby se mohla zemina při zatížení rozšiřovat do stran a proto při stlačení dochází ke zmenšení objemu pórů, které mohou být částečně naplněny vodou a částečně vzduchem.

Při odběrech zeminy se v některých případech provádí také rozbor vody obsažené v zemině. V rámci rozboru se stanovuje například konduktivita nebo-li měrná vodivost, která je závislá na koncentraci iontů, jejich náboji, pohyblivosti a teplotě vody. Změna teploty o 1 °C způsobuje změnu konduktivity nejméně o 2 %. Temperování vzorku má při stanovování hodnoty jeho konduktivity velký význam. Konduktivita se obvykle měří nebo přepočítává na teplotu 25 °C. Z pohledu vyhlášky 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody je stanovena mezní hodnota konduktivity na 125 mS·m⁻¹. Tvrdost vody se určuje obsahem vápníku a hořčíku. Dalšími zjišťovanými prvky a sloučeninami jsou dusičnany (NO₃⁻), dusitany (NO₂⁻), amonné ionty (NH₄⁺), železo, mangan, chloridy, sírany, arsen, hliník, beryllium, uran, polycyklické aromatické uhlovodíky, kyanidy, sirovodík (H₂S) a další [20]. Některé z nich jsou v půdách přínosné, jako například dusičnany, dusitany a čpavek, které potřebují rostliny pro správnou funkci [21]. Jiné, zejména některé těžké kovy, jsou naopak nežádoucí. V rámci rozboru lze také stanovit pH, přítomnost různých druhů bakterií, obsah solí apod [22].

4.2 DRUHY VODY V ZEMINĚ

Voda se v zemině vyskytuje v různém složení, v různých vazbách a v různém skupenství [23]. Je neoddelitelnou součástí všech látek obsahujících póry, tedy i půd. Veškerá voda nacházející se pod povrchem se označuje jako podzemní. Jejími zdroji jsou především srážky, také toky a nádrže a v malém množství zkondenzované vodní páry z ovzduší. Podzemní vody se dále dělí do několika následujících kategorií: gravitační voda, vázaná voda a strukturální voda.

4.2.1 Voda v kapalném skupenství

4.2.1.1 Gravitační voda

Voda gravitační své označení získala vzhledem k faktu, že je pod vlivem zemské přitažlivosti, která určuje její pohyb [24]. Gravitační voda se podle svého původu dělí na juvenilní a meteorickou. Juvenilní voda je magmatického původu, pochází tedy z velkých hloubek a do povrchových částí zemské kůry se dostává kondenzací vodních pár putujících k zemskému povrchu. Meteorická voda je naopak tvořena srážkovými vodami, které se do zemin následně dostávají infiltrací, nebo-li vsakováním z vodních toků a nádrží, jež jsou plně právě dešťovými srážkami [25].

Gravitační voda obsažená v půdách se dělí na volnou a kapilární. Volná voda souvisle vyplňuje póry zeminy, zatímco kapilární voda v pórech vzlíná pod vlivem povrchového napětí do tzv. kapilární výšky [26]. V případě kapilárního vzlínání molekuly stěny kapiláry přitahují vodu silou větší, než jaká je síla gravitační. Jelikož průměr pórů v zemině není konstantní, tak i výška kapilární vody kolísá. Její proudění pak závisí jak na kapilární výšce, tak na průtokovém profilu. Například u jemného písku je kapilární výška rovna 0,1–0,5 m při průměru kapilár 300–600 μm nebo přibližně 50 m u jílu při průměru kapilár menší než 0,6 μm [27].

4.2.1.2 Vázaná voda

Voda vázaná tvoří na povrchu částic tenkou vrstvu, o průměrné tloušťce 0,5 μm [26]. Molekuly vody jsou poutány k povrchům zrn minerálů elektrochemickými vazbami, které se vzdáleností od povrchu částice rychle slábnou. Podle intenzity vazby na minerální povrch lze vodu charakterizovat jako pevně nebo slabě vázanou.

Pevně vázaná voda, nebo také voda adsorbovaná se chová jako pevná součást minerálních zrn a má odlišné vlastnosti, než voda volná. Její objemová hmotnost může dosahovat i přes 2 000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zamrzá až při teplotách pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je možno ji odstranit pouze ohřevem při teplotě 150–300 $^{\circ}\text{C}$. Jelikož se při teplotě 105 $^{\circ}\text{C}$ neodpaří, nemá vliv na hodnotu vlhkosti zeminy. Povrch půdních částic za sucha však adsorbuje pouze určité množství vody. Adsorbovaná voda díky tomu poskytuje množství informací o půdních vlastnostech vzhledem ke své těsné vazbě na povrchové vlastnosti půdních částic. Při adsorpci se nejprve vytváří tzv. monovrstva, kdy se adsorbují molekuly vody prostřednictvím kationtů a díky povrchové hydrataci [28]. Jakmile je adsorpce primární vrstvy dokončena, tyto adsorbované molekuly vody poskytují nová místa k adsorbování dalších molekul vody prostřednictvím vodíkových vazeb, za vzniku více vrstev kapalně vázané vody.

Slabě vázaná voda, také označována jako obalová nebo osmotická je od povrchu částice vzdálenější, než voda pevně vázaná. Proto se její vlastnosti blíží vlastnostem vody gravitační. Jelikož je vazba vody na zrna zeminy slabá, ze zeminy ji lze odstranit i mechanicky, například stlačením.

Voda adsorbovaná a obalová tvoří tzv. difúzní obal z orientovaných molekul vody a například u jílu představuje přibližně 45 % celkového množství vody v půdě, u písků pak 2–3 % [27]. Vázaná voda také ovlivňuje některé vlastnosti zemin, především pak soudržnost a plasticitu.

4.2.1.3 Strukturální voda

Voda strukturální je součástí krystalické mřížky minerálů buď jako chemicky vázaná nebo krystalická. Voda chemicky vázaná je součástí krystalické mřížky v podobě iontů H^+ a OH^- [27]. Lze ji odstranit ohřevem nad teplotu 200 $^{\circ}\text{C}$, přičemž se mění chemické složení minerálu a v důsledku toho se rozpadá. Voda krystalická, jak sám název napovídá, je také součástí krystalické mřížky minerálu, zachovává si ovšem molekulární formu H_2O [27]. Z většiny materiálů ji lze odstranit ohřevem nad 60 $^{\circ}\text{C}$, v důsledku této teploty se totiž daný minerál změní na bezvodnou formu.

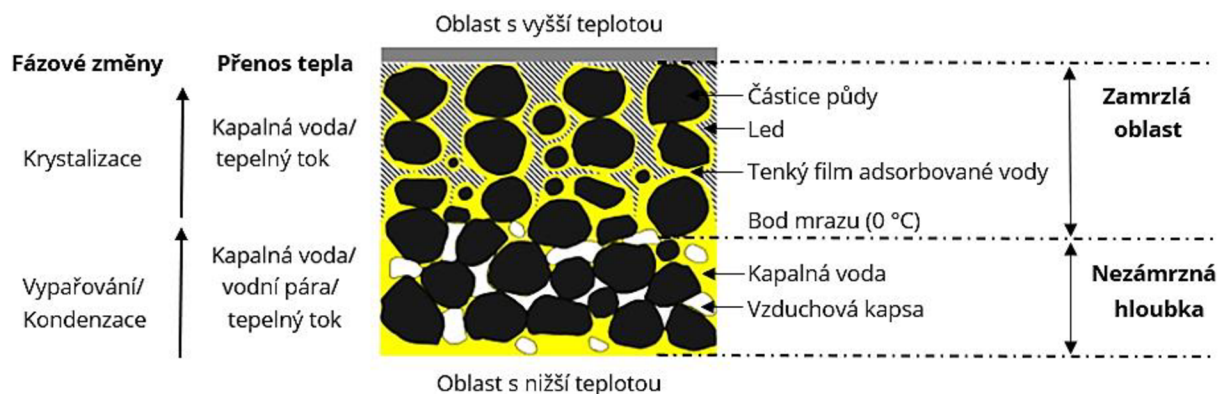
4.2.2 Vodní pára a led

Vodní pára se nachází v pórech nenasycených zemin a v případě relativně suchých půd je přenos vodní páry převládajícím prostředkem pro redistribuci vody v zemině a také přispívá

k tepelným tokům v půdě. Tyto procesy jsou způsobeny teplotními gradienty, které slouží jako hnací síla pro přenos par [29]. Ty se totiž přirozeně pohybují z míst s vyšší vlhkostí do míst s vlhkostí nižší a z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší [27]. Jejich přítomnost v zemině je důležitá především při promrzání zeminy, kdy nejdříve vlivem kondenzace přechází v jinou formu, například na vodu pevně vázanou a poté teprve mrzne. Ke kondenzaci vodní páry však dochází při dosažení rosného bodu, kdy je dosaženo 100% relativní vlhkosti.

Při teplotách nižších než 0 °C voda zamrzá, v důsledku čehož zvětšuje svůj objem a mezi zrny zeminy tak vyvozuje tlak [27]. Půda zamrzá směrem od zemského povrchu vždy pouze do určité hloubky, tzv. nezámrazné hloubky, jejíž velikost je ovlivněna teplotou, chemickým složením půdy apod. Tato promrzající vrstva zeminy je obohacována kapilární vodou stoupající na povrch a také tepelnou migrací. Jakmile se na jaře začnou zvyšovat teploty, led taje, a to opět od povrchu. Jelikož je ale pod tající vrstvou stále částečně vrstva zamrzlá, tající voda nemá možnost se vsakovat hlouběji do půdy, což má za následek měknutí a ztrátu pevnosti zeminy.

Proces zmrazování půdy je důsledkem spojení přenosu tepla a vody. Když se v zamrzlé půdě vytvoří teplotní gradient, teplo přirozeně proudí z teplejších míst do míst chladnějších a tím zároveň pohání migraci vody tím samým směrem. Obvyklým předpokladem je, že proudění vodních par k celkovému přenosu vlhkosti v mrazivé půdě přispívá jen zanedbatelně. Pokud je však hladina podzemní vody dostatečně nízká, tedy v hloubce 90 cm a níže, v závislosti na typu zeminy, a to zejména v chladných a suchých oblastech, dochází k přenosu vlhkosti v nenasycených půdách obvykle ve formě proudění par, zejména v případě, kdy je teplotní gradient velký. Nedávné experimentální důkazy také prokázaly, že proudění par v mrazivých půdách by mohlo vést k tvorbě velkého množství ledu, což je dominantní mechanismus migrace vlhkosti [30]. Proudění par může akumulovat velké množství vlhkosti v půdách pod nepropustnými povrchovými kryty, typicky se jedná o silniční či letištní plochy, které navíc zabraňují odpařování. Z výzkumu Central South University v čínském Changsha vyplývá, že proudění par zjevně přispívá k tvorbě ledu, přičemž obecně představuje více než 10 % celkových toků vody v nenasyceném a uzavřeném systému za pravidelného teplotního gradientu.



Obrázek 7: Schematický diagram toku kapalné vody, páry a tepla v nenasycené, částečně zamrzající půdě [30].

5 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI

Vlhkost půdy se stanovuje jako momentní stav v určitém čase a její obsah je základní kvantitativní charakteristikou vztahu půdy a vody. Každá metoda měření vlhkosti je v těsné souvislosti se základními definicemi veličin půdní vlhkost, které byly probrány v předchozí kapitole. Každá z metod má své výhody a nevýhody a je zatížena specifickým souborem chyb [13]. Proto jsou výsledky jednotlivých metod měření mezi sebou obtížně porovnatelné. Vzhledem k důležitosti této charakteristiky v průběhu posledních desítek let vznikalo a vyvíjelo se mnoho metod jejího stanovení.

Na konci 19. století byla vlhkost měřena pouze subjektivně, kdy pozorovatel na meteorologické stanici odebíral vzorky zeminy z hloubky 10 cm a hodnotil vlhkostní stav půdy pomocí stupnice: vyprahlá, suchá, čerstvě smáčená, vlhá, mokrá a zbahněná [13]. Součástí pozorování bylo také například sledování rozvoje vegetace a podobné biologické procesy.

Současné metody stanovení půdní vlhkosti se dělí na přímé, při kterých se stanovuje přímo množství vody obsažené ve vzorku, oddělené od matrice. A na metody nepřímé, které jsou založeny na měření elektrických či neelektrických veličin, závislých na obsahu vody v půdě.

Samotné stanovení vlhkosti lze také rozdělit podle místa měření na laboratorní a polní. Dále na destruktivní, kdy je potřeba odebrat vzorek a nedestruktivní, kdy potřeba odebrat vzorek není.

5.1 PŘÍMÉ METODY STANOVENÍ VLHKOSTI

Metody přímého měření vlhkosti v půdě jsou destruktivními metodami, jelikož je při nich odebírán vzorek a jejich vyhodnocení trvá v řádech jednotek dnů. Tyto metody také slouží pro kalibraci nepřímých metod, které by jinak byly na vlhkost nepřeveditelné.

5.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je metodou destruktivní a je tedy ze zkoumané půdy potřeba nejprve odebrat reprezentativní vzorek. Ten je poté nutné homogenizovat tak, aby byla vlhkost v celém vzorku rovnoměrná, zároveň nesmí být umožněna změna vlhkosti při manipulaci se vzorkem. Pokud je vzorek odebírán mimo zkušební laboratoř, je nutné zajistit jeho vzduchotěsné uzavření. Následně je ze vzorku odebráno potřebné množství pro stanovení (dle normy), které je zváženo a vysušeno při 105 °C až 110 °C do konstantní hmotnosti. Při vysokém obsahu organických látek je potřeba vysušovat při nižší teplotě, a to 60 °C [31]. Následně je vzorek opět zvážen a stanovené hmotnosti jsou dosazeny do vzorce dle normy ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti. Pokud během měření dojde k pochybení či jinému problému, je nutné odebrat vzorek nový a postup opakovat.

Cílem této metody je odstranění nekystalické půdní vody ze vzorku a to lze změnit v organické hmotě, ve vzorku obsažené [32]. Odstranění vody ze vzorku probíhá pomocí odpařování při působení zvýšené teploty a především v důsledku proudění vzduchu kolem vzorku. Největší nevýhodou této metody, tedy kromě její destruktivní povahy, je časová náročnost, z důvodu ověřování ustálené hmotnosti po 24 hodinách [33].

5.1.2 Pyknometrická metoda

Pyknometrická metoda se užívá především v případech, kdy je potřeba stanovit vlhkost v kratším časovém úseku a gravimetrická metoda by byla příliš zdlouhavá. Vlhkost se v tomto případě stanovuje pomocí pyknometru (viz. Obrázek 8), jehož funkce je založena na skutečnosti, že při jeho úplném naplnění (společně s dutou zátkou) zaujímá vždy stejný objem, který je díky tomu jednoduše reprodukovatelný [34].



Obrázek 8: Pyknometry různých velikostí [35].

Metoda spočívá ve stanovení hmotnosti vody a hmotnosti pevných částic ve vzorku. Nejprve je zvážen prázdný pyknometr, poté je do něj vložen reprezentativní vzorek zeminy a opět zvážen, následně se pyknometr se vzorkem doplní vodou do plného objemu, zváží a vyprázdní. Posledním krokem je zvážení pyknometru naplněného pouze čistou vodou. Hodnoty hmotností se dosazují do vzorce, po jehož výpočtu se obdrží přímo hodnota vlhkosti [36]:

$$w = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_3 - W_4} \cdot \left(\frac{G_s - 1}{G_s} \right) - 1 \right) \cdot 100$$

kde: w ... obsah vody ve vzorku [% hmot.];

W_1 ... hmotnost pyknometru [kg];

W_2 ... hmotnost pyknometru se vzorkem [kg];

W_3 ... hmotnost pyknometru se vzorkem doplněn vodou do celého objemu [kg];

W_4 ... hmotnost pyknometru s vodou doplněnou do celého objemu [kg];

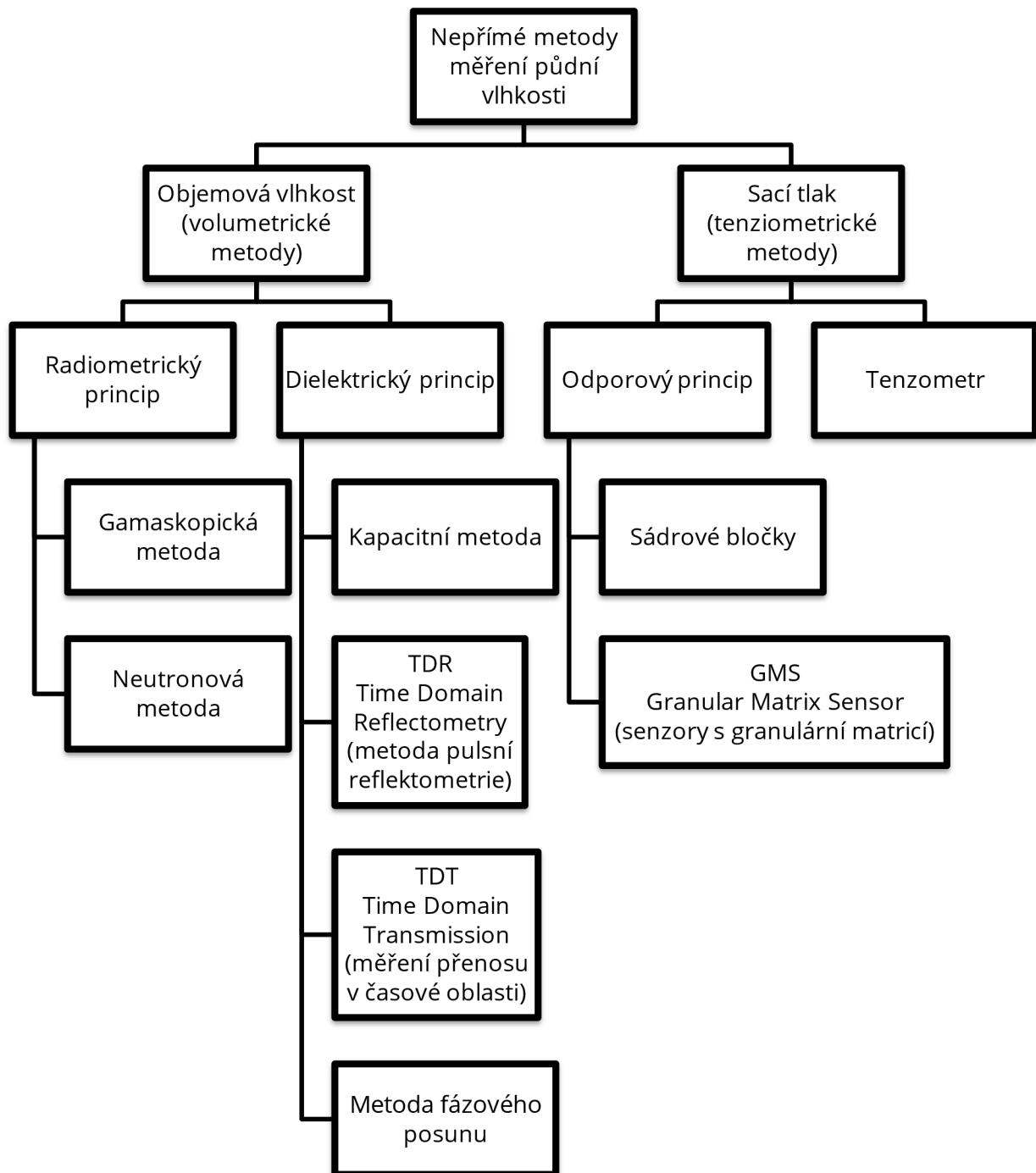
G_s ... objemová hmotnost pevných částic ve vzorku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Pyknometrická metoda je také vhodná pro stanovení vlhkosti především u nesoudržných zemin, jelikož na sobě jednotlivá zrna neulpívají a tudíž zde nenastává problém s odstraňováním zachyceného vzduchu.

5.2 NEPŘÍMÉ METODY STANOVENÍ VLHKOSTI

Nepřímé metody, nestanovují přímo vlhkost půdy, ale jinou veličinu, která je na vlhkosti půdy přímo závislá. Po dosažení hodnoty stanovované veličiny lze následně vlhkost vypočítat. Tyto metody jsou hojně využívány především díky nedestruktivnímu charakteru měření, výsledky měření jsou ihned k dispozici a na stejném místě je možno provádět opakované

stanovení vlhkosti v čase. Kalibrace těchto metod se ve většině případů provádí pomocí gravimetrické metody. Rozdělení nepřímých metod je uvedeno na Obrázku 9.



Obrázek 9: Členění nepřímých metod měření půdní vlhkosti [37].

5.2.1 Tenzometrické měření

Tenzometr měří sací tlak, nebo-li vodní potenciál půdy. Přístroj je tvořen dutou trubicí, zcela naplněnou vodou, jejíž špička je tvořena zpravidla keramickou, porézní a tedy polopropustnou membránou, viz. Obrázek 10. Díky polopropustnosti membrány je umožněna výměna vody mezi vodním sloupcem tenzometru a půdou. Druhý konec trubice je

opatřen manometrem, dříve ručičkovým, v současnosti již elektronickým, ze kterého se odečítá hodnota sacího tlaku [37].



Obrázek 10: Tenzometr [38].

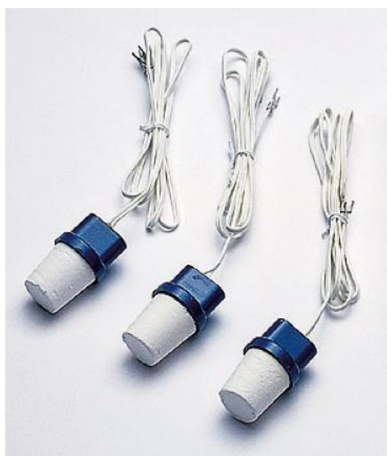
Tenzometr je nutné umístit do půdy takovým způsobem, aby byla keramická špička celým povrchem s půdou v kontaktu. U vhodně umístěného přístroje poté dochází k proudění vody z tenzometru do okolní půdy skrz keramickou špičku. K tomuto procesu dochází, jelikož je tenzometr sestaven s tlakem 0 Pa a voda tak samovolně vytéká ven. Ve chvíli, kdy se podtlak v trubici přístroje vyrovná se sacím tlakem půdy, proudění ustává. Dosažení rovnovážného stavu je dlouhodobý proces a proto jsou tenzometry vhodné spíše pro měření trvalého charakteru [37]. Běžně půdy dosahují hodnot sacího tlaku v rozsahu (0 až 0,8) barů, tedy (0 až 80) kPa [31].

Výhodami měření tenzometry je možnost přímého odečtu hodnot sacího tlaku, přístroje také nevyžadují elektrické napájení, jako většina ostatních nepřímých metod. Poloměr dosahu měření je přibližně 10 cm a měření není ovlivněno půdní salinitou. Na přístroj je možné připojit elektronický tlakoměr, který poté bude provádět automatický záznam hodnot v čase. V tomto případě je tenzometr vhodný pro měření a tedy řízené vnášení potřebné vlhkosti (závlahy) do půdy [31]. Přístroj také není potřeba kalibrovat na druh zkoumané půdy, je ovšem potřeba znát retenční křivky půdy, právě pro převod vodního potenciálu na námi zjišťovanou vlhkost. Přímý odečet hodnot je ovšem také směrodatný, jelikož nám udává informace o náročnosti extrakce vody rostlinami [37].

Nevýhodou je omezený rozsah měření, maximální měřitelný tlak je přibližně 75 kPa, jelikož nad tuto hodnotu dochází vlivem pronikání vzduchu skrz porézní membránu ke kolapsu podtlaku uvnitř tenzometru [37]. Jelikož je možné hodnoty na manometru odečítat až po vyrovnání tlaků, je doba odezvy dlouhá a přístroj vyžaduje dokonalý kontakt keramického tělíska s okolní půdou, kdy především v bobtnavých či skeletovitých zeminách hrozí nebezpečí ztráty kontaktu a tedy nutnost přeinstalace přístroje. V teplejších obdobích přístroj také vyžaduje časté doplňování vody v trubici a na zimu je naopak potřeba tenzometry demontovat, aby nedošlo k zamrznutí kapaliny uvnitř trubice, v důsledku čehož by popraskala [31].

5.2.2 Sádrové bločky

Sádrové bločky, zobrazené na Obrázku 11, se řadí mezi odporové metody měření a princip jejich měření je tedy založen na skutečnosti, že elektrický odpor zeminy klesá se vzrůstající vlhkostí. Bločky jsou tvořeny dvěma elektrodami nejčastěji tyčového tvaru anebo také ve tvaru mřížky, které jsou zality do sádry. V okolí elektrod se v důsledku zalití do sádry vytváří nasycený roztok síranu vápenatého, který vytváří elektrolyt potřebný pro měření. Aby nedocházelo k polarizaci elektrod, měří se odpor mezi elektrodami pouze malými střídavými proudy [31]. Vlhkost je u této metody, stejně jako u tenzometrů závislá na vodním potenciálu a umožňuje jeho měření v rozsahu 30–200 kPa [37].



Obrázek 11: Sádrové bločky [39].

Výhodami sádrových bloček je především jednoduchost měření a také po jejich zabudování není potřebná žádná údržba [31]. Je možné je použít až do salinity půdy o hodnotě $6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (deciSiemens na metr). Vzhledem k tomu, že u nás obvykle se vyskytující rostliny prospívají v půdách se salinitou do maximální hodnoty $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ [40], je tento rozsah u většiny měření plně dostačující.

Nevýhod je v případě této metody více, než výhod. Stanovení má nízké rozlišení a je proto limitující například při výzkumném měření. Také je nevhodná pro měření při stavech blízkých nasycení, opět není použitelná do bobtnavých půd a vykazuje výraznou teplotní závislost, kdy vliv teploty představuje změnu výsledné hodnoty vlhkosti o 1 % – 3 % při změně teploty o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [37]. Bločky také mají dlouhou dobu odezvy a nejsou tedy vhodné pro měření v písčítých půdách, v jejichž struktuře se rychle mění vlhkostní podmínky. Vlastnosti půdy v blízkosti sádrových bloček se s časem mění vlivem kontaminace jílovitými částicemi a také vlivem rozpadu materiálu snímačů, jelikož jsou náchylné na postupné rozpouštění, čímž navíc dochází ke ztrátě kontaktu s okolní zeminou [31].

5.2.3 GMS – Granular Matrix Sensor (senzory s granulární maticí)

GMS senzory, zobrazené na Obrázku 12 jsou obdobou sádrových bloček s tím rozdílem, že jsou elektrody umístěny v křemenném porézním materiálu místo sádry. Ten je navíc potažen syntetickou membránou a kovovým perforovaným pouzdem. Sádra je ovšem obsažena i v těchto senzorech, jelikož je jí vyplněn vnitřek porézního tělíska, ale v případě této konstrukce nepředstavuje primární porézní materiál, na rozdíl od sádrových bloček [31] [37].

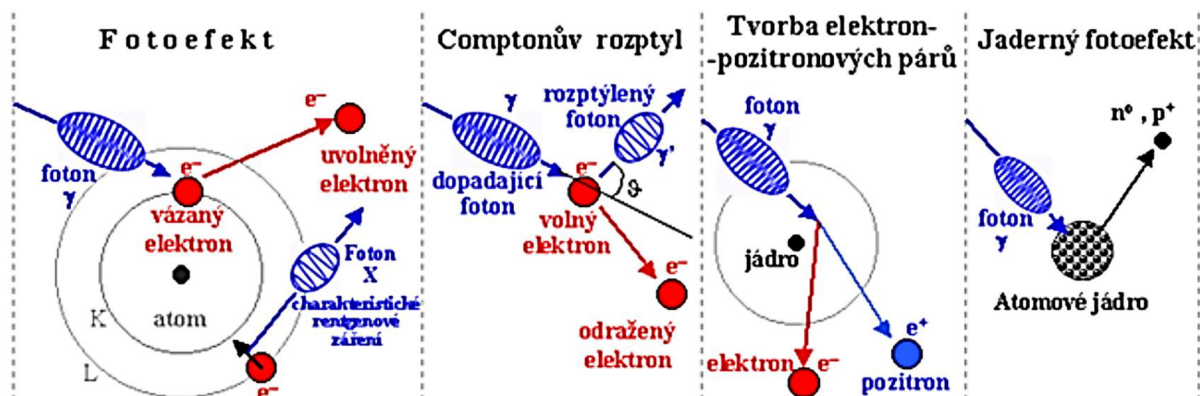


Obrázek 12: GMS senzor [41].

Většina výhod i nevýhod je totožných jako u sádrových bločků [31]. Rozdíl je například v rozsahu hodnot měření, který podle výrobců senzorů činí (0–239) kPa. Existují ovšem tvrzení odborníků, že senzor může být necitlivý ke změnám sacího tlaku v rozmezí přibližně (0–10) kPa [37].

5.2.4 Gamaskopická metoda

Změna půdní vlhkosti, v důsledku zaplňování pórů vodou, způsobuje změnu objemové hmotnosti a tu je možno nepřímě měřit na základě změny rozptylu gama paprsků v zemině. Interakce ionizujícího záření s hmotou probíhá na atomární úrovni, kdy záření při svém průchodu materiálem za sebou zanechává ionizační stopu, tedy volné elektrony a kationty [42]. V případě elektromagnetického záření foton po předání své energie do matrice zcela zaniká. Ovšem pokud má primární záření dostatečnou energii, generuje interakcí s materiálem sekundární záření, které produkuje další částice, čímž dochází ke kaskádové interakci. Z typů sekundárního záření je pro stanovení vlhkosti důležité především to Comptonovsky rozptýlené, v jehož důsledku dochází ke změně energie fotonů záření [37]. Četnost interakcí záření s látkou a tím i míra rozptylu gama paprsků a změna energie fotonů je závislá na celkovém počtu elektronů obsažených ve zkoumaném materiálu a tím tedy na objemové hmotnosti zeminy.



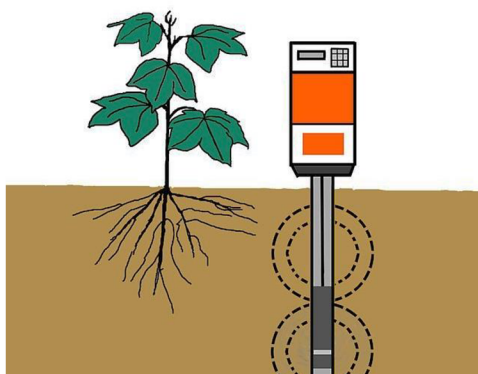
Obrázek 13: Typy interakce gama záření [42].

Zdrojem záření nejčastěji bývá izotop ^{241}Am (Americium), který vyzařuje gama částice o energii 60 keV (kiloelektronvoltů), které jsou schopny průchodu půdou v jednotkách centimetrů a jsou tedy vhodné především pro laboratorní stanovení. Druhým nejčastěji

užívaným izotopem je ^{137}Cs (Cesium), s energií částic 660 keV, což je energie dostatečná k průchodu několika desítek centimetrů půdy a je proto využíván pro měření v terénu [37]. Obecně se však využití zářičů při měření řídí přísnými pravidly bezpečnosti práce, která není vždy především při terénních měřeních splnit.

5.2.5 Neutronová sonda

Neutronová metoda je obdobou metody gamaskopické, v tomto případě je ovšem stanovení založeno na změně energie vyzařovaných částic. Jako zdroj neutronového záření se u této metody používá směs ^{241}Am (Americium) a ^9Be (Beryllium). Izotop americia vyzařuje alfa částice, které kolidují s berylliem za vzniku ^{12}C a volného neutronu, jehož energie je v rozsahu (2–6) MeV [37]. Vzhledem k absenci náboje neutronu, oproti gamaskopické metodě, je v tomto případě rozhodující kolize záření s jádrem atomů materiálu, jelikož nedochází k elektrické interakci neutronů s elektronovým obalem. Velikost energie, kterou neutron při pružné srážce s jádrem atomu ztratí, je pak závislá na jeho hmotnosti. Postupnými kolizemi dochází k termalizaci neutronů, tedy ke snížení jejich energie zpomalením. Zpomalené neutrony vytvářejí kolem zdroje „oblak“ přibližně kulovitěho tvaru [31]. K největšímu úbytku dochází při srážce s atomem vodíku, při které neutron ztrácí průměrně polovinu svojí energie. Atomy vodíku, obsažené v půdě převážně v molekulách vody, jsou tak nejsilnějším moderátorem neutronů [37]. S rostoucím podílem vody v půdě tedy klesá vzdálenost, kterou neutrony v půdě urazí před jejich zachycením jádrem atomu při nepružné srážce. Tím roste i koncentrace termalizovaných neutronů v okolí zdroje, z nichž se část odráží zpět a jsou zachyceny detektorem, kterým může být opět proporcionální čítač, nebo scintilační detektor. Čím je tedy vlhkost půdy vyšší, tím dříve se rychlý neutron zpomalí a poloměr koule termalizovaných neutronů je malý a naopak v případě suché půdy je poloměr koule termalizovaných neutronů velký [31].



Obrázek 14: Neutronová sonda [43].

Neutronové sondy, viz. Obrázek 14, jsou stálé a mají vysokou přesnost měření. Jedna sonda navíc umožňuje měřit vlhkost půdy v různých hloubkách, přičemž měřená plocha má přibližně kulovitý tvar o poloměru 0,1 m až 0,4 m. Výsledek měření není ovlivněn salinitou půdy a také není potřebná stabilní kalibrace pro danou půdu [31].

Práci s neutronovou sondou ovšem doprovází bezpečnostní riziko a tak sondu mohou obsluhovat pouze speciálně vyškolení pracovníci. Zároveň se jedná o velký a těžkopádný přístroj a neutronovou sondou není možno provádět kontinuální měření. Také měření v blízkosti povrchu půdy (přibližně do 0,20 m) jsou zkreslená, neboť může docházet nejen k interakci záření s jádrem atomů měřeného materiálu, ale i prostředí obklopujícího měřený materiál (proudící vzduch nad povrchovou vrstvou).

5.2.6 Kapacitní metoda

Umístěním vlhké zeminy do slabého proměnného elektrického pole, lze vlhkost v zemině obsaženou stanovit pomocí relativní permitivity. Relativní permitivitou se rozumí podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua a vyjadřuje tedy, kolikrát se zvětší kapacita kondenzátu, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum. Hodnota relativní permitivity závisí na vlastnostech dané zeminy, lze ji považovat za materiálovou konstantu a zároveň se jedná o bezrozměrnou veličinu [31].

Hodnota relativní permitivity pevné fáze se pohybuje v rozmezí 2–5, kdežto hodnota relativní permitivity vody činí přibližně 81. V důsledku této skutečnosti hodnotu kapacity kondenzátu, jehož dielektrikem je půda, ovlivňuje obsah vody v půdě [37]. Obecně půdu nelze považovat za prostředí izotropní. V nehomogenním a neizotropním prostředí, kterým obecně půda je, je hodnota relativní permitivity symetrickým tenzorem druhého řádu, jehož vektory intenzity elektrického a magnetického pole mohou mít různý směr, společně s hodnotou permeability se vyskytuje ve vztahu pro vyjádření rychlosti libovolného elektromagnetického vlnění. Pro střídavé elektromagnetické vlnění je permitivita představována funkcí závislou na frekvenci vlnění a je komplexním je rovna podílu fázorů vektorů elektrické indukce a intenzity elektrického pole, které mohou být fázově posunuty. Z uvedeného vyplývají dva základní postupy měření hodnot relativní permitivity. Kapacitní sondy se skládají ze dvou nebo více elektrod (viz. Obrázek 15), které mají většinou válcovitý tvar nebo také tvar tyčí a ty jsou umístěny přímo v půdě [31]. Při měření je nutné zohlednit geometrii kapacitoru, jelikož za neměnné geometrie kapacitoru je kapacita vždy přímo úměrná permitivitě dielektrika. Lze tudíž nalézt závislost mezi objemovou vlhkostí dané půdy a kapacitou. Při měření se stanovuje změna hodnoty kapacity a to jako změna doby jeho nabíjení a vybíjení kapacitoru. Druhou možností je rezonanční princip, u kterého je rezonanční obvod s půdní sondou vybuzenou frekvencí a kapacita se pak stanoví na základě rezonanční frekvence [37].



Obrázek 15: Kapacitní sonda [31].

Kapacitní metoda má po kalibraci na daný typ půdy vysokou přesnost a variabilita prostorového uspořádání jednotlivých elektrod umožňuje měřit zároveň ve více hloubkách. Metoda je navíc vhodná také do zasolených půd a sledované hodnoty lze stanovovat i v čase pomocí trvalého monitorování [31].

Nevýhodou kapacitní metody ovšem je, že snímač musí být v dokonalém kontaktu se zemínou, což je v některých situacích při polním měření značně obtížné. Metoda je také citlivá na obsah jílových částic a především pak na teplotu a vyžaduje kalibraci pro každý typ půdy [31].

5.2.7 TDR (Time Domain Reflectometry) – metoda pulsní reflektometrie

Metoda pulsní reflektometrie byla původně vyvinuta k detekci a lokalizaci poruch na kabelech. Od konce 70. let 20. století se ovšem používá také k měření půdní vlhkosti, a to především při polních měřeních. Princip metody spočívá opět v určení permitivity zkoumaného prostředí, tentokrát ale pomocí měření rychlosti šíření vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu [31]. Měřicí elektronika generuje pulzy o frekvenci 20 MHz až 3 GHz, ty se šíří podél dvou až tří zářičů a na jejich konci se částečně odráží zpět. Nejdůležitější odrazy jsou ty produkované na počátku vedení vstupujícího do měřeného vzorku a poté na jeho konci. Časový rozdíl mezi odrazy nám udává rychlost šíření vlny v zemině v závislosti na její vlhkosti [37]. Tudíž je vlastně stanovená permitivita, pomocí empiricky stanovených vzorků, přepočítána na půdní vlhkost. Přičemž jednotlivé prodlevy mezi jednotlivými impulzy jsou velmi malé, pouze v řádech nanosekund. Výpočetní vztahy mají nejvyšší přesnost při měření v písčitých půdách, ovšem čím větší je podíl jílovitých částic v půdě, tím přesnost výpočetních vztahů klesá [31].



Obrázek 16: Snímač založený na principu pulsní reflektometrie [44].

Metoda pulsní reflektometrie má oproti většině ostatních metod přesnější výsledné hodnoty vlhkosti, při své instalaci jen minimálně narušuje půdu, má nízkou citlivost na běžné zasolení zemin a umožňuje současně s permitivitou měřit také elektrickou vodivost půdy. Nelze ji ovšem použít v silně zasolených půdách stejně jako v půdách s vysokou elektrickou vodivostí. Měřený objem půdy je velmi malý, pouze v okruhu 3 cm – 4 cm podél elektrod [31].

5.2.8 TDT (Time Domain Transmission) – Měření přenosu v časové oblasti

Metoda TDT je stejně jako metoda TDR založena na změně rychlosti šíření impulsu vedením, v tomto případě se ovšem užívá přímá vlna. Ta se na jeho konci zářiče neodráží zpět, ale po vyslání pulsu je na konci vedení opět přijata. Z toho důvodu nemohou mít snímače

využívající tuto metodu hrotové elektrody. Rychlost šíření vlny, a tím vlhkost půdy, je stanovena na základě doby uplynulé mezi vysláním a přijetím impulsu [31] [37].



Obrázek 17: Snímač měření přenosu v časové oblasti [45].

5.2.9 Metoda fázového posunu

Metoda fázového posunu je obdobou metody TDT, jelikož se opět jedná o měření rychlosti šíření vlny [37]. K vyhodnocení se ovšem využívá rozdíl fáze harmonického signálu přivedeného na vedení. Při průchodu elektromagnetické vlny po stanovené dráze dochází k jejímu fázovému posunu oproti signálu vysílanému. Velikost fázového posunu pak závisí jak na dráze, po které se šíří, tak na frekvenci a také rychlosti šíření. Rychlost šíření je nepřímo závislá na relativní permitivitě prostředí. V půdě je hodnota relativní permitivity nejvíce ovlivněna právě obsahem vody. Při konstantní frekvenci a délce zářičů je tedy fázový posun závislý přímo na obsahu vody v zemině [31].

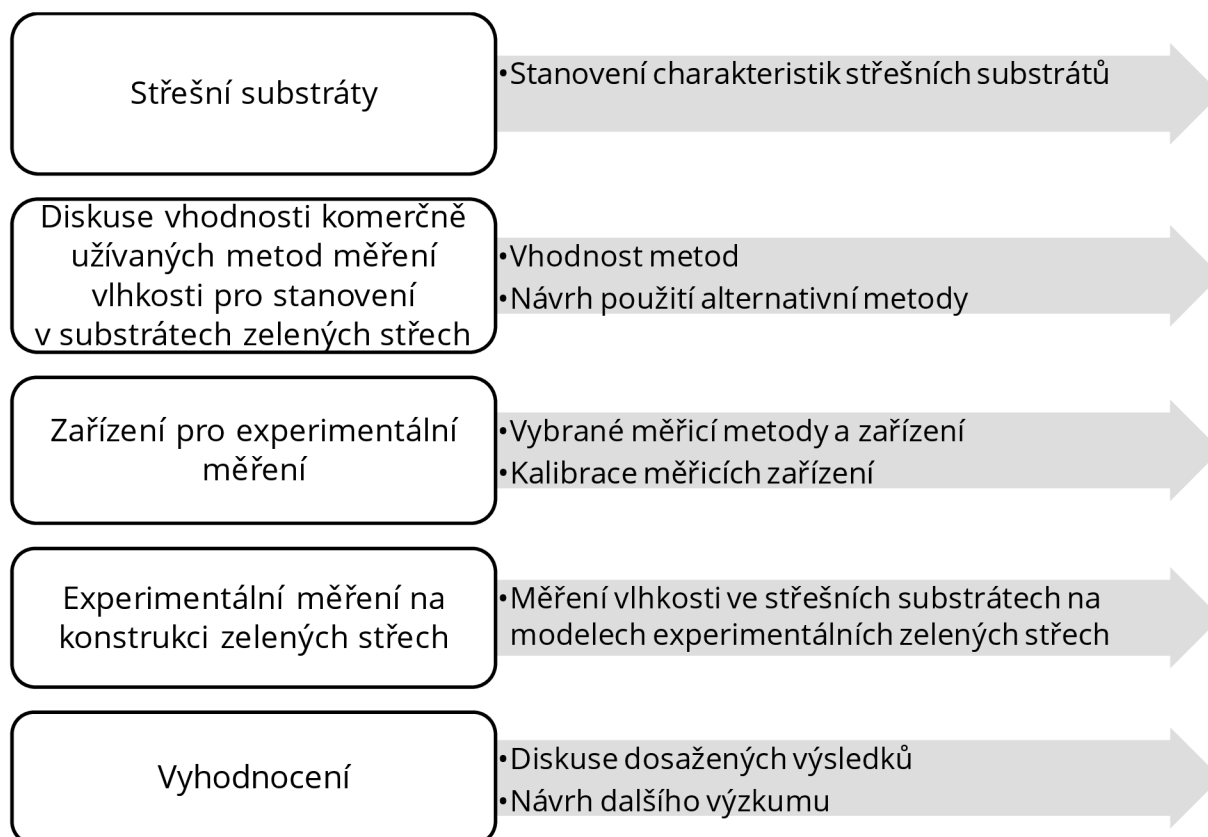


Obrázek 18: Zářič a přijímač založené na metodě fázového posunu [46].

Kalibrací přístroje pro daný typ půdy lze získat hodnoty její vlhkosti s vysokou přesností, při jeho instalaci ovšem dochází k porušení přirozeného půdního profilu. Je také vysoce citlivý na zasolení, není možné jej použít při salinitě půdy nad $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ a je určen pouze pro trvalé sledování vlhkosti [31].

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Zadání diplomové práce bylo rozděleno do několika částí, na základě kterých byla vypracována metodika práce, kterou lze vyjádřit následujícím algoritmem:



Obrázek 19: Metodika práce.

6.1 STŘEŠNÍ SUBSTRÁTY

Vlastnosti střešních substrátů byly stanovovány v laboratoři, v rámci praktické části práce byly zkoumány čtyři různé substráty, viz. Obrázek 20. Substrát č. 1 obsahuje především běžné drcené kamenivo, nachází se v něm také cihelný recyklát o přibližném průměru zrn až 10 mm a v minoritním zastoupení lehké spékané kamenivo. Majoritní část substrátu č. 2 zaujímá lehké spékané kamenivo se středním průměrem zrn přibližně 3 mm. Substrát č. 3 obsahuje také především spékané kamenivo, ovšem o průměru některých zrn až 20 mm. Poslední zkoumaný substrát č. 4 obsahuje stejně jako substrát č. 1 především běžně užívané těžené kamenivo a drcený cihelný recyklát, které jsou doplněny malým množstvím lehčeného kameniva, má ovšem větší podíl vyšších frakcí a menší podíl jemných částic. Základem všech substrátů je také běžný rostlinný substrát, tudíž se ve vzorcích nacházejí některé přírodní nečistoty, jako například jehličí apod. Substráty, ve kterých se nachází recyklát mohou navíc být znečištěny různými odpady, kterými může být recyklát kontaminován při demolici stavby, ze které pochází. V rámci experimentálních měření se jednalo především o úlomky plastů.



Obrázek 20: Vzorky testovaných substrátů, zleva: substrát č. 1 až substrát č. 4 vpravo.

6.1.1 Stanovení charakteristik střešních substrátů

Fyzikální vlastnosti střešních substrátů byly stanovovány postupy, které vydala Odborná sekce Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně a které vycházejí z doporučení FLL [47]. Zkušebními nádobami, ve kterých probíhalo měření, byly plastové kontejnery, vytvořené z KG trub o průměru 0,15 m a výšce 0,17 m. Kontejnery mají perforované dno, ve kterém je celkem 125 otvorů, každý o průměru 0,005 m.

Dalším prováděným měřením bylo stanovení objemové hmotnosti pevných částic substrátů dle ČSN EN 1097-6, stanovení hodnoty pH jednotlivých zkoumaných vzorků dle ČSN EN ISO 10390 a také stanovení zrnitosti síťovým rozborem dle ČSN EN 933-1.

6.1.1.1 Postup stanovení vlastností

Vzorky jednotlivých substrátů byly nejprve vlhčeny vodou z vodovodního řadu, aby se při manipulaci s nimi předešlo prášení a tím ztrátě prachových částic ze vzorků. Vlhkost byla vnášena rozprašováním vody do vzorku a následně provedena homogenizace substrátu s přidanou vodou. Vzorek byl vlhčen na dosažení takové konzistence, aby jednotlivá zrna substrátu při stlačení v dlaní držela pohromadě, ale stále si zachovávala sypký charakter.

Na dno plastového kontejneru byla vložena síťovina, aby bylo zabráněno ztrátě jemných podílů. Z vlhkého substrátu byl poté odebrán vzorek o objemu 2,5 l, který byl vložen do nádoby. Na vzorek byla umístěna ocelová destička pro roznesení zatížení a vzorek byl následně zhutněn šesti údery Proctorova kladiva. Po stlačení musí výška substrátu dosahovat minimálně 0,1 m. Na čtyřech různých místech byl změřen rozdíl mezi výškou substrátu a výškou kontejneru. Kontejner i se vzorkem byl zvážen. Ze známých rozměrů kontejneru byla poté vypočtena průměrná výška vzorku a také objem vzorku.



Obrázek 21: Vzorky umístěné v kontejnerech opatřeny sítovinou a tkaninou.

Vzorek byl na povrchu opatřen opět sítovinou a také technickou tkaninou (geotextílií), viz. Obrázek 21. Vše bylo následně zatíženo závažím (betonovou dlaždicí), viz. Obrázek 22, aby nedocházelo k vyplavení pórovitého kameniva ze vzorku. Plastový kontejner byl poté vložen do vodotěsné nádoby. Na vzorek byla postupně nalévána voda tak, aby její hladina dosahovala alespoň 0,01 m nad horní okraj vzorku. Vzorek byl ponechán 24 hodin nasáknout.



Obrázek 22: Vzorek zatížený betonovou dlaždicí.

Po uplynutí 24 hodin byl vzorek umístěn na mezerovitou podložku, aby byl umožněn odtok gravitační vody. Po dalších dvou hodinách bylo odstraněno závaží, geotextílie i sítovina a vzorek byl zvážen.

Nasáknutý vzorek byl použit k dalším měřením. Na vzorek byla opět umístěna sítovina a na vnitřní straně kontejneru byly vyznačeny tři různé výšky, 20, 35, a 45 mm nad povrchem vzorku. Na vzorek byla opět nalévána voda, dokud nedosahovala 20 mm nad horní okraj vzorku vyznačený horní ryskou na testovacím kontejneru. Tato výška hladiny byla udržována, dokud voda nezačala pravidelně vytékat zespodu kontejneru. Následně byla hladina zvednuta

nad horní rysku (viz. Obrázek 23) a byl měřen čas poklesu hladiny mezi výškou 45 a 35 mm nad povrchem vzorku. Tento postup byl u každého vzorku opakován třikrát pro větší přesnost.



Obrázek 23: Vzorek zaletý vodou, jejíž hladina dosahuje po horní rysku.

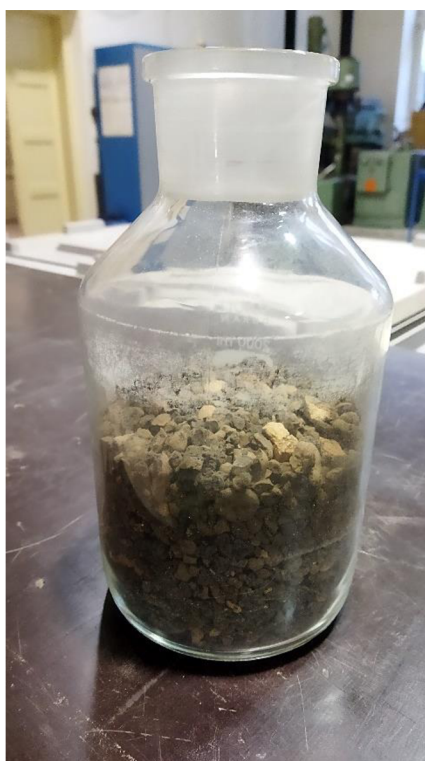
Posledním krokem bylo vysušení vzorku při 105 °C do ustálené hmotnosti a jeho následné zvážení. Naměřené hodnoty byly zavedeny do vzorců daných směrnici FLL a vypočteny charakteristiky jednotlivých zkoumaných střešních substrátů, viz. Tabulka 2.

Tabulka 2: Naměřené a vypočtené hodnoty parametrů sustřešních substrátů.

Substrát č.	1	2	3	4
Výška substrátu před hutněním [mm]	141	141	144	140
Výška substrátu po hutnění [mm]	111	110	120	118
Hmotnost před nasycením [g]	2097,52	1953,13	2445,59	2467,30
Hmotnost po nasycení [g]	2687,18	2495,26	2816,30	2843,87
Čas poklesu hladiny [s]	96,0	68,4	13,1	14,8
Hmotnost nasyceného vzorku [g]	2089,54	1904,62	2188,79	2232,55
Hmotnost suchého vzorku [g]	1250,63	1056,71	1573,68	1610,23
Objem vzorku [l]	1,97	1,94	2,12	2,08
Objemová hmotnost suchého vzorku [g·l ⁻¹]	640	540	740	780
Objemová hmotnost nasycení vzorku na maximální vodní kapacitu [g·l ⁻¹]	1060	980	1030	1080
Maximální vodní kapacita [%]	67,1	80,2	39,1	38,6
Propustnost pro vodu [mm·min ⁻¹]	6,3	8,8	45,8	40,5

6.1.1.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla stanovena již v předchozím kroku, při měření parametrů střešních substrátů podle předpisů FLL. Pro ověření jejich přesnosti byla navíc v dalším kroku objemová hmotnost stanovena také postupem daným normou ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Měření bylo prováděno podle přílohy G v normě, která je určena pro stanovení objemové hmotnosti předem vysušených zrn kameniva, propadlých zkušebním sítem 31,5 mm (včetně podílu o velikosti 0/0,063 mm).



Obrázek 24: Navážka vzorku střešního substrátu v pyknometru.

Podstata zkoušky spočívá ve stanovení hmotnosti substrátu získané vážením vzorku po vysušení v sušárně a jejího objemu, který se stanoví z objemu vytlačené vody předem vysušenými zrny pyknometrem. Pyknometr byl tedy zvážen nejprve samostatně, poté s navázkou vysušeného substrátu (viz. Obrázek 24), následně s navázkou substrátu, doplněnou pitnou vodovodní vodou až po rysku a nakonec pyknometr naplněn pouze vodou. Objemová hmotnost zrn byla vypočtena z následujícího vzorce:

$$\rho_p = \frac{M_1}{V - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}}$$

kde ρ_w ... hustota vody o teplotě zaznamenané při stanovení M_2 [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$];

M_0 ... hmotnost pyknometru a nálevky [g];

M_1 ... hmotnost zkušební navážky [g];

M_2 ... hmotnost pyknometru, nálevky, zkušební navážky a vody [g];

V ... objem pyknometru [ml];

$$V = \frac{M_3}{\rho_w}$$

kde ρ_w ... hustota vody při zkušební teplotě [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$];

M_3 ... hmotnost vody naplňující pyknometr a jeho nálevku po značku [g].

Tabulka 3: Objemová hmotnost střešních substrátů stanovená pyknometricky.

Střešní substrát	Objemová hmotnost dle ČSN EN 1097-6 [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Substrát č. 1	0,580
Substrát č. 2	0,530
Substrát č. 3	0,710
Substrát č. 4	0,680

6.1.1.3 Stanovení pH střešních substrátů

Stanovení pH je v případě střešních substrátů důležité především pro správné určení vhodnosti užití různých druhů rostlin. Většina rostlin, vyskytujících se v České republice vyžaduje neutrální až slabě kyselé pH půdy. V rámci této práce však byla hodnota pH střešních substrátů stanovená vzhledem ke skutečnosti, že může ovlivňovat hodnoty měřené kapacitními a odporovými měřiči. Stanovení bylo prováděno dle ČSN EN ISO 10390: Půdy, upravený bioodpad a kaly – Stanovení pH.



Obrázek 25: Drcení vzorku v roztírací misce.

Podstata zkoušky spočívá ve vytvoření suspenze ze zkoušených vzorků a následném změření pH vytvořené suspenze pH metrem. Vzorky byly před stanovením pH podrceny na jemné frakce (viz. Obrázek 25), z těch byla vytvořena suspenze, u níž byla stanovená hodnota pH pomocí pH metru.

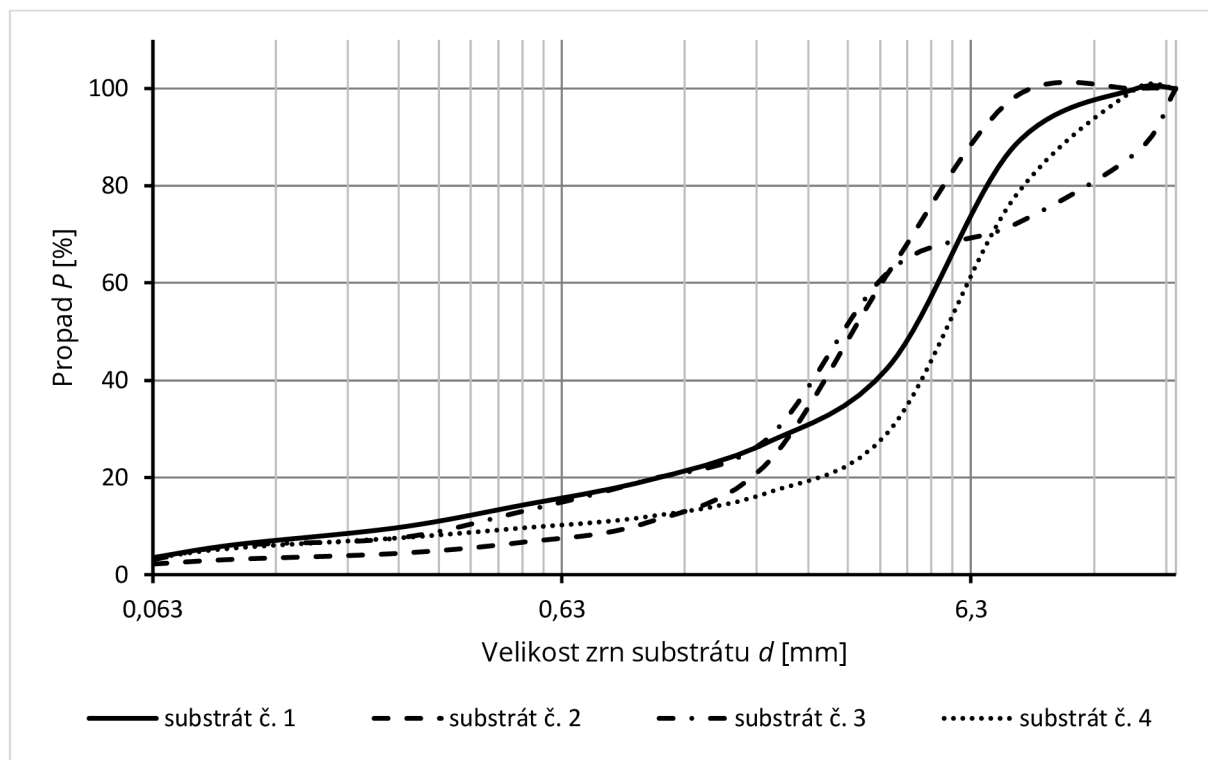
Tabulka 4: Stanovené hodnoty pH střešních substrátů.

Střešní substrát	pH [-]
Substrát č. 1	5,21
Substrát č. 2	6,09
Substrát č. 3	9,14
Substrát č. 4	8,87

6.1.1.4 Stanovení zrnitosti

Velikost pevných částic střešních substrátů a především zastoupení jejich jednotlivých frakcí může mít vliv na hodnoty vlhkosti měřené jednotlivými měřicími přístroji, proto byla sestavena křivka zrnitosti pro jednotlivé střešní substráty dle ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.

Vzorek substrátu vysušený v sušárně při 105 °C do konstantní hmotnosti, byl mechanicky prosíván vibračním přístrojem přes sadu sít o velikosti ok (16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063) mm. Následně byly zváženy zůstatky na jednotlivých sítích, přepočteny na procentuální zastoupení a vypočteny celkové propady síty.



Obrázek 26: Křivky zrnitosti střešních substrátů.

6.2 DISKUSE VHODNOSTI KOMERČNĚ UŽÍVANÝCH METOD MĚŘENÍ VLHKOSTI PRO STANOVENÍ V SUBSTRÁTECH ZELENÝCH STŘECH

6.2.1 Vhodnost metod

Měření vlhkosti v substrátech zelených střech může být problematické, vzhledem k výšce substrátů. Přístroje, které se ke stanovení vlhkosti v půdě běžně užívají, mají určitý rozsah měření a při tloušťce substrátu v řádech jednotek centimetrů mohou být naměřené hodnoty ovlivněny například drenážní nebo jinou podkladní vrstvou na střeše.

Nejpoužívanější metodou pro stanovení vlhkosti zemin je metoda gravimetrická. Jelikož se jedná o metodu přímou, není potřeba provádět srovnávací měření, ale jedná se zároveň o metodu destruktivní. Vzhledem k tomu není vhodná pro dlouhodobé sledování vlhkosti ve střešních substrátech. Je také časově náročná, ale výsledné hodnoty vlhkosti mají vysokou přesnost. V rámci této práce bude proto využita při vytváření kalibračních vztahů pro nepřímé metody.

Mezi přímé metody stanovení vlhkosti patří také pyknometrická metoda, která stejně jako metoda gravimetrická vykazuje vysokou přesnost hodnot. Opět vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o destruktivní metodu, není vhodná pro dlouhodobé sledování vlhkostí v substrátech zelených střech.

Tenzometrické měření umožňuje připojení elektrického tlakoměru a tím provádění automatického záznamu měřených hodnot v čase. Přístroj navíc není potřeba kalibrovat na daný typ půdy, ale pro převod vodního potenciálu na vlhkost je potřeba znát retenční křivku půdy. Přístroj také vyžaduje dokonalý kontakt s půdou, což může být sypkých substrátů problém. Vzhledem k rozměrům přístroje extenzivně ozeleněné střechy nemají minimální potřebnou výšku pro užití této metody. V důsledku toho a také v důsledku dlouhé doby odezvy, kvůli nutnosti vyrovnání tlaků, tato metoda nebude použita v rámci diplomové práce.

Metody založené na odporovém principu, ať už se jedná o sádrové bločky nebo o metodu GMS vykazují vysokou přesnost měření, jednoduchost stanovení a po jejich zabudování do zeminy není potřeba žádná údržba. Přesnost měřených hodnot se vzrůstající vlhkostí klesá, ale vzhledem k tomu, že střešní substráty běžně, v závislosti na srážkách, vykazují nízké hodnoty vlhkosti, je tato nevýhoda částečně kompenzována. Další nevýhody, jako například dlouhá doba odezvy u sádrových bloček nebo vliv kontaminace jílovitými částicemi, stejně jako rozpad materiálu snímačů, lze vykompenzovat výběrem vhodnějších snímačů. Odporová metoda byla použita v rámci této diplomové práce.

Gamaskopická metoda nepřímo měří změnu objemové hmotnosti v důsledku zaplnění vzduchových pórů vodou, tudíž počítá s konstantní objemovou hmotností samotného substrátu. Zelené střechy jsou ovšem vždy minimálně pochozí, pro přístup kvůli případným opravám a podobně. Substrát na střeše je také zatěžován povětrnostními vlivy a jeho objemová hmotnost se tedy v čase mění. Gama záření je navíc zdraví nebezpečné, proto je tato metoda vhodná spíše pro stanovení vlhkosti v laboratorním nebo jiném specializovaném prostředí, kde je záření odstíněno komorou, ve které se měření provádí. Vzhledem ke vzniku záření je ovšem metoda nepoužitelná ve střešních substrátech a proto nebyla použita ani v této práci.

Obdobně jako gamaskopická metoda je i neutronová sonda založena na vyzařování částic. Z důvodu vysoké kinetické energie neutronů je navíc neutronová radiace považována za nejnebezpečnější. Sondu proto mohou obsluhovat pouze speciálně vyškolení pracovníci

a i když sondu není potřeba kalibrovat na danou půdu, nelze jí provádět kontinuální měření. Stanovení vlhkosti přibližně do hloubky 0,2 m jsou navíc zkreslená a tato metoda tedy není použitelná ve střešních substrátech, proto nebyla použita v rámci této práce.

Metoda založená na stanovení relativní permitivity, tedy kapacitní metoda je velmi přesná a vlhkost lze pomocí ní trvale monitorovat v čase, tudíž je vhodná pro dlouhodobé měření ve střešních substrátech. Citlivost této metody na obsah jílových částic by při stanovení vlhkosti ve střešních substrátech neměla způsobovat potíže, jelikož substráty mají zpravidla jen velmi nízký obsah těchto částic. Sondu je sice nutné kalibrovat na daný typ půdy, avšak vzhledem k variabilitě sond byla tato metoda vybrána pro měření vlhkosti v rámci diplomové práce.

Metoda pulsní reflektometrie, která je stejně jako kapacitní metoda založena na určení permitivity zkoumaného prostředí, s tím rozdílem, že se měří rychlost šíření vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu. Na stejném principu je založeno také měření přenosu v časové oblasti. Vzhledem k podobnosti obou metod s kapacitní metodou mají metody TDR i TDT obdobné parametry a charakteristiky, jako metoda kapacitní a proto nebyly použity v rámci této práce.

Obdobou metody TDT je také metoda fázového posunu, která také nepřímo stanovuje relativní permitivitu prostředí. Metoda je tedy stejně jako kapacitní, TDR nebo TDT velmi přesná a stejně tak je nutné nejprve provést kalibraci na daný typ půdy. Je určena pouze pro zabudování a dlouhodobé měření vlhkosti. Vzhledem k nutnosti dodržení konstantní vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem elektromagnetických vln a také k jejich rozměrům, není tato metoda vhodná pro měření vlhkosti ve střešních substrátech v rámci této diplomové práce.

6.2.2 Alternativní metoda stanovení vlhkosti střešních substrátů

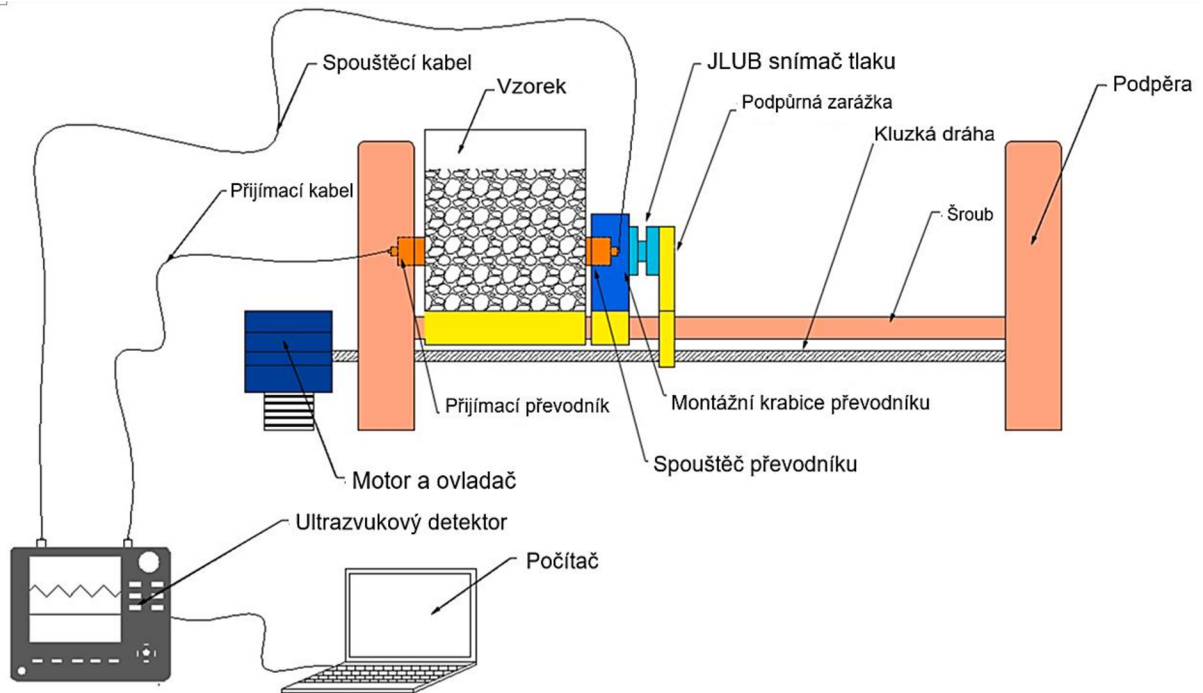
Vybranými metodami pro měření vlhkosti v rámci této diplomové práce byly odporová a kapacitní metoda, ostatní nejběžněji užívané metody byly vyhodnoceny jako nevhodné pro použití v rámci této diplomové práce. Navržena proto byla další, k danému účelu dosud v praxi nevyužívaná, ultrazvuková metoda.

Ultrazvuk se běžně ve stavebnictví užívá k měření vzdálenosti, ale také k měření vlhkosti, ovšem především ve zdivu. Princip měření spočívá v generování ultrazvukových impulzů vysílačem, jejich průchod zkoumaným vzorkem a následné snímání přijímačem. Ultrazvuková vlna se odráží od všech předmětů s hustotou vyšší, než vzduch [48]. Rychlost průchodu vlny se zvyšuje s rostoucí hustotou, respektive objemovou hmotností a také s teplotou, vlhkostí nebo nadmořskou výškou.

Jako třífázový, heterogenní, porézní systém obsahuje půda komplexní fyzikální informace a značné množství těchto informací mohou zprostředkovat právě ultrazvukové vlny. Při jejich průchodu půdou se změny obsahu půdní vlhkosti projevují ve změnách ultrazvukových parametrů. Vzhledem k tomu představuje ultrazvuková pulzní technologie alternativní metodu stanovení obsahu vlhkosti v půdě.

Na strojní fakultě South China Agricultural University se v roce 2021 skupina vědců zabývala vytvořením modelu, který by popisoval obsah půdní vlhkosti v zemědělské půdě jako funkci rychlosti ultrazvukového vlnění a objemové hmotnosti [2]. V rámci výzkumu byly simulovány venkovní dešťové podmínky pro zavedení různého obsahu vlhkosti ve vzorcích a vzorky poté vysychaly v přirozeném prostředí. Půda byla odebírána z trvale obdělávané

zemědělské oblasti v hloubce 0 až 15 cm. Vzorky byly umístěny v měřicí plošině, viz. Obrázek 27, kde docházelo ke stlačení dokud nebylo dosaženo zvoleného tlaku. Ve stěnách kontejneru byly umístěny ultrazvukový vysílač a přijímač. Akustická časová přesnost tohoto detektoru je $\pm 0,1 \mu\text{s}$ a perioda vzorkování se pohybuje od 0,05 do 6,4 μs ; napětí vysílacího impulsu lze nastavit na 65, 15, 250, 500 nebo 1000 V a šířka vysílacího impulsu se pohybuje od 0,02 do 40,9 ms. Vzhledem k tomu, že délka nádoby na vzorky půdy je 20 cm, lze přijímat stabilní ultrazvukové signály při frekvenci 50 kHz, proto byla frekvence nastavena na 50 kHz.



Obrázek 27: Strukturní schéma ultrazvukového zařízení pro detekci vlhkosti půdy [2].

Práce poskytuje nový přístup k vytvoření komplexního a jednotného modelu stanovení obsahu vlhkosti půdy a očekává, že tato metoda měření bude použita k dosažení dlouhodobého sledování obsahu vody v kultivované vrstvě na polích se zabudovanými zařízeními pro detekci vlhkosti. Vzhledem k široké variabilitě půd a rozsahu půdní vlhkosti in situ je však zapotřebí dalšího výzkumu pro vývoj modelu s vysokou přesností za různých podmínek řízení závlah pro zemědělské půdy s různými požadavky na vlhkost půdy [2]. Model realizovaný jihočínskými vědeckými pracovníky má aplikační potenciál v několika oblastech, i když provedené experimenty zatím byly omezeny na laboratorní podmínky.

Na základě informací dosažených na South China Agricultural University byla ultrazvuková metoda zařazena mezi metody hodnocené v rámci této práce.

6.3 ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

6.3.1 Vybrané měřicí metody a zařízení

6.3.1.1 Odporová metoda – Z-metr IV

Jako první metoda pro měření vlhkosti v substrátech byla zvolena metoda odporová. Za účelem měření odporovou metodou byl z Ústavu vodních staveb zapůjčen přístroj Z-metr IV. Jedná se o čtvrtou generaci přístroje Z-metr, který byl navržen a realizován v rámci projektů EUREKA [49]. Měřicí systém umožňuje měření hodnot elektrické impedance, což je komplexní veličina elektrického obvodu bránící průchodu elektrického proudu. Elektrická impedance měřená přístrojem Z-metr IV je vyjádřena ve složkovém tvaru, kde reálnou složkou je rezistence – elektrický odpor (primárně odpovídá obsahu vody v prostředí, tj. lze kalibrovat na vlhkost) a imaginární složkou je reaktance (v zeminách při vyloučení parazitních vlivů má kapacitní charakter a odpovídá struktuře prostředí).

Základní měřicí jednotka přístroje s označením MEA-ZMT4 je tvořena 32bitovým výkonným mikroprocesorem s jádrem Cortex-M3, který pracuje na frekvenci 120 MHz a má kapacitu 1 MB paměti flash a 128 kB paměti RAM [50]. Dva dobíjecí průmyslové akumulátory typu Li-Ion slouží jako zdroj energie, jejich kapacita je dostatečná pro 16hodinový kontinuální provoz. Dobíjet lze přístroj napájecím adaptérem ze sítě nebo přes rozhraní USB, ať už z powerbanky, počítače či jiného elektronického zařízení. Komunikace mezi uživatelem a Z-metrem je zajištěna displejem LC a klávesnicí, díky které je možné měnit nastavení přístroje včetně seřízení automatického provozu. Manipulovat s daty lze také před rozhraní Bluetooth, přístroj je stavěn pro Globální systém mobilní komunikace (GSM) s bezdrátovým připojením k Wi-Fi. K ukládání dat slouží paměťová karta SD, na kterou se data ukládají v textovém souboru, jejich následné zpracování se zpravidla provádí v programu MS Excel.



Obrázek 28: Modulární systém Z-meter IV, MEA-ZMT4 – základní měřicí jednotka [49].

Tabulka 5: Technické údaje modulárního systému Z-meter IV a adaptéru (43).

MEA-ZMT4 - základní měřicí jednotka	
Základní přesnost	±2 % z rozsahu
Zobrazení	LCD
Ovládání	Variabilní
Provozní teplota okolí	-20 až +40 °C, bez kondenzující vlhkosti
Rozměry	Délka 21,2 cm × šířka 9,6 cm × výška 3,5 cm
Hmotnost	496,5 g
Specifikace elektrické měřicí části	
Měřicí rozsah impedance	10 Ω – 1 MΩ
Měřicí frekvence	100 Hz – 200 kHz
Volba rozsahů	Automatická
Interní přepínač	Až 16 kanálů
Externí přepínač	Až 256 kanálů
Volitelné automatické spouštění – vestavěnou klávesnicí nebo externě z mobilní aplikace	
Možnost připojit sadu čidel pro měření teplot	
Specifikace komunikace s okolím	
Základní komunikační rozhraní	USB 2.0, Bluetooth
Výstupní formát datového souboru	Textový csv soubor
Možnost připojit GSM modem pro dálkový přenos dat a dálkové ovládání přístroje	
Napájení	
Napájení	Bateriové - liion akumulátory
Doba kontinuálního provozu	Až 16 h
Možnost dlouhodobého autonomního provozu na lokalitě při dobíjení ze solárního panelu.	
Napájecí (nabíjecí) napětí	5 V, max 1,5 A, USB kompatibilní

Snímání elektrického odporu bylo zajištěno dvěma typy sond. První z nich, která byla užitá na všech pěti zkoumaných střechách, je určena k měření povrchové vlhkosti, zatímco hloubková sonda umožňuje měření ve více výškových úrovních. Z fyzikálního hlediska se jedná o sondy pasivní, jelikož neobsahuje žádný aktivní prvek, jako například generátor signálu nebo napěťový zdroj apod. Působením vlhkosti dochází ke změně charakteristik měřeného prostředí a právě tyto změny určují míru hodnoty elektrického odporu [51]. Délku měřicí elektrody i jejich počet na sondě lze měnit. Tyčová sonda užitá v této práci obsahuje šest měřicích elektrod, které tvoří vodivou část sondy a je s ní tedy možné měřit v šesti různých výškových stupních. Obal elektrod je vytvořen z nerezové oceli, aby bylo zamezeno negativnímu působení vody obsažené v zeminách, má průměr 0,025 m a tloušťku stěny

0,001 m. Poloha jednotlivých elektrod je v sondě daná a zajišťují ji distanční prvky tvořené polyamidovou trubicí, které navíc slouží jako izolant, který usměrňuje elektrický signál. Hloubková sonda byla užitá na střeše s intenzivním ozeleněním, u níž výška substrátu dosahuje 0,20 m.



Obrázek 29: Měřicí sondy Z-metru, povrchová sonda vlevo a hloubková sonda vpravo [49].

Je-li pro měření použita pouze jedna dělená tyčová sonda, je nutné použít adaptér pro měření na jedné sondě, který byl vyvinut pro měřidla Z-metr typové řady čtyři. Ten propojuje přístroj s měřicí sondou pomocí konektorů CANON [49].

Tabulka 6: Z-metr IV – adaptér pro měření na jedné sondě [49].

Technické údaje adaptéru pro měření na jedné sondě	
Maximální počet měřicích kanálů	24
Rozměry	(63 × 53 × 34) mm
Hmotnost	67,2 g



Obrázek 30: Z-meter IV – adaptér pro měření na jedné sondě [49].

6.3.1.2 Kapacitní metoda – Datalogger MicroLog SDI-MP

Druhou zvolenou metodou byla metoda kapacitní, při které byl využit Datalogger MicroLog SDI-MP, dva snímače Truebner SMT100 a jeden snímač CS655. Datalogger je určen ke sbírání dat, které lze vyhodnocovat softwarem Mini32, který je dostupný pro Windows 7, 8 a 10. Jedná se o graficky orientovaný software pro vizualizaci a zpracování dlouhodobě měřených datových řad [52]. Data lze v rámci softwaru zpracovávat například

jako multiregresní analýzy až do dvaceti parametrů, histogramy rozdělení četností, kreslení vertikálních profilů, vytváří grafy a exportuje data do různých formátů souborů.

Datalogger MicroLog SDI-MP je malý záznamník dat s infračerveným bezdrátovým přístupem k datům a energeticky nezávislou pamětí. Přijímá data ze všech snímačů, které jsou podporované softwarem Mini32

Tabulka 7: Datalogger MicroLog SDI-MP, technické parametry [53].

Specifikace přístroje	
Vstup	SDI-12 ver. 1.3
Velikost paměti	256 kB
Paměťová kapacita	100 000 záznamů
Přesnost (při teplotě od -10 do 40 °C)	±15 s/měsíc
Maximální počet připojených senzorů	10 (max. 20 proměnných)
Intervaly měření	1 minut až 4 hodiny
Intervaly ukládání	1 minuta až 4 hodiny
Stupeň ochrany	IP68
Velikost (průměr × délka)	(70 × 45) mm (včetně konektorů)
Hmotnost	100 g
Teplota provozního prostředí	-40 až +60 °C
Vlhkost provozního prostředí	0 až 100 %
Baterie	SAFT LS14500
Připojení snímače	3-pin Switchcraft EN3 P3 connector female



Obrázek 31: Datalogger MicroLog SDI-MP [53].

Kapacitní senzory byly dlouhodobě uloženy v substrátu na třech experimentálních střeších. Na datalogger byly napojeny celkem tři senzory, dva z nich byly senzory SMT100. Ty jsou navrženy k měření vlhkosti v zemědělských půdách a také obsahují senzor teploty.

Tabulka 8: Technické parametry senzoru SMT100 [54].

Technická specifikace SMT100	
Přesnost	Objemový obsah vody v půdě: <ul style="list-style-type: none">• Při továrním nastavení ± 3 % v minerálních půdách se střední salinitou od 0 do 50 %.• Při specifické kalibraci až 1 %.
Rozlišení	0,1 % objemového obsahu vody (nebo lepší) 0,01 °C (nebo lepší)
Rozsah	0 až 60 % objemového obsahu vody v půdě (až 100 % objemového obsahu s omezenou přesností) při teplotě -40 až +80 °C
Napájení	Až 40 mA během měření Doba měření: méně než 50 ms
Délka kabelu	10 m
Rozměry snímače	18,2 × 3 × 1,2 cm



Obrázek 32: SMT100 – Senzor vlhkosti a teploty půdy [54].

Třetím zapojeným snímačem byl CS655. Tento snímač tvoří dvě 12 cm dlouhé tyčové elektrody vyrobené z nerezové oceli, které jsou připojeny k desce, kde je zabudována veškerá elektronika. Měří jak dobu šíření a útlum signálu, tak také teplotu, z těchto hodnot poté lze odvodit permitivitu dielektrika, objemový obsah vody a objemovou elektrickou vodivost.



Obrázek 33: CS655 – snímač objemové půdní vlhkosti [55].

Tabulka 9: Specifikace snímače CS655 [55].

Technické parametry	
Snímaný objem půdy	3600 cm ³ (poloměr ~ 7,5 cm kolem každé elektrody sondy a 4,5 cm za koncem elektrody)
Rozsah provozních teplot	-50 až +70 °C
Doba měření	3 ms
Maximální možná délka kabelu	500 m - k jednomu kabelu lze připojit až 25 senzorů
Mechanické rozměry	
Rozteč tyčových elektrod	32 mm
Průměr tyčové elektrody	3,2 mm
Délka tyčové elektrody	120 mm
Rozměry těla sondy	(85 × 63 × 18) mm
Hmotnost sondy	270 g
Elektrická vodivost	
Proudový odběr při měření (3 ms)	35 až 80 mA
Rozsah pro půdy	0 až 8 dS·m ⁻¹
Přesnost	±5 %
Relativní dielektrická permitivita	
Rozsah	1 až 81
Přesnost	±3 %
Objemový obsah vody	
Rozsah	0 až 100 %
Přesnost	±1 %
Teplota půdy	
Rozsah	-50 až +70 °C
Přesnost	±0,1 °C

6.3.1.3 Ultrazvuková metoda – Pundit Lab

Poslední zkušební metodou byla metoda ultrazvuková, pro kterou byl užit přístroj Pundit Lab, který slouží pro laboratorní provoz. Přístroj byl navržen především pro korelaci pevnosti betonu a hornin v tlaku, korelaci k modulu pružnosti hornin, mapování homogenity betonu a odhadu pevnosti betonu [56]. Přesnost měření je v případě tohoto přístroje závislá na přesnosti stanovení vzdálenosti (tedy délky dráhy) mezi snímači. Akustická vazba snímačů

se vždy před započítím měření musí otestovat pomocí nanesení tenké vrstvy spojovacího materiálu a srovnávacího vzorku, u kterého je známa rychlost šíření ultrazvukové vlny. Přístroj je také vybaven malou obrazovkou, která zobrazuje a v reálném čase zpracovává data.

Tabulka 10: Ultrazvukový přístroj Pundit Lab, technická specifikace [56].

Měření doby průchodu vlny	
Rozsah	0,1–9 999 μ s
Rozlišení	0,1 μ s
Display	79 × 21 m
Vysílač	Budící impulzy 125, 250, 350 a 500 V nebo automaticky
Přijímač	
Šířka pásma	20–500 kHz
Paměť	>500 naměřených hodnot
Nastavení	Podporovány jsou metrické a imperiální jednotky
Zdroj napájení	
Baterie	4× AA baterie (>20 hodin nepřetržitého používání)
Sít	5 V, <500 mA přes USB nabíječku
Mechanické údaje	
Rozměry	(172 × 55 × 220) mm
Hmotnost	1,3 kg (včetně baterií)
Prostředí měření	
Provozní teplota	-10 až +60 °C
Vlhkost vzduchu	<95 % (nekondenzující)



Obrázek 34: Testovací ultrazvukový přístroj Pundit Lab určený pro laboratorní provoz [56].

Na přístroj jsou napojeny dvě sondy, jedna funguje jako vysílač ultrazvukového vlnění a druhý jako přijímač. Aby metoda správně fungovala, musí být splněna podmínka vhodného přenosu vlnění z vysílače ultrazvukových vln do zkoušeného materiálu a ze zkoušeného materiálu do snímače. Vlastní pracovní kmitočet sond má rozsah od 20 do 150 kHz [57].



Obrázek 35: Sondy vysílající a snímající ultrazvukové vlny [56].

6.3.2 Kalibrace jednotlivých zařízení

Substráty, které byly zkoumány v rámci této práce vykazovaly rozličné vlastnosti, ať už objemové hmotnosti, nasákavosti, zrnitosti apod. Vzhledem ke skutečnosti, že tyto charakteristiky mají vliv na veličiny měřené rozdílnými metodami a užitými přístroji a že se jedná o metody nepřímé, bylo nejprve potřeba v případě každého přístupu k měření provést kalibraci.

Kalibrace je činnost, prováděná za specifikovaných podmínek, při níž se nejprve stanoví vztah mezi hodnotami veličin s nejistotami měření a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. Následně jsou tyto informace použity ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. Kalibrací se tedy upravují metrologické charakteristiky přístroje [58]. Kalibrace tedy představuje soubor činností, které za definovaných podmínek umožňují sestavit vztah mezi hodnotami veličin měřenými nepřímými metodami a odečítanými na přístroji a odpovídajícími údaji sledované veličiny. Na základě těchto informací lze sestavit kalibrační vztah mezi jednotlivými veličinami [59].

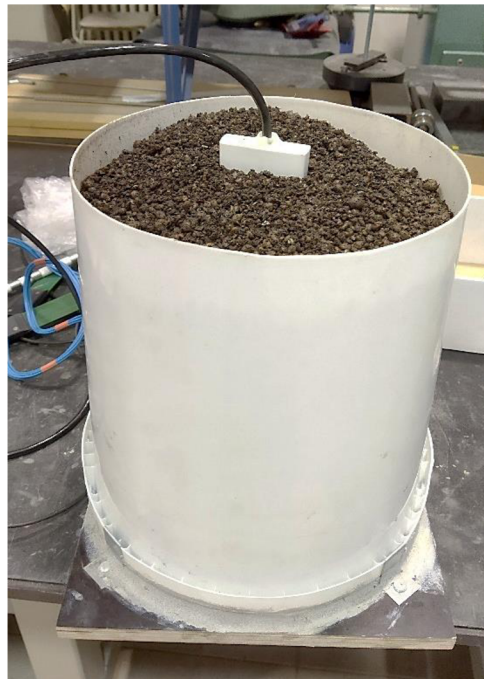
6.3.2.1 Postup měření pro kalibraci odporových a kapacitních přístrojů

Kapacitní a odporové měřiče byly kalibrovány stejným postupem. Měřené hodnoty mohou být v případě obou metod, vzhledem k vysílání a přijímání pulzů, ovlivněny odraz od stěn či dna nádob, ve kterých je měření prováděno. Na základě dosahu jednotlivých sond byla proto navržena a vyrobena nádoba s dostatečnými rozměry tak, aby i s rezervou bylo zajištěno, že naměřené hodnoty nebudou ovlivněny. Vysílané impulzy mají tvar kruhů, proto byl pro nádobu zvolen tvar válce, a to o průměru 0,25 m a výšce 0,3 m. Stěna je plastová, nevede elektrický proud a je nesmáčivá a nenasákavá, dno bylo vytvořeno z překližky opatřené nátěrem a je tudíž stejně tak nevodivé a nenasákavé. Plastový válec byl elektricky inertním dvousložkovým lepidlem upevněn na desku.



Obrázek 36: Nádoba vytvořená pro kalibraci kapacitních a odporových přístrojů.

Nádoba byla vždy naplněna daným substrátem, který byl vysušen při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti, do minimální stanovené výšky tak, aby nebyly měřené hodnoty ovlivněny odrazem pulsů ode dna. Do vzorku byla vložena sonda a u jednotlivých metod byly změřeny buď odpor nebo permitivita. Do vzorku bylo následně přidáno 5 % hmotnosti vody a vzorek byl ručně homogenizován minimálně po dobu deseti minut, aby bylo zajištěno homogenní rozdělení vody po celém objemu vzorku. Opět byly měřeny veličiny oběma metodami, poté byl z vlhkého substrátu odebrán vzorek pro stanovení hodnoty vlhkosti gravimetrickou metodou. Při každé vlhkosti bylo měření opakováno pětkrát a naměřené hodnoty průměrovány, pro dosažení vyšší přesnosti. Postup byl opakován, v každém kroku bylo vždy přidáno 5 % vody.



Obrázek 37: Laboratorní měření vlhkosti pro kalibrační přístrojů.

K naměřeným hodnotám odporu a permitivity byly přiděleny vlhkosti substrátů stanovené gravimetrickou metodou. Následně byly všechny hodnoty vyneseny do kalibračních křivek, pro které byly vytvořeny kalibrační vztahy pro jednotlivé přístroje.

6.3.2.2 Postup měření pro kalibraci ultrazvukového měřiče

Ultrazvukové přístroje pro stanovení nevyužívají žádnou elektrickou či dielektrickou veličinu, tak jako předchozí metody, ale pracují s průchodem ultrazvukových vln vzorkem substrátu. Vzhledem k odlišnému principu měření byl i postup kalibrace rozdílný.

Ultrazvuková metoda se zakládá na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění ve vzorku. Z ní lze poté určovat různé fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln sledovanou charakteristikou. Při měření byl použit kmitočet 54 kHz.

Uspořádání sond bylo nejprve voleno jako nepřímé, kdy byly vysílač i přijímač ultrazvukových vln umístěny na stejné straně vzorku, čímž byly měřeny povrchové vlny. Vzorky byly vkládány do ocelové formy, o šířce 0,1 m, délce 0,32 m a hloubce 0,10 m, s tloušťkou stěn 0,01 m, která běžně slouží k vytváření vzorků z cementového kompozitu. Ve formě byly ovšem odstraněny vnitřní přepážky, aby bylo dosaženo většího objemu vzorku a tím umožněno povrchové měření. Tímto způsobem bylo měření prováděno na třech různých vzorcích, ale ani v jednom případě, v důsledku nehomogenity střešních substrátů, nebylo možné naměřit hodnoty průchodu vlny. Nepřímé uspořádání sond tedy nebylo možné použít.



Obrázek 38: Vzorek vytvořený pro povrchové měření ultrazvukem.

Následně byly sondy uspořádány pro prozvučování přímé, při kterém jsou vysílač i přijímač ultrazvukových vln umístěny na protilehlých stranách proti sobě. Pro toto měření byla využita jiná forma, která byla dříve vytvořena za účelem stanovení vlastností maltových směsí ultrazvukovými metodami měření. Jedná se o dřevěnou formu s protilehlými otvory vytvořenými pro vsunutí budiče a snímače. Délka formy je 0,15 m, šířka 0,08 m a hloubka 0,08 m, ve dvou kratších protilehlých stěnách nádoby jsou vyřezány otvory kruhového tvaru o průměru 0,05 m.



Obrázek 39: Nádoba užitá pro kalibraci ultrazvukového přístroje.

Forma byla naplněna vzorkem substrátu a následně byl změřen čas průchodu ultrazvukové vlny. Poté byl vzorek vysušen v sušárně do konstantní hmotnosti, pro stanovení vlhkosti. Takto bylo od každého ze čtyř zkoumaných substrátů vytvořeno minimálně pět vzorků. Při vytváření kalibračních vztahů byly ze zpracovávaných souborů měřených dat vyloučeny hodnoty vykazující odchylky větší než $\pm 5\%$ od průměrné měřené hodnoty.

Rychlost šíření impulzu ve vzorku byla vypočtena ze vztahu dle ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu:

$$v_L = \frac{L}{T}$$

Kde v_L ... rychlost impulzu [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$];

L ... délka měřicí základny [mm];

T ... čas, který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou.



Obrázek 40: Měření průchodu ultrazvukových vln vzorkem substrátu.

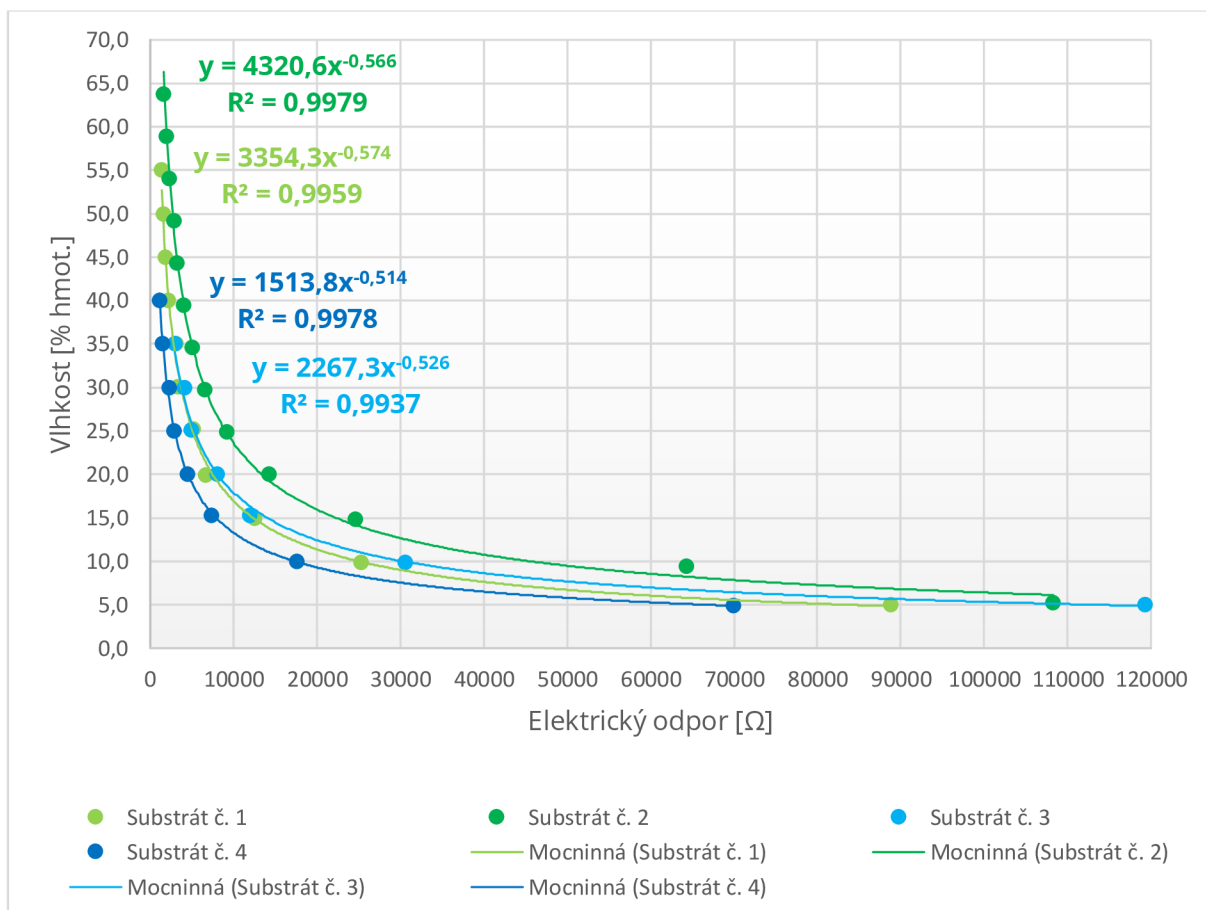
6.3.2.3 Naměřené hodnoty a kalibrační křivky

Zvolené metody stanovení vlhkosti ve střešních substrátech, kterými byly metoda odporová, kapacitní a ultrazvuková. Jedná se o metody nepřímé, proto byly kalibrovány. V Tabulkách 11, 12 a 13 jsou u jednotlivých střešních substrátů uvedeny hodnoty veličiny měřené přístrojem a odpovídající hodnota vlhkosti stanovená gravimetricky. Stanovené hodnoty byly vyneseny do grafů a pokud měřené veličiny vykazovaly závislost na vlhkosti, byly pro ně vytvořené kalibrační křivky, které jsou zobrazeny na Obrázcích 41, 42, 43, 44, 45 a 46.

Tabulka 11: Hodnoty elektrického odporu měřené Z-metrem a stanovená vlhkost substrátu.

Střešní substrát	Elektrický odpor [Ω]	Vlhkost [%]	Střešní substrát	Elektrický odpor [Ω]	Vlhkost [%]
Substrát č. 1	88767	9,8	Substrát č. 2	108264	5,2
	25303	14,9		64283	9,4
	12545	19,9		24576	14,8
	6677	25,2		14189	20,0
	5099	30,1		9233	24,9
	3325	35,1		6475	29,8
	3052	40,0		5079	34,6
	2208	45,0		3976	39,5
	1829	50,0		3184	44,3
	1529	55,0		2859	49,2
1384	60,0	2303	54,0		
Substrát č. 4	69935	4,9	1951	58,9	
	17571	10,0	119300	5,0	
	7340	15,2	30545	9,9	
	4507	20,0	11973	15,3	
	2880	25,0	8023	20,0	
	2226	30,0	4911	25,1	
	1515	35,0	4169	29,9	
	1127	40,0	2938	35,0	

Tabulka 11 obsahuje hodnoty elektrického odporu naměřené přístrojem Z-metr a jim odpovídající hodnoty vlhkosti stanovené gravimetricky. Počet měření se u jednotlivých substrátů liší v důsledku schopnosti vzorků pojmout rozdílné množství vody. Například v případě substrátu č. 3 je naměřeno sedm hodnot, protože vlhkost byla vnášena přibližně po pěti procentech a přidáním další vody do vzorku, na přibližně 40 % vlhkosti, voda po homogenizaci vzorku zůstala na dně nádoby a naměřené hodnoty by tedy nebyly reprezentativní.



Obrázek 41: Kalibrační křivky pro Z-metr.

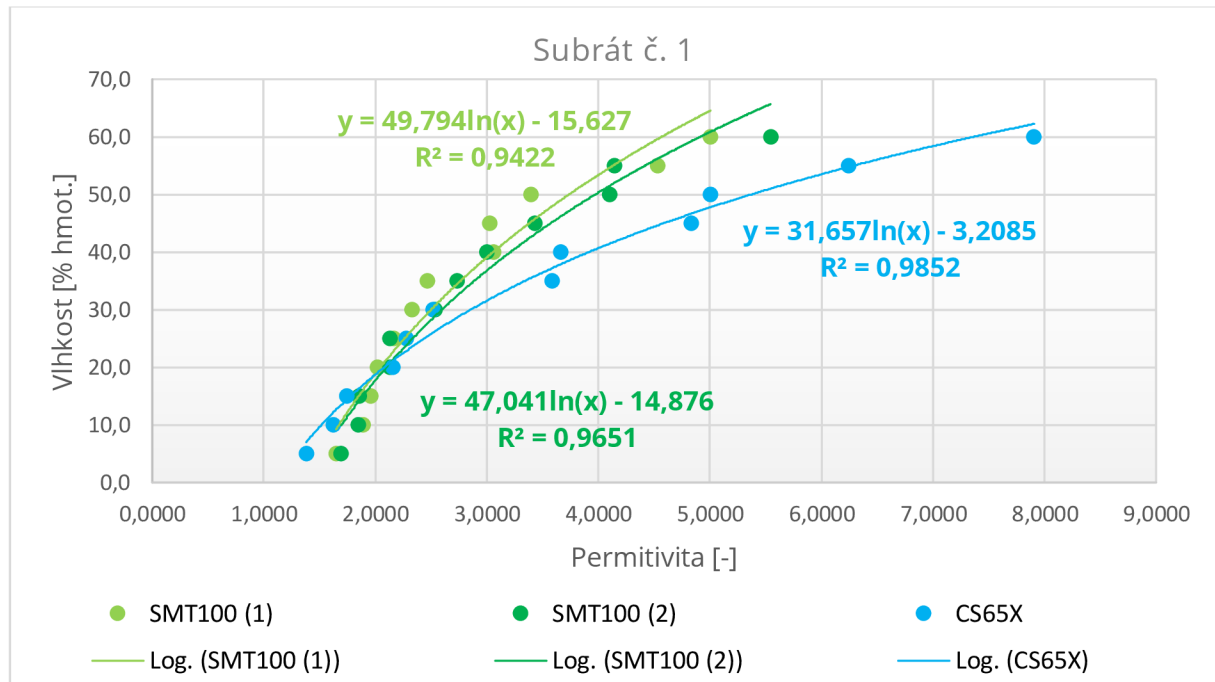
Obrázek 41 zobrazuje závislost hodnot elektrického odporu naměřených Z-metrem a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky. Tato závislost má u všech zkoumaných substrátů exponenciální charakter, kdy se zvyšující se vlhkostí střešního substrátu snižuje hodnota elektrického odporu. Hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů dosahuje přesnosti 99,37 % až 99,79 %.

Tabulka 12: Hodnoty měřené kapacitními snímači a stanovená vlhkost substrátu.

Střešní substrát	Permitivita [-] snímač SMT100 (1)	Permitivita [-] snímač SMT100 (2)	Permitivita [-] snímač CS65X	Vlhkost [%]
Substrát č. 1	1,6478	1,6940	1,3806	5,0
	1,8865	1,8480	1,6250	10,0
	1,9635	1,8557	1,7479	15,0
	2,0174	2,1329	2,1538	20,0
	2,1637	2,1329	2,2737	25,0
	2,3331	2,5333	2,5175	30,0
	2,4640	2,7335	3,5815	35,0
	3,0569	3,0030	3,6660	40,0
	3,0261	3,4265	4,8295	45,0

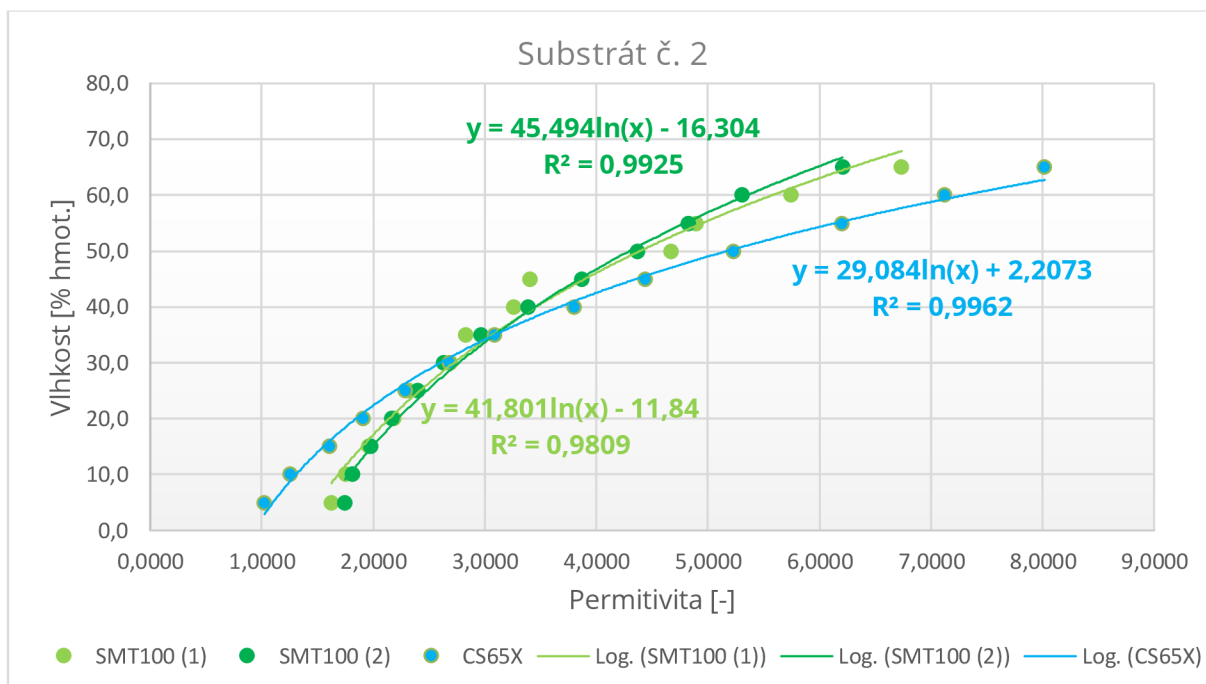
Střešní substrát	Permitivita [-] snímač SMT100 (1)	Permitivita [-] snímač SMT100 (2)	Permitivita [-] snímač CS65X	Vlhkost [%]
Substrát č. 1	3,3957	4,1041	5,0011	50,0
	4,5276	4,1426	6,2459	55,0
	5,0050	5,5430	7,9073	60,0
Substrát č. 2	1,6247	1,7479	1,0244	5,0
	1,7556	1,8172	1,2513	10,0
	1,9635	1,9789	1,6036	15,0
	2,1868	2,1637	1,9084	20,0
	2,3177	2,4024	2,2867	25,0
	2,6950	2,6334	2,6780	30,0
	2,8259	2,9645	3,0843	35,0
	3,2571	3,3880	3,8032	40,0
	3,4034	3,8731	4,4369	45,0
	4,6662	4,3659	5,2254	50,0
	4,8895	4,8279	6,2017	55,0
	5,7442	5,3053	7,1227	60,0
6,7375	6,2062	8,0197	65,0	
Substrát č. 3	1,6247	1,9096	1,5067	5,0
	1,9635	2,0636	1,6016	10,0
	2,0174	2,3870	2,3647	15,0
	2,5256	2,3485	2,5259	20,0
	2,5795	2,5333	2,7898	25,0
	2,7181	2,8336	4,0560	30,0
	3,5574	3,4496	5,6602	35,0
Substrát č. 4	1,7479	1,7864	1,4300	5,0
	2,1175	2,0944	1,7843	10,0
	1,4871	2,2099	2,4388	15,0
	2,4486	2,3177	2,6748	20,0
	2,5564	2,6180	3,0908	25,0
	3,0569	2,9337	3,8604	30,0
	3,8269	3,8654	5,8013	35,0
	4,0579	4,3351	6,7165	40,0

Tabulka 12 obsahuje hodnoty permitivity naměřené kapacitními snímači a jim odpovídající hodnoty vlhkosti stanovené gravimetricky. Hodnoty permitivity byly měřeny třemi různými snímači, dva z nich byly snímače SMT100 a jedním byl snímač CS65X. Každý ze snímačů SMT100 při stejné vlhkosti vzorku vykazoval jinou hodnotu permitivity, proto byly v tabulce označeny jako snímač SMT100 (1) a SMT100 (2), aby nedošlo k jejich záměně. Počet měření se u jednotlivých substrátů, stejně jako v případě měření Z-metrem, liší v důsledku schopnosti vzorků pojmout rozdílné množství vody.



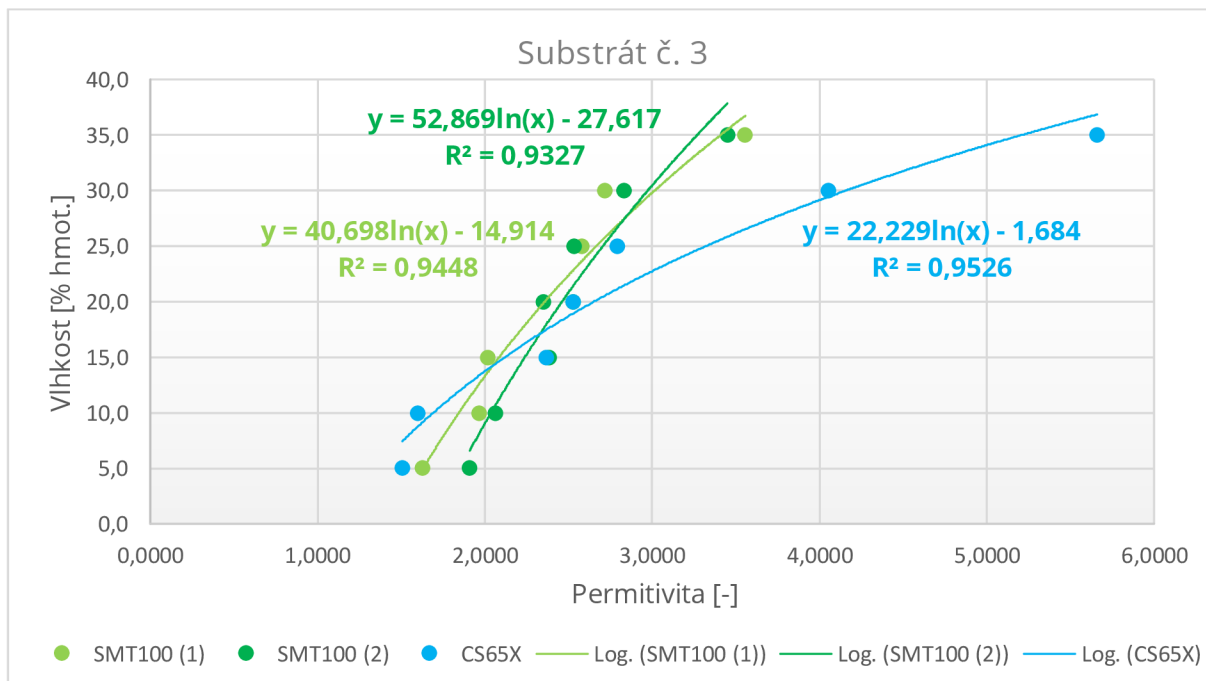
Obrázek 42: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 1.

Obrázek 42 zobrazuje závislost hodnot permitivity naměřených kapacitními snímači SMT100 a CS65X a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky na vzorcích substrátu č. 1. Kapacitní snímače SMT100 byly dva, při totožné vlhkosti ovšem měřily jinou hodnotu permitivity, proto byly v grafu označeny jako snímač SMT100 (1) a SMT100 (2), aby nedošlo k jejich záměně. Závislost u všech tří snímačů má logaritmický charakter, kdy se zvyšující se vlhkostí střešního substrátu zvyšuje také hodnota permitivity a hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů pro substrát č. 1 dosahuje přesnosti 94,22 % až 98,52 %.



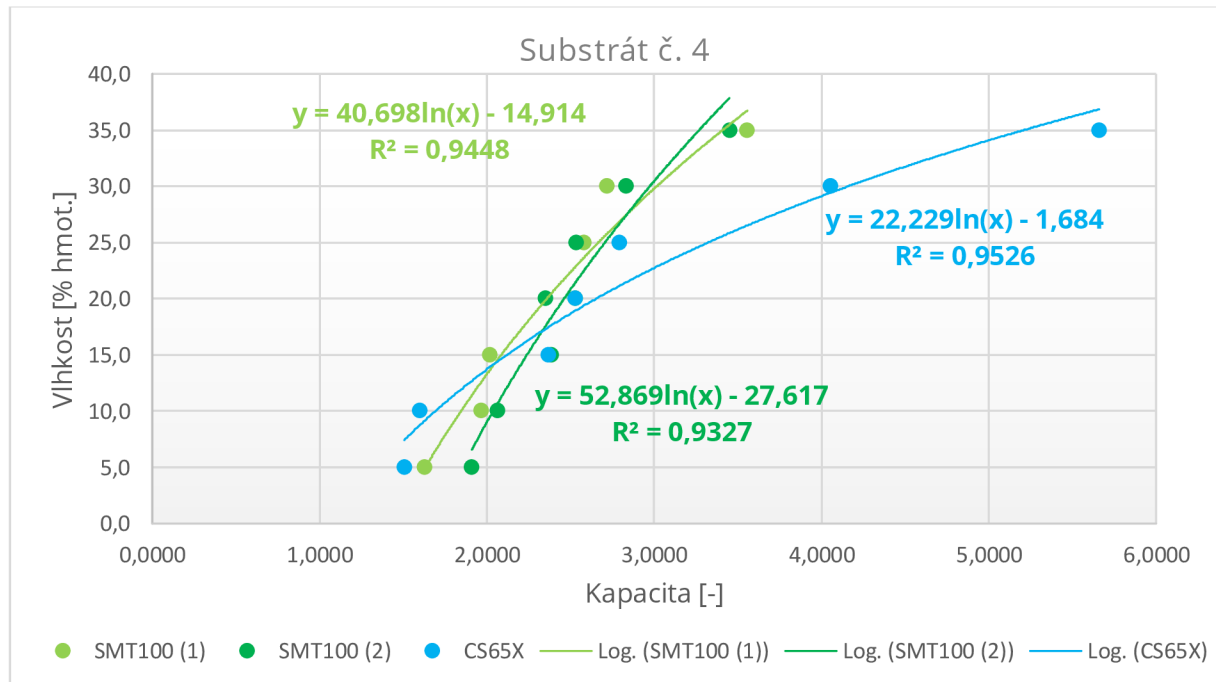
Obrázek 43: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 2.

Obrázek 43 zobrazuje závislost hodnot permitivity naměřených kapacitními snímači SMT100 a CS65X a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky na vzorcích substrátu č. 2. Kapacitní snímače SMT100 byly dva, při totožné vlhkosti ovšem měřily jinou hodnotu permitivity, proto byly v grafu označeny jako snímač SMT100 (1) a SMT100 (2), aby nedošlo k jejich záměně. Závislost u všech tří snímačů má logaritmický charakter, kdy se zvyšující se vlhkostí střešního substrátu zvyšuje také hodnota permitivity a hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů pro substrát č. 2 dosahuje přesnosti 98,09 % až 99,62 %.



Obrázek 44: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 3.

Obrázek 44 zobrazuje závislost hodnot permitivity naměřených kapacitními snímači SMT100 a CS65X a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky na vzorcích substrátu č. 3. Kapacitní snímače SMT100 byly dva, při totožné vlhkosti ovšem měřily jinou hodnotu permitivity, proto byly v grafu označeny jako snímač SMT100 (1) a SMT100 (2), aby nedošlo k jejich záměně. Závislost u všech tří snímačů má logaritmický charakter, kdy se zvyšující se vlhkostí střešního substrátu zvyšuje také hodnota permitivity a hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů pro substrát č. 3 dosahuje přesnosti 93,27 % až 95,26 %.



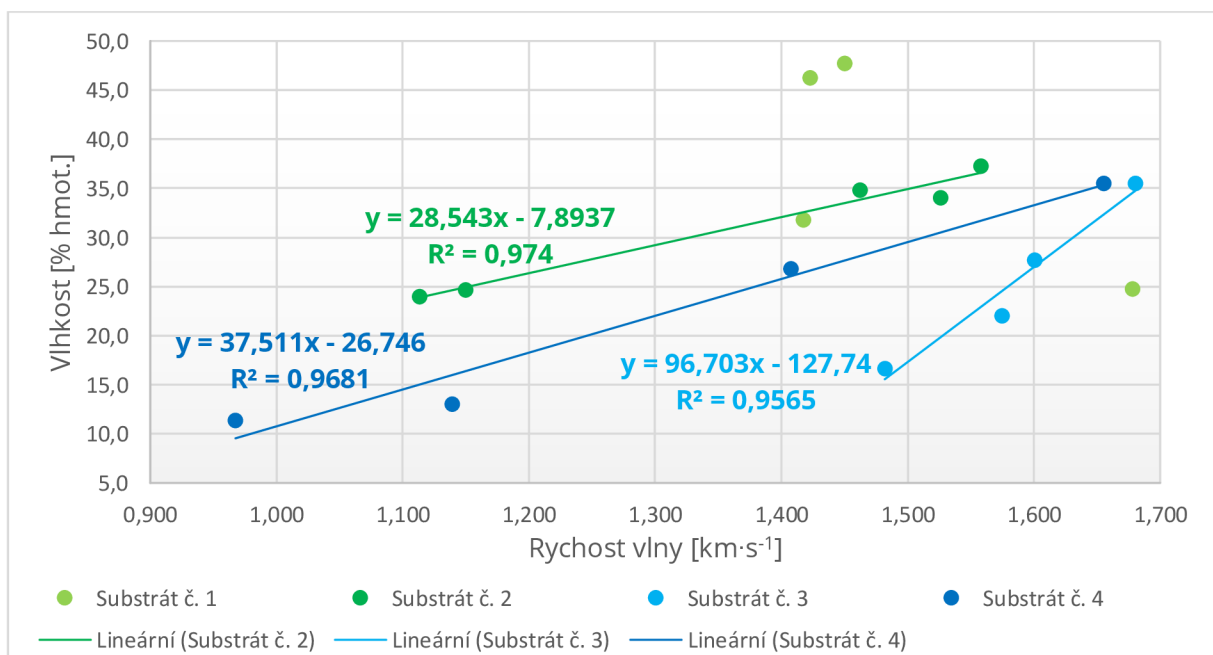
Obrázek 45: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 4.

Obrázek 45 zobrazuje závislost hodnot permitivity naměřených kapacitními snímači SMT100 a CS65X a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky na vzorcích substrátu č. 4. Kapacitní snímače SMT100 byly dva, při totožné vlhkosti ovšem měřily jinou hodnotu permitivity, proto byly v grafu označeny jako snímač SMT100 (1) a SMT100 (2), aby nedošlo k jejich záměně. Závislost u všech tří snímačů má logaritmický charakter, kdy se zvyšující vlhkostí střešního substrátu zvyšuje také hodnota permitivity a hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů pro substrát č. 4 dosahuje přesnosti 93,27 % až 95,26 %.

Tabulka 13: Hodnoty měřené ultrazvukovou metodou a stanovená vlhkost substrátu.

Střešní substrát	Rychlost průchodu ultrazvukové vlny [m·s ⁻¹]	Vlhkost [%]	Střešní substrát	Rychlost průchodu ultrazvukové vlny [m·s ⁻¹]	Vlhkost [%]
Substrát č. 1	1,678	24,7	Substrát č. 3	1,482	16,6
	1,417	31,8		1,575	22,0
	1,423	46,2		1,600	27,7
	1,450	47,7		1,680	35,6
Substrát č. 2	1,114	24,0	Substrát č. 4	0,968	11,4
	1,150	24,7		1,139	13,1
	1,526	34,1		1,407	26,9
	1,462	34,8		1,655	35,5
	1,558	37,3			

Tabulka 13 obsahuje hodnoty rychlosti průchodu ultrazvukové vlny stanovené měřicím systémem Pundit Lab a jim odpovídající hodnoty vlhkosti stanovené gravimetricky. Hodnoty vlhkosti nejsou pravidelné jako v případě Z-metru a kapacitních snímačů, protože měření těmito přístroji probíhá v řádech jednotek sekund, kdežto v případě ultrazvukového zařízení v řádech desítek sekund, což má za následek vysychání připravených vzorků. Počet měření se u jednotlivých substrátů, stejně jako v případě měření Z-metrem a kapacitními snímači, liší v důsledku schopnosti vzorků pojmout rozdílné množství vody. Tabulka neobsahuje hodnoty naměřené při vlhkosti do deseti, v případě některých substrátů až dvaceti procent vlhkosti v důsledku toho, že při tak nízkých vlhkostech měřicí zařízení nebylo možné detekovat průchod ultrazvukových vln zřejmě v důsledku nízké soudržnosti substrátu při nízkých vlhkostech.

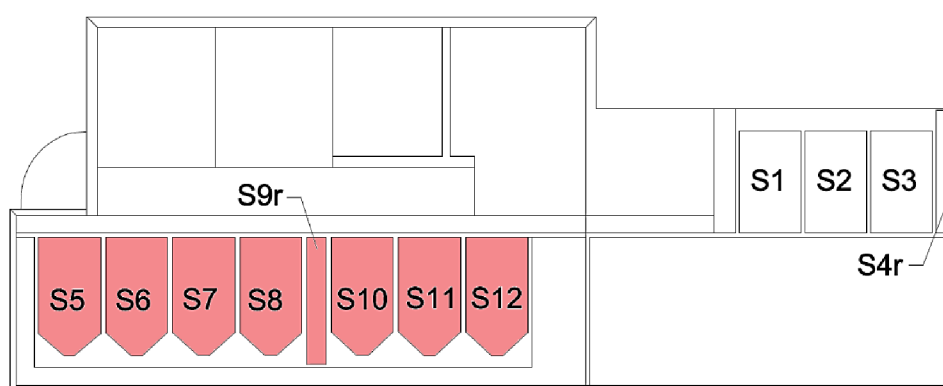


Obrázek 46: Kalibrační křivky pro ultrazvukový signál.

Obrázek 46 zobrazuje závislost hodnot rychlosti šíření ultrazvukové vlny naměřených ultrazvukovým přístrojem Pundit Lab a odpovídajících hodnot vlhkosti stanovených gravimetricky. V případě substrátu č. 1 nebyla nalezena exponenciální, lineární, logaritmická, polynomická ani mocninná závislost. Závislost u zbylých tří substrátů má lineární charakter, kdy se zvyšující se vlhkostí zkracuje doba průchodu ultrazvukové vlny. Hodnota spolehlivosti kalibračních vztahů dosahuje přesnosti 95,65 % až 97,40 %.

6.4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NA KONSTRUKCI ZELENÝCH STŘECH

Experimentální měření na modelech experimentálních střeš probíhalo v centru „DERIC - DEK Experimental Research Innovation Centre“, které se nachází na Pražákově ulici v brněnské části Horní Heršpice. Měření probíhalo celkem na pěti různých modelech konstrukcí zelených střeš s označením S5, S6, S7, S8 a S10, jejich tvar a rozmístění je zobrazeno na Obrázku 47, rozměry pak na Obrázku 49.



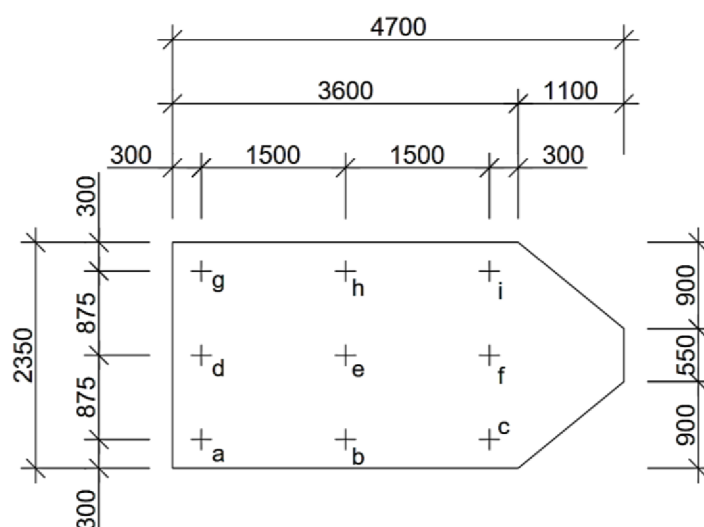
Obrázek 47: Tvar, poloha a označení experimentálních modelů zelených střeš.

Na všech střešách je umístěn substrát č. 2, na který byly uloženy travní koberce obsahující různé druhy sukulentů. Střešy, na kterých bylo prováděno měření, byly postupně vytvořeny v letech 2019 až 2022 a během doby jejich existence zde zakořenily i některé náletové rostliny vyskytující se v okolí zástavby. Střešy s označením S5 až S8 byly vystavěny jako extenzivní vegetační střešy s výškou 0,08 m, zatímco střeš S10 byla vystavěna jako intenzivní vegetační střeš s výškou 0,15 m. Střešy S5, S6 a S7 obsahují vatové rohože o tloušťce 0,05 m, na kterých je uložen substrát o výšce 0,03 m, který je opatřen travním kobercem. Střeš S8 obsahuje pouze substrát výšky 0,08 m a travní koberce, na střeše S10 je také uložen pouze střešní substrát a to ve výšce 0,15 m, na kterém jsou uloženy travní koberce.



Obrázek 48: Experimentální vegetační střešy v experimentálním centru DERIC na Pražákově ulici.

Měření vlhkosti Z-metrem (viz. Obrázek 48) probíhalo, vzhledem k výměře plochy střech, na každé střeše na šesti různých místech. Na všech pěti střeších byla měřena povrchová vlhkost a v případě střechy S10 byla vlhkost měřena hloubkovou sondou ve více výškových úrovních.



Obrázek 49: Nákres střechy s vyznačenými místy měření vlhkosti Z-metrem.

6.4.1 Měření vlhkosti ve střešních substrátech na modelech experimentálních zelených střech

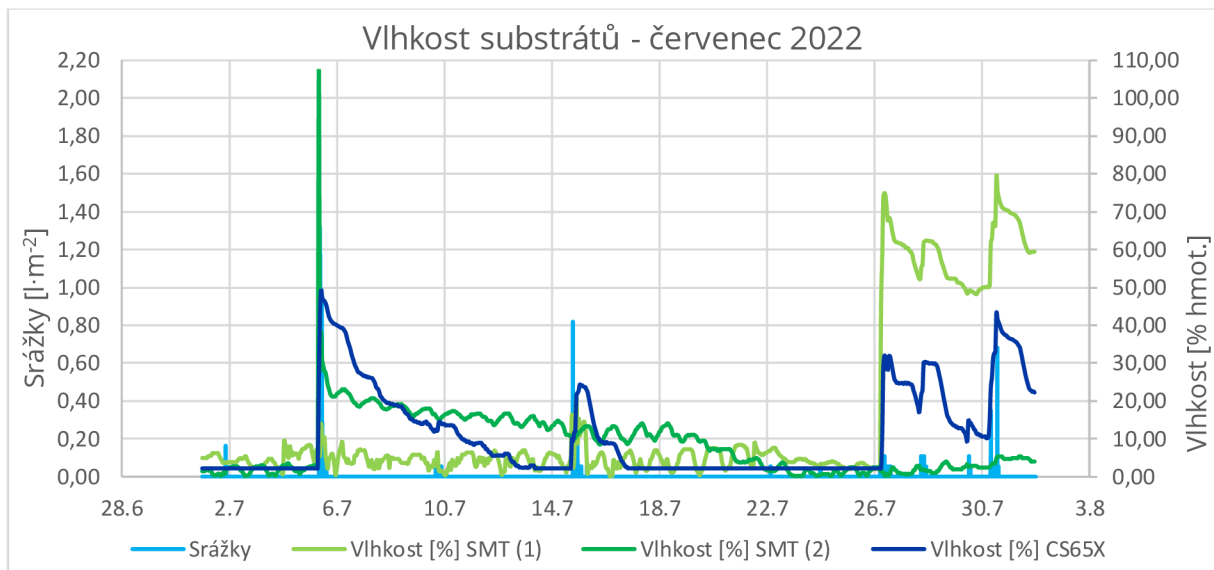
Měření vlhkosti ve střešních substrátech na modelech experimentálních zelených střech bylo prováděno kontinuálně kapacitními snímači uloženými ve střešních substrátech a jednorázově pak přístrojem Z-metr, fungujícím na odporovém principu.

6.4.1.1 Závislost vlhkosti střešního substrátu na konstrukci zelených střech stanovené kapacitními snímači na srážkách

Kapacitní snímače byly v substrátech uloženy po dobu od 1. července do 11. října 2022, během které snímaly hodnotu permitivity v hodinovém intervalu. Jeden ze snímačů SMT100 byl uložen v substrátu střechy S8, druhý snímač SMT100 a také snímač CS65X byly uloženy v substrátu střechy S7.

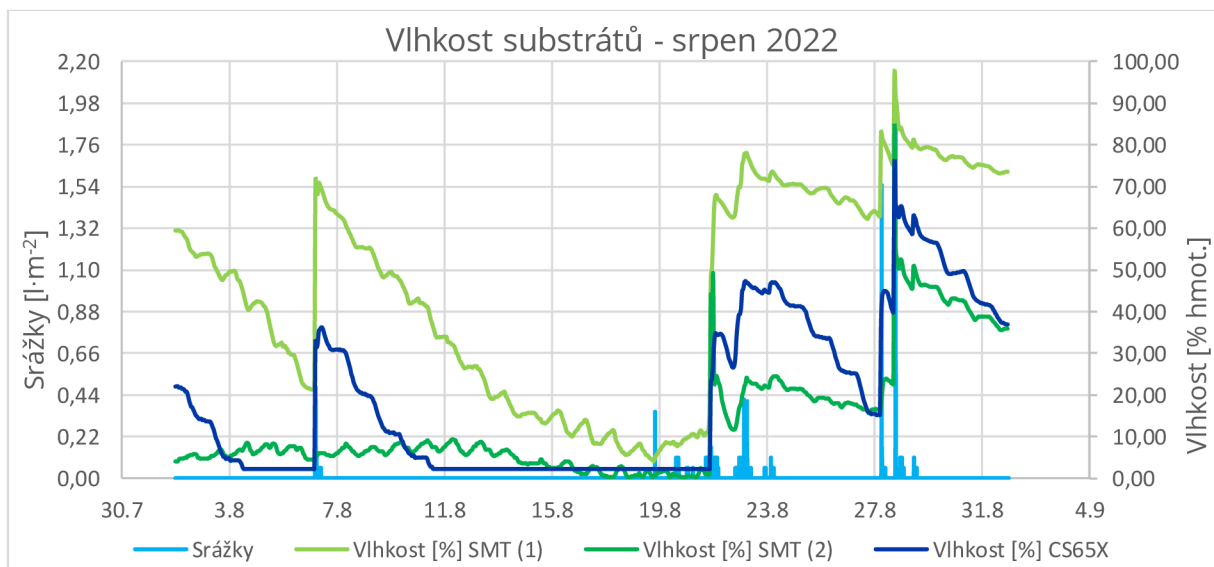
Dešťové srážky byly stanovovány na základě odtoku z úzkého pole nacházejícího se mezi vegetačními plochami. Samotný systém měření srážek zahrnuje člunkové překlápěcí průtokoměry, které principiálně pracují tak, že se člunek, který je součástí měřicího systému vždy po naplnění překlápí, čímž způsobí krátké sepnutí kontaktu. Na záznamovou jednotku se ukládají data o tom, kolikrát se člunek naplní a překlápí během jedné minuty. Pokud se plní déle než minutu, zaznamená se hodnota $0 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$, nejmenší měřitelnou hodnotou je $0,054 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$.

Hodnoty permitivity naměřené kapacitními snímači byly přepočítány pomocí vytvořených kalibračních vztahů na vlhkost. Hodnoty vypočtené vlhkosti byly společně s hodnotami srážek vyneseny do grafů, které byly pro přehlednost rozděleny na jednotlivé měsíce, tedy do čtyř grafů.



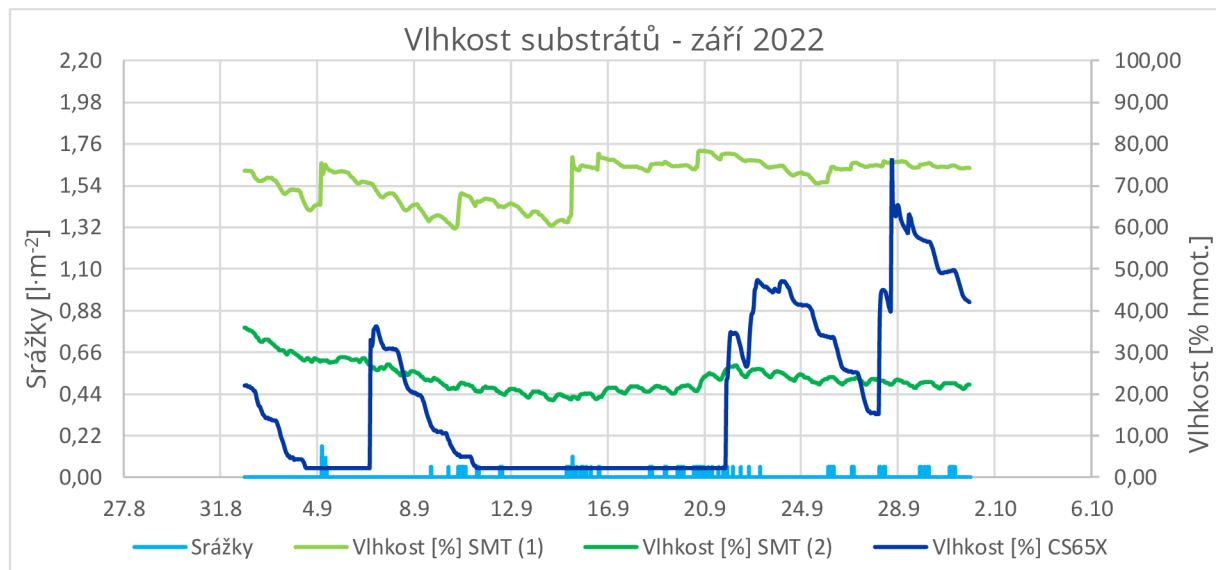
Obrázek 50: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v červenci roku 2022.

Na Obrázku 50 je zobrazen průběh srážek v červenci roku 2022 a stanovená vlhkost střešních substrátů ve stejném období. Snímač SMT (2) byl umístěn na střeše s jiným konstrukčním řešením, než snímač SMT (1) a snímač CS65X a vykazuje tedy odlišné hodnoty vlhkosti. Snímač SMT (1) a CS65X ovšem byly uloženy ve stejném střešním substrátu a i když voda obsažená v substrátu zelené střechy přirozeně není rozdělena rovnoměrně, hodnoty by se neměly příliš lišit, z grafu ovšem vyplývá, že tomu tak není. Například vlhkost naměřená 30. 7. 2022 ve 13:00 snímačem SMT (1) dosahovala hodnoty 79,5 %, kdežto v případě snímače CS65X byla v tu samou dobu vlhkost stanovena na 43,3 %. Je nepravděpodobné, že by rozdíl obsahu vody ve střešním substrátu na pevně ohraničené konstrukci o ploše přibližně 10 m² dosahoval hodnoty 36 %. Všechny křivky vytvořené ze stanovených vlhkostí více či méně reflektují množství dešťových srážek, tudíž zjištěná nepřesnost nejspíše tkví v převodních vztazích vytvořených kalibrací.



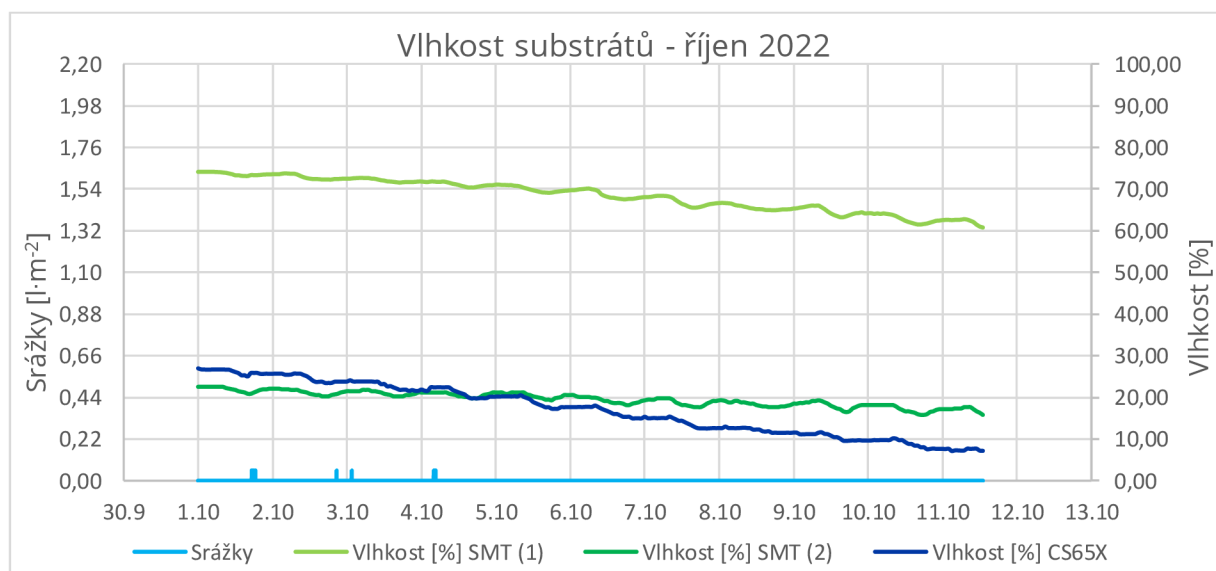
Obrázek 51: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v srpnu roku 2022.

Na Obrázku 51 je zobrazen průběh srážek v srpnu roku 2022 a stanovená vlhkost střešních substrátů ve stejném období. Všechny křivky vytvořené ze stanovených vlhkostí více či méně reflektují množství dešťových srážek, opět jsou zde nepřiměřené rozdíly mezi snímači umístěnými na konstrukci střechy S7.



Obrázek 52: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v září roku 2022.

Na Obrázku 52 je zobrazen průběh srážek v září roku 2022 a stanovená vlhkost střešních substrátů ve stejném období. Křivky vytvořené ze stanovených vlhkostí opět více či méně reflektují množství dešťových srážek, ale vykazují nepřiměřené rozdíly mezi snímači umístěnými na konstrukci střechy S7.

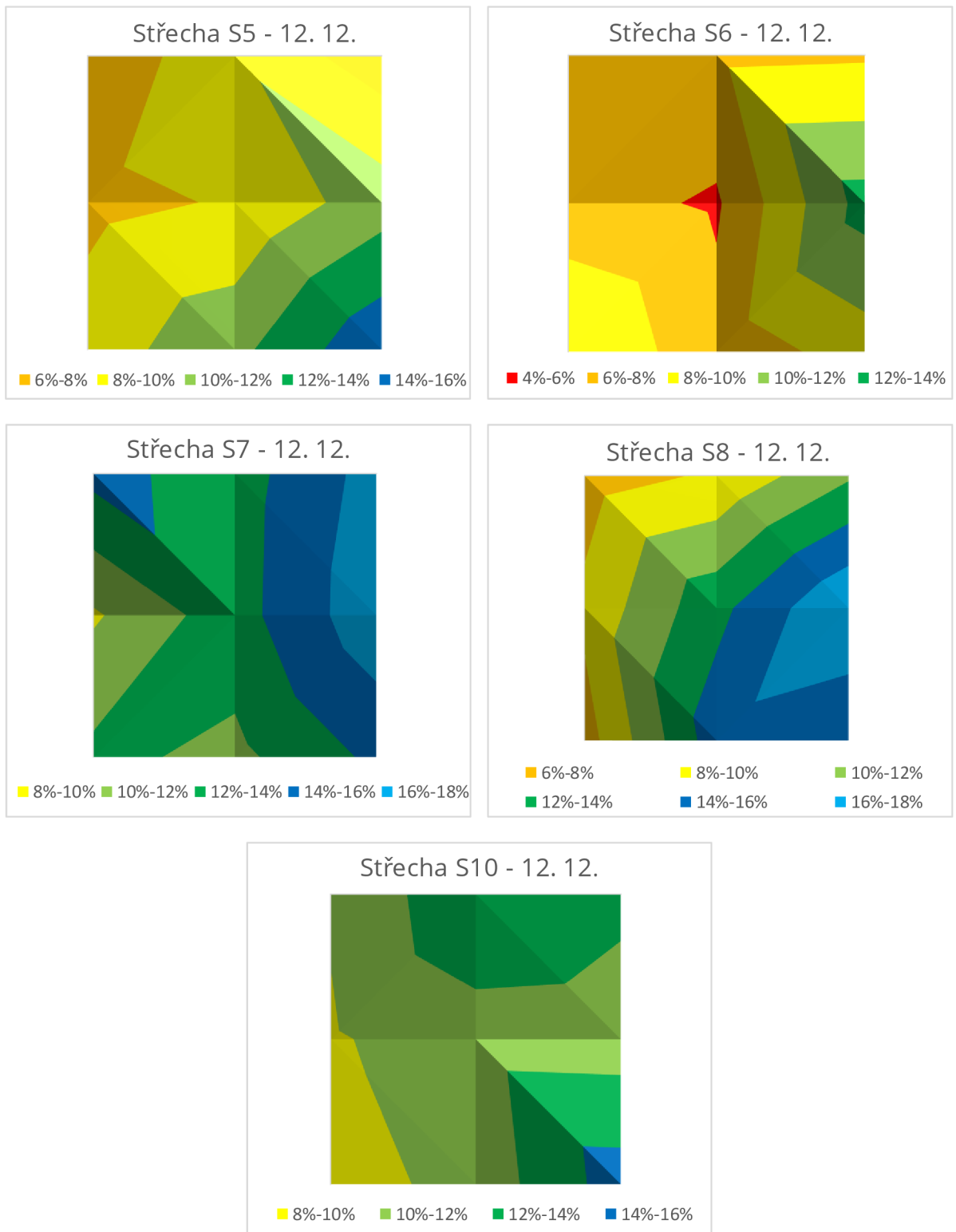


Obrázek 53: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v říjnu roku 2022.

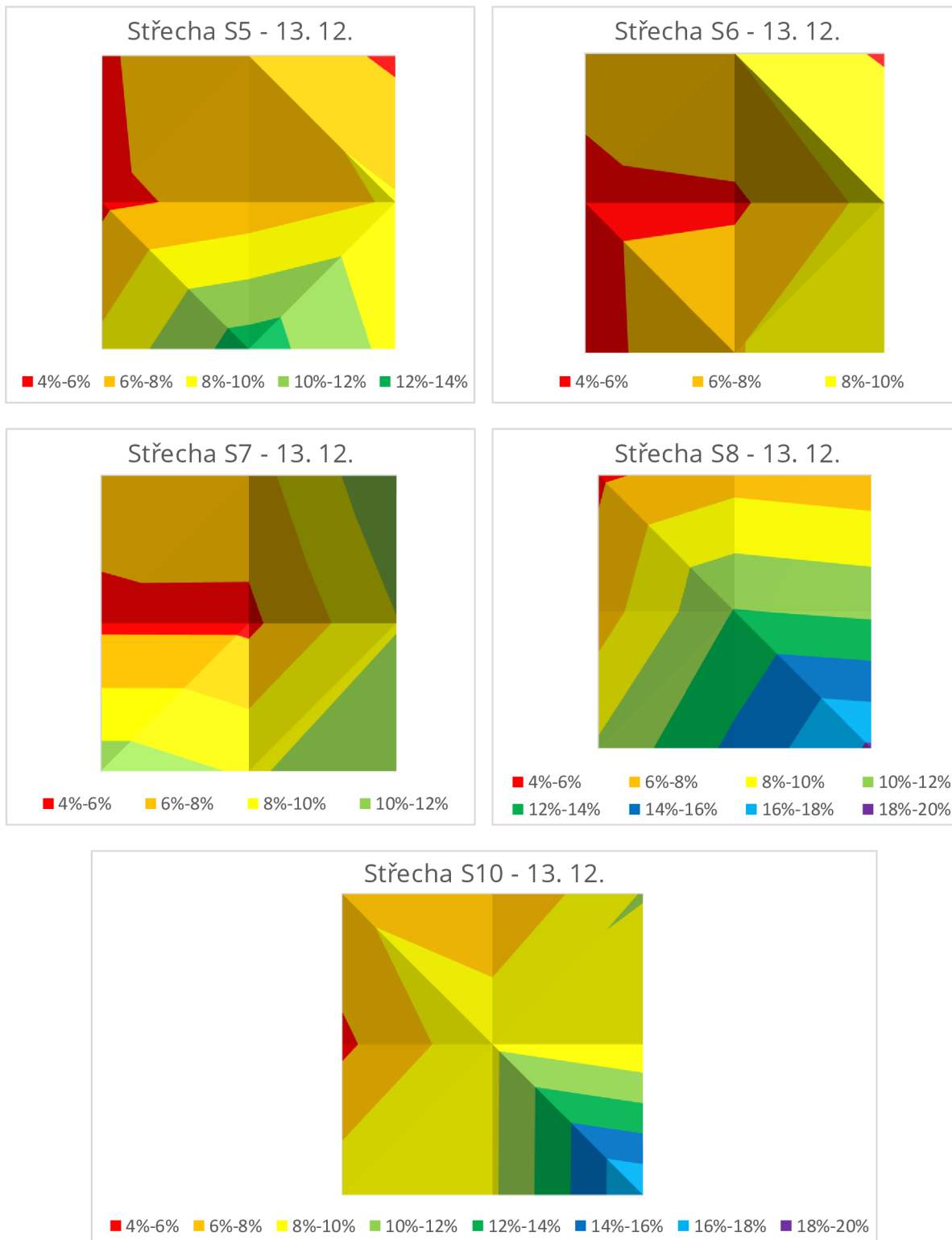
Na Obrázku 53 je zobrazen průběh srážek v říjnu roku 2022 a stanovená vlhkost střešních substrátů ve stejném období. Křivky vytvořené ze stanovených vlhkostí opět více či méně reflektují množství dešťových srážek, ale vykazují nepřiměřené rozdíly mezi snímači umístěnými na konstrukci střechy S7.

6.4.1.2 Experimentální měření vlhkosti v substrátech zelených střech přístrojem Z-metr IV

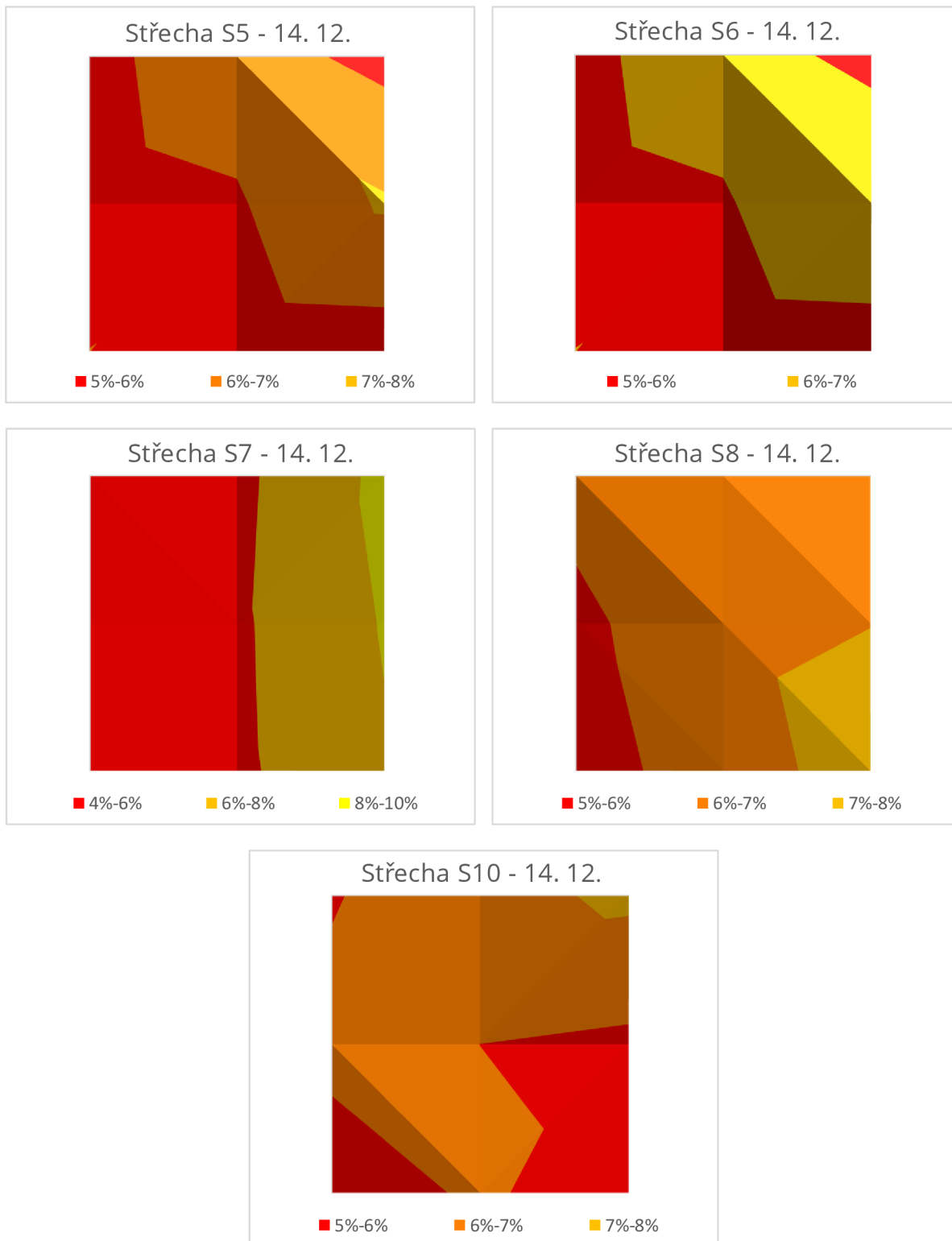
Grafy obsažené na Obrázcích 54 až 57 zobrazují povrchové rozložení vlhkosti v jednotlivých střešních substrátech. Měření bylo prováděno v devíti různých bodech na každé střeše, umístění měřících bodů – dle nákresu na Obrázku 49. V levém dolním rohu každého grafu je hodnota vlhkosti v bodě *a*, v pravém horním pak hodnota vlhkosti v bodě *i* atd. V grafickém zobrazení není dodržen poměr stran, jelikož se jedná přibližně o čtverec, ve skutečnosti má vyobrazovaná plocha tvar obdélníku o hranách (2,350 × 3,600) m. V popisu grafu je vždy uvedeno datum měření a o kterou se jedná střechu, v legendě je poté vyobrazen rozsah hodnot vlhkosti (hmotnostní).



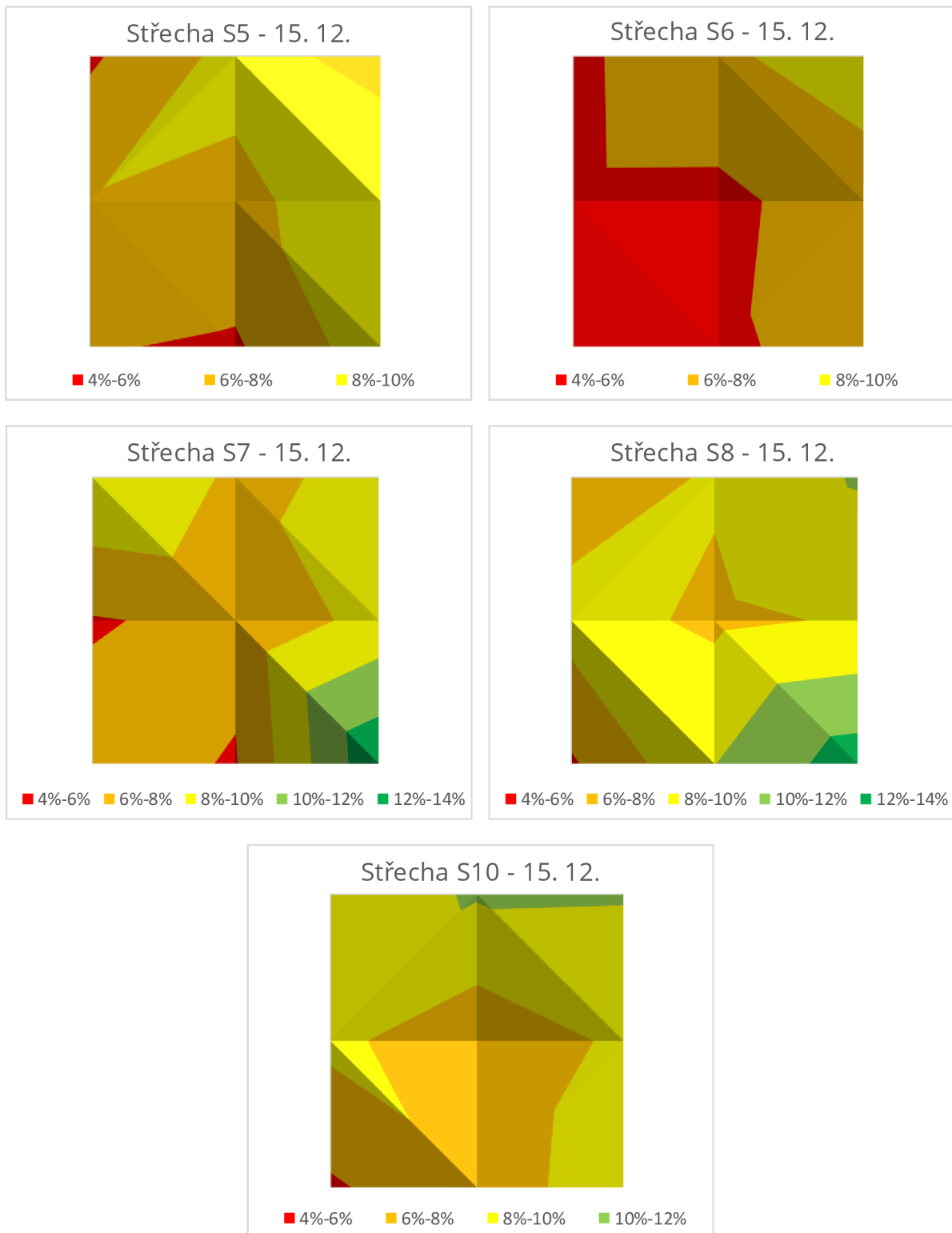
Obrázek 54: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 12. 12. 2022.



Obrázek 55: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 13. 12. 2022.



Obrázek 56: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 14. 12. 2022.



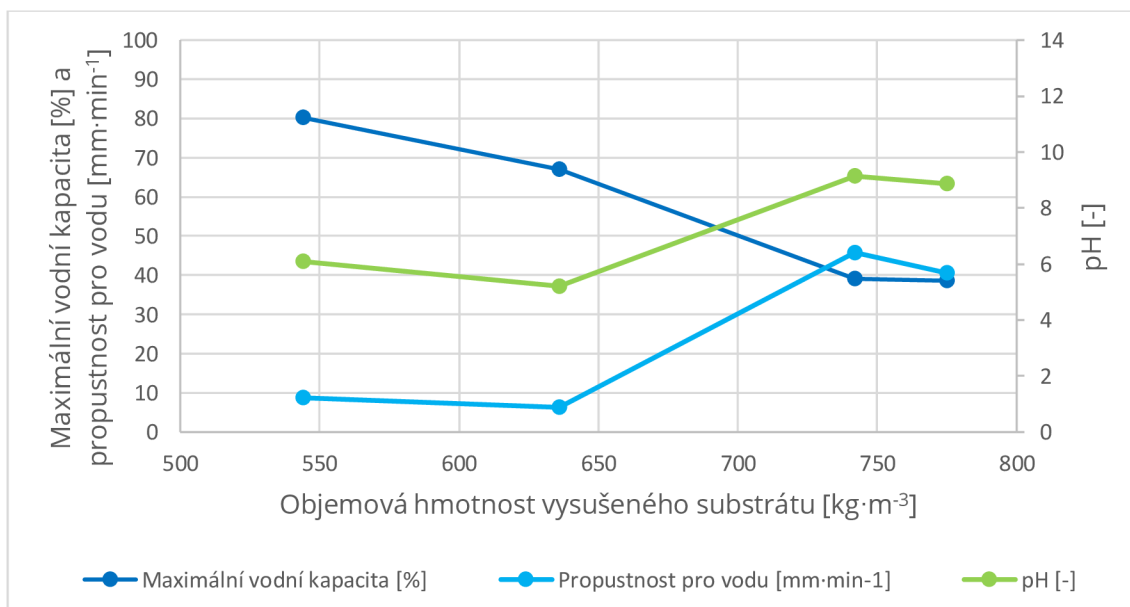
Obrázek 57: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách – odporová metod.

6.5 VYHODNOCENÍ

6.5.1 Diskuse dosažených výsledků

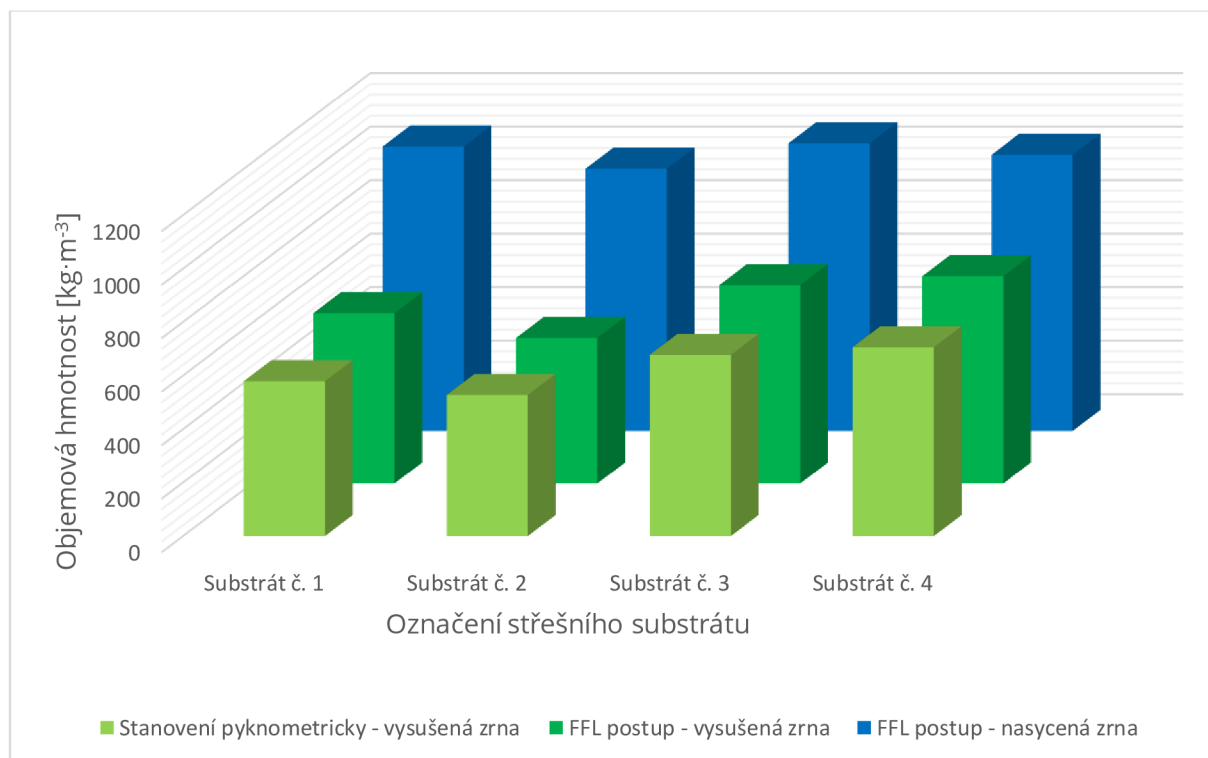
Experimentální část práce byla rozdělena na tři hlavní části, kterými byly stanovení charakteristik jednotlivých střešních substrátů v laboratoři, stanovení kalibračních vztahů pro vybrané metody měření vlhkosti a poslední částí bylo měření vlhkosti vybranými přístroji na experimentálních modelech zelených střech.

Střešní substráty obsahovaly některé složky způsobující odlišnosti jejich vlastností, jako například cihelný recyklát, lehké spékané kamenivo a podobně. Z naměřených hodnot je patrné, že většina vlastností substrátů závisí především na jejich objemové hmotnosti a zrnitosti. Substrát s nejnižší objemovou hmotností má nejvyšší maximální vodní kapacitu – viz Obrázek 58. Jedná se o substrát č. 2, který je tvořen převážně lehkým kamenivem, navíc obsahuje nejmenší podíl jemných částic, které jsou zpravidla nejvíce nasákové. Substrát č. 3 obsahuje také lehké kamenivo, v suchém stavu má druhou nejvyšší objemovou hmotnost, ovšem ve stavu nasyceném již druhou nejmenší a jeho nasákovost je téměř nejnižší ze všech. Tato skutečnost je nejspíše dána zrní lehkého kameniva frakce 16/32, které také způsobují nejvyšší propustnost pro vodu u tohoto substrátu.



Obrázek 58: Grafické zobrazení vybraných vlastností střešních substrátů.

Objemová hmotnost vzorků byla stanovována dvěma různými způsoby – prvním z nich byla německá směrnice FLL, kde se stanovovala objemová hmotnost jak vysušených vzorků, tak vzorků nasycených, a druhým byla norma ČSN EN 1097-6, při které se objemová hmotnost stanovuje ve vysušeném stavu. Hodnoty stanovené českou normou jsou přirozeně nižší (viz Obrázek 59), jelikož vzorky měřené podle německé směrnice byly zhuťněny šesti údery Proctorova kladiva. Hodnoty objemových hmotností vysušených vzorků stanovených těmito dvěma metodami se u substrátů č. 1, 2 a 3 liší o necelých deset procent, kdežto v případě substrátu č. 2 se tyto hodnoty lišily pouze o tři procenta. Rozdíl je nejspíše dán plynulejší křivkou zrnitosti, než u zbylých tří substrátů, což má za následek menší míru stlačení vzorku při stejném zatížení.



Obrázek 59: Porovnání objemových hmotností měřených jednotlivými metodami.

Střešní substráty č. 1 a č. 2 dosahují vysokých hodnot maximální vodní kapacity, a to 67,1 % a 80,2 % a v závislosti na tom nízkou schopnost propustnosti pro vodu, tedy $6,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $8,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Na základě těchto charakteristik jsou vhodnější pro použití na konstrukci zelených střech, než substráty č. 3 a 4, které mají hodnoty maximální vodní kapacity téměř poloviční, tedy 38,6 a 39,1 %. Hodnoty propustnosti pro vodu mají naopak vyšší a to $40,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $45,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Substráty č. 3 a 4 mají navíc zásadité pH, což je pro většinu rostlin vyskytujících se v České republice nevhodné, jelikož vysoké hodnoty pH obvykle vykazují půdy s vysokým obsahem vápníku, v důsledku čehož se snižuje obsah některých stopových prvků podporujících růst rostlin. Substrát č. 1 naopak vykazuje nízkou hodnotu pH, což rostlinám vyhovuje, jelikož kyselé půdy zlepšují přijímání živin, naopak však brzdí činnost mikroorganismů v půdě.

V rámci výběru metod pro experimentální měření vlhkosti ve střešních substrátech byla navržena ultrazvuková metoda, která se kromě jiného běžně užívá pro měření vlhkosti ve zdivu. Ultrazvukovým přístrojem byla vlhkost měřena pouze laboratorně a v případě substrátů č. 2 až 4 byly stanoveny kalibrační křivky s přesností (95,7–97,4) %. V případě substrátu č. 1 stanovené hodnoty rychlosti průchodu ultrazvukové vlny nevykazovaly prokazatelnou závislost na vlhkosti substrátu. Tento substrát obsahuje 13,7 % zrn o průměru větším než 16 mm, zatímco největší frakcí vyskytující se v ostatních vzorcích byla frakce 8/16. Jelikož se jedná o jedinou výraznou odlišnost od ostatních substrátů, lze ji považovat za příčinu nemožnosti vytvoření kalibračního vztahu.

Kalibrační křivky vytvořené pro kapacitní snímače dosahují hodnoty spolehlivosti 93,3 % až 99,6 %. Vyšší přesnosti dosahují křivky zhotovené pro substrát č. 2. Vzhledem k vyššímu počtu měření, což bylo umožněno díky lepší schopnosti substrátu přijímat vodu, než jakou vykazovaly ostatní substráty. Naopak nejnižší přesnosti dosahují vztahy vytvořené pro substrát č. 3, které byly vytvořeny z nejmenšího počtu naměřených dat. I přes to,

že kalibrační vztahy vytvořené pro substrát č. 2, který je uložen na zkušebních střeších, vykazovaly vysokou přesnost, je jejich využití pro stanovení vlhkosti ve střešních substrátech komplikované. Kapacitní snímače byly v experimentálních střeších nainstalovány v období od 1. července 2022 do 11. října 2022. Poté byly odstraněny a v laboratorním prostředí proběhla kalibrace. Následně byla naměřená data upravena pomocí vytvořených kalibračních vztahů a vypočtená vlhkost byla vynesena do grafů. Jednotlivé snímače byly umístěny v substrátech různých střeš, tudíž se od sebe liší. Ovšem z dat jednoho ze snímačů SMT100 byla vypočtena vlhkost téměř 110 % a pravděpodobnost takto vysoké hodnoty vlhkosti je nevěrohodná, navíc se jedná o začátek července, konkrétně 6. července 2022, kdy průměrná denní teplota vzduchu dosahovala hodnoty 18,6 °C, a maximální teplota vzduchu byla ten den 25 °C. Stanovené hodnoty vlhkosti ovšem reflektují dešťové srážky, což naznačuje, že chyba nejspíše spočívá ve vytvořených kalibračních vztazích. Podle dostupné odborné literatury se může vlhkost stanovená kapacitními snímači od skutečné vlhkosti půdy lišit až o několik jednotek procent. Normy, ve kterých je kapacitní metoda uváděna, jako například norma ČSN EN 13183-3, ji uvádějí pouze jako metodu pro odhad vlhkosti a někteří odborníci zabývající se metodami, které jsou založeny na dielektrickém principu ji označují za nespolehlivou. Kapacitní měření je ovlivněno teplotou prostředí, kalibrační vztahy se vytvářely z měření při laboratorních podmínkách, za stálé laboratorní teploty, kdežto ve střešních substrátech může teplota během denního cyklu v extrémním případě kolísat i o několik desítek stupňů. Kapacitní snímače umístěny v experimentálních modelech zelených střeš snímají ve vzdálenosti 7,5 cm od elektrody sondy a vzhledem k tomu, že výška substrátů nabývá hodnot od 0,08 m do 0,20 m, jsou měřené hodnoty permitivity ovlivněny podkladními vrstvami nebo dokonce prostředím nacházejícím se nad povrchem substrátů a to zejména v případě snímače CS655, jelikož má větší rozměry, než snímače SMT100 a také větší dosah měření.

Měření Z-metrem, zakládající se na měření hodnot elektrické impedance substrátů zelených střeš, neprobíhalo kontinuálně. Přesto průběhy vlhkosti stanovené tímto měřicím systémem ve stanovených měřicích bodech v několika po sobě jdoucích dnech, vykazují pravděpodobné hodnoty. Podle grafů, které byly vytvořeny na základě čtyřdenního měření vlhkosti substrátu na modelech zelených střeš vždy v přibližně stejnou denní dobu, vlhkost kolísá v rozmezí od 4 do 20 %, což je v případě zemin běžný trend. Hodnoty se tedy dají pokládat za věrohodné, pouze s výjimkou nízkých hodnot vlhkosti, při jejichž stanovení může přístroj vykazovat nepřesnosti.

6.5.2 Návrh dalšího výzkumu

Potenciál v oblasti dalšího výzkumu lze sledovat v možnostech tvorby snímačů vlhkosti v substrátech zelených střeš. Pro optimalizaci snímačů by bylo vhodné ještě blíže prozkoumat vliv charakteristik střešních substrátů na stanovení vlhkosti.

Ultrazvuková metoda je pro stanovení vlhkosti v substrátech vhodná, jelikož je ovšem závislá na objemové hmotnosti, bylo by vhodné laboratorně stanovit závislost vlhkosti na velikosti zatížení. Střešní substráty jsou totiž v mnoha případech zatěžovány pohybem lidí, či přítomností různých předmětů na střeše a také jsou ovlivněny povětrnostními podmínkami, například vlivem srážek nebo větru se substrát zhutňuje, čímž se zvyšuje jeho objemová hmotnost. Pokud by na základě dalších měření byla metoda vhodná, bylo by potřeba vytvořit sondy, které by bylo možné umístit do střešního substrátu. S tím mohou být spojeny další komplikace, jako například nutnost dodržení konstantní vzdálenosti mezi vysílačem

a přijímačem ultrazvukových vln, jinak není možné spočítat rychlost šíření vlny a následně vyhodnotit vlhkost substrátu.

Kapacitní sondy se již běžně užívají v zemědělství pro automatizaci závlahy, avšak při uložení do střešních substrátů jsou stanovené hodnoty vlhkosti značně ovlivněny okolním prostředím. Pro optimalizaci jejich užití by proto bylo vhodné vytvoření snímačů s menším rozsahem snímání a především kalibrace těchto snímačů přímo na experimentálních střeších, aby do kalibračních vztahů byly zahrnuty také okolní podmínky.

Z-metr, založený na principu elektrické impedanční spektrometrie, vykazuje ze tří zkoumaných metod relativně největší přesnost při měření vlhkosti substrátu zelených střeš, a to jak v laboratorních podmínkách, tak na modelech těchto střeš. V rámci dřívějších výzkumů již byly vytvořeny sondy, které byly dlouhodobě uloženy v zemině a jejichž naměřená data byla ukládána do paměti Z-metru, prostřednictvím WiFi sítě přenášena do osobního počítače a následně vyhodnocována. Při tvorbě snímačů vhodných i do substrátů s malou výškou a následné kalibraci na daný substrát je tato metoda použitelná pro dlouhodobé snímání vlhkosti ve střešních substrátech. Na Z-metr lze připojit až 256 měřicích snímačů, tudíž by bylo možné měřit vlhkost na několika místech střešy, ve více hloubkách nebo na více střeších zároveň, pokud by byly v dosahu kabelového propojení s přístrojem. Data je také možno odesílat přímo na počítač či notebook, kde je možné nastavit automatickou závlahu v závislosti na naměřené vlhkosti v reálném čase, případně doplnit měřením teploty.

7 ZÁVĚR

V kontextu probíhající změny klimatu, stále rostoucího počtu obyvatel Země, kumulující se problematiky odpadového hospodářství a imisí v životním prostředí lze považovat jakoukoli smysluplnou snahu o udržení a případně zlepšení životního prostředí za přínosnou. Za jeden z možných příspěvků se uvažuje i zvýšení zelené plochy v městských aglomeracích řešením zelených střech budov, byť jejich praktická realizace zatím vyžaduje nemálo vynaloženého úsilí.

Teoretická část práce je složena ze tří stěžejních témat. V první části jsou popsány hlavní funkce zelených střech a důvody jejich výstavby. V další části jsou definovány vlastnosti zemin, zejména fyzikální a to především ty, které mohou mít vliv na vlhkost zemin anebo na její měření. Současně je pozornost věnována i stručnému popisu druhů vody, které se v půdě mohou nacházet. Poslední část nastiňuje základní principy měření vlhkosti zemin a principy nejběžněji užívaných metod a zabývá se výhodami a nevýhodami jejich použití.

V rámci experimentální části práce byly zkoumány čtyři užívané střešní substráty s různým složením. V první fázi byly stanoveny základní charakteristiky těchto substrátů. Na základě znalostí zpracovaných v teoretické části pak byly zvoleny vhodné metody a postupy měření vlhkosti v substrátech zelených střech. Zvolenými nepřímými metodami byly metody odporová a kapacitní. Alternativní metodou, která dosud na měření vlhkosti substrátů zelených střech užitá nebyla, byla metoda ultrazvuková. Pro všechny tři systémy využívající ke stanovení vlhkosti nepřímé metody, byla provedena laboratorní kalibrace měřených veličin na hodnotu vlhkosti substrátu. Metodami kapacitní a elektrické impedanční spektrometrie bylo provedeno měření vlhkosti střešních substrátů na experimentálních modelech zelených střech v experimentálním centru DERIC v Brně. Referenční metodou pro stanovení vlhkosti jednotlivých substrátů byla metoda gravimetrická realizovaná v laboratorních podmínkách při dodržení základních kalibračních postupů.

Ultrazvuková metoda byla použita pouze v laboratorním prostředí. Měřené hodnoty rychlosti průchodu ultrazvukové vlny vzorkem substrátu vykazovaly závislost na vlhkosti. Vytvořené kalibrační vztahy mají vysokou přesnost, hodnoty vlhkosti jsou ovšem závislé na míře stlačení vzorku. Z výsledků měření také vyplývá, že metoda není vhodná pro stanovení vlhkosti v substrátech obsahujících zrna s průměrem nad 16 mm. Kalibrační křivky vytvořené pro kapacitní snímače vykazují nižší spolehlivost. Snímače byly po dobu čtyř měsíců uloženy v substrátech na experimentálních modelech zelených střechách a kontinuálně měřily vlhkost. Naměřené hodnoty byly upraveny pomocí kalibračních vztahů a vypočtená vlhkost byla porovnávána s průběhem srážek. Hodnoty vlhkosti, vypočtené z naměřených dat, se ovšem jevily jako nepravděpodobné. Snímače byly vytvořeny za účelem měření vlhkosti v zemědělských půdách, pro automatizaci závlahy a vzhledem ke svým rozměrům a velikosti snímaného objemu byly vyhodnoceny jako nevhodné pro měření vlhkosti střešních substrátů. Odporová metoda, respektive metoda elektrické impedanční spektrometrie vykazovala při vytváření kalibračních vztahů největší přesnost ze všech tří zkoumaných metod a také se osvědčila při měření vlhkosti substrátů na experimentálních modelech zelených střech.

Závěrem lze konstatovat, že na základě prováděných experimentů se jako nejvhodnější metoda měření vlhkosti ve střešních substrátech obecně jeví metoda založená na odporovém principu, která při aplikaci měřicího systému s přístrojem Z-metr IV umožňuje variabilní uspořádání měřicích sond i geometrii měření, a to včetně měření v různých hloubkách. Systém lze provozovat v manuálním režimu či automatickém s přenosem dat do nadřazeného

zpracovatelského zařízení. V případě potřeby je dále možné měření doplnit i kontinuálním měřením teploty substrátu. Stanovené hodnoty touto metodou mají téměř stoprocentní přesnost, s výjimkou velmi nízkých hodnot, přibližně pod pět procent vlhkosti. Kapacitní metoda je také použitelná, ovšem s užitím jiných sond a při kalibraci, která by zahrnovala nejen vlastnosti daného substrátu, ale také okolní přirozené podmínky konstrukce zelených střeš. Stejně tak je použitelná i ultrazvuková metoda, v jejímž případě je ovšem před její přímou aplikací provést další výzkum.

BIBLIOGRAFIE

1. **Supek, Jozef a Gavenčiak, Štefan.** *Určovanie potrebného počtu opakovaní pri meraní podnej vlhkosti.* Bratislava : Výskumný ústav vodohospodársky v Slovenskom vydavateľstve technickej literatúry V Bratislave, 1966.
2. **Pan, Limin, a ďalší.** A model for soil moisture content prediction based on the change in ultrasonic velocity and bulk density of tillage soil under alternating drying and wetting conditions. *ScienceDirect*. [Online] 25. listopad 2021. [Citace: 1. září 2022.] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0263224121013877?token=9C87252684191F76F7DA37F626EAEB9A692DBD30D7B1D8EB91241BEF5323EF602DDEBC7484F2805EC0377213DF8C8779&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220901154225>. 0263-2241.
3. **Giacomello, Elena.** *Green Roofs, Facades, and Vegetative Systems Safety Aspects in the standards.* Kidlington : © 2021 Elsevier Inc., 2020. ISBN: 978-0-12-817694-8.
4. **Minke, Gernot.** *Zelené střechy Plánování, realizace, příklady z praxe.* Ostrava : Nakladatelství HEL, 2008. ISBN 80-86167-17-8.
5. **Chen, Pei-Yuan.** Effects of meteorological variables and substrate moisture on evapotranspiration and thermal performance of a green roof in a subtropical climate. *ScienceDirect*. Taiwan : © 2022 Elsevier B.V., 2022. 0925-8574.
6. **Večeřa, Pavel.** Zelené střechy a dotační možnosti obcí, Principy zelených střech a zkušenosti ze světa i ČR. *Města, obce profi*. [Online] © 1997 - 2023 by Dashöfer Holding, Ltd., 9. říjen 2020. [Citace: 3. leden 2023.] https://www.obecniportal.cz/33/zelene-strechy-a-dotacni-moznosti-obci-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EhxcjSLDvCErr_KBwwAoT8I/.
7. **Weber, Ben.** 1.000 grüne Dächer (GründachPLUS), FÖRDERPROGRAMM. *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*. [Online] © 2022 www.bmwk.de, 21. srpen 2019. [Citace: 9. leden 2023.] <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Berlin/1000-gruene-daecher.html>.
8. **De Vries, Yasmine.** Apply for a subsidy for 'green roofs' 2022. *The Hague*. [Online] MijnDenHaag, 20. prosinec 2021. [Citace: 9. leden 2023.] https://www.denhaag.nl/en/subsidies/apply-for-a-subsidy-for-green-roofs-2022.htm#How_it_works-anchor.
9. **Brázdová, Michaela.** Výzva č. 10/2021 k předkládání žádostí o poskytnutí podpory v rámci Národního programu Životní prostředí. *Zelené střechy*. [Online] Svaz zakládání a údržby zeleně, říjen 2021. [Citace: 9. leden 2023.] <https://www.zelenestrechy.info/nova-zelena-usporam>.
10. —. Soutěž Zelená střecha roku 2022 zná vítěze. *Zelené střechy*. [Online] Svaz zakládání a údržby zeleně, 10. září 2022. [Citace: 9. leden 2023.] <https://www.zelenestrechy.info/soutez-zelena-strecha-roku>.
11. **Tomášová, Danuše.** DOTAČNÍ PROGRAM „ZELEŇ STŘECHÁM“ A „NACHYTEJ DEŠŤOVKU“ STARTUJÍ JIŽ OD 1. 2. *EKODOTACE - brno.cz*. [Online] Státní fond životního prostředí ČR, 2. leden 2023. [Citace: 9. leden 2023.] <https://ekodotace.brno.cz/aktuality/dotacni-program-zelen-strecham-a-nachytej-destovku-startuji-jiz-od-1-2/>.

12. **Honzík, R., Usták, S. a Vach, M.** Hydropedologické parametry a objemová hmotnost půd u variant dlouhodobých pokusů s rozdílnými způsoby zpracování. *AGRITECH SCIENCE*. Praha : Agritech Science, 2016. ISSN 1802-8942.
13. **Honsová, Dagmar.** Vlhkost půdy a metody jejího měření. *Příroda.cz*. [Online] © 2004 - 2022 PŘÍRODA.cz, 14. duben 2008. [Citace: 16. srpen 2022.] <https://www.priroda.cz/clanky.php?detail=1101#:~:text=Z%20pedologického%20hlediska%20se%20termínem,rozumíme%20obsah%20vody%20v%20půdě..> ISSN 1801-2787.
14. **Weiglová, Kamila.** *Mechanika zemin modul BF02-M02*. Brno : OHL ŽS, 2005.
15. **Bauerová, Petra a Keder, Josef.** Odtokový proces. *Český hydrometeorologický ústav*. [Online] The COMET® Program. [Citace: 22. srpen 2022.] https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_4.1.0.htm.
16. **National, Physical Laboratory.** *A Guide to the Measurement of Humidity*. Londýn : The Institute of Measurement and Control, 1996. ISBN 0-904457-24-9.
17. **Vydra, Petr a Křížanová, Eva.** Metadatový katalog Copernicus - Půdní vlhkost. *Copernicus global land service*. [Online] © 2022 Česká informační agentura životního prostředí, 20. srpna 2018. [Citace: 1. září 2022.] <https://micka.cenia.cz/record/basic/5f561895-8378-4c95-8cdc-7b1bc0a80164?dlang=cze>.
18. **Vlček, Vítězslav, a další.** *Půdoznalectví*. Brno : Vydavatelství Mendelovy univerzity v Brně, 2020. ISBN 978-80-7509-738-5.
19. **Černochová, Kateřina.** CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY Hydrofyzikální vlastnosti. *FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT V PRAZE*. [Online] © 2014 ČVUT v Praze. [Citace: 26. srpen 2022.] <https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/definice-parametru/zakladni-hydrofyzikalni-vlastnosti>.
20. **Remešová, Petra.** Rozbor vody - parametry. *Centrum vody Independent Analytical Laboratories*. [Online] 2008-2023 © Golemos s.r.o. [Citace: 2. leden 2023.] https://www.centrumvody.cz/Rozbor-vody-parametry-c10_35_2.htm.
21. **Zahradníková, Libuše.** Dusík. *Invital*. [Online] INVITAL Rostlinna-akvaria.cz - Velkoobchod a obchod s akvaristikou, 2. leden 2023. [Citace: 2. leden 2023.] <https://www.rostlinna-akvaria.cz/dusik-94>.
22. **Stejskalová, Jana.** Rozbor vody – jak se v něm zorientovat. *EuroClean*. [Online] Fresh Mill's design, 16. březen 2020. [Citace: 2. leden 2023.] <https://euroclean.cz/clanky/jak-se-zorientovat-ve-vyslednem-protokolu-o-rozboru-vody/>.
23. **Šmotlák, Marcel a Chamulová, Barbara.** *Vlhkost a jej vplyv na životnosť staveb*. Brno : Tribun EU, s. r. o., 2017. ISBN 978-80-263-1374-8.
24. **Petránek a kolektiv, Jan.** *Encyklopedie geologie*. Praha : Česká geologická služba, 2016. ISBN: 978-80-7075-901-1.
25. **Synek, Jaroslav a Petránek, Jan.** Voda. *Geologická encyklopedie*. [Online] © Česká geologická služba 2007. [Citace: 28. srpen 2022.] <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?voda#>.
26. **Lamboj, Ladislav a Štěpánek, Zdeněk.** *Mechanika zemin a zakládání staveb*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001030943.

27. **Lahuta, Hynek.** Podzemní voda. *Katedra geotechniky a podzemního stavitelství*. [Online] © 2022 ADOC.PUB. [Citace: 30. srpen 2022.] [https://adoc.pub/katedra-geotechniky-a-podzemniho-stavitelstvi676e8db3753b9317898104a39d0f234454122.html#:~:text=3\)%20Strukturální%20vodu%20-%20je%20součástí,zachovává%20si%20molekulární%20formu%20H2O..](https://adoc.pub/katedra-geotechniky-a-podzemniho-stavitelstvi676e8db3753b9317898104a39d0f234454122.html#:~:text=3)%20Strukturální%20vodu%20-%20je%20součástí,zachovává%20si%20molekulární%20formu%20H2O..)

28. **Song, Xue, a další.** Cation exchange capacity and soil pore system play key roles in water vapour sorption. *ScienceDirect*. [Online] 25. červen 2022. [Citace: 30. srpen 2022.] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S001670612200324X?token=962F6ADC2DE1D4BF26BED673994C609020DBB3151E8FFFDBA4475943ABE5005886F40F02F509A9E0FD0864F690789F0A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220830155719.0016-7061.>

29. **Wang, Zhuangji, a další.** Modeling vapor transfer in soil water and heat simulations: A modularized, partially-coupled approach. *ScienceDirect*. [Online] 24. leden 2022. [Citace: 30. srpen 2022.] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022169422001160?token=179928536209705AAF17FCAB63074FF0CC7FF1AE1824CCCD144B855C53D594CA795BCDDECF6D05986E9BB30B99C4711F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220830161747.0022-1694.>

30. **Zhang, Sheng, a další.** Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study. *ScienceDirect*. [Online] 5. březen 2016. [Citace: 31. srpen 2022.] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0165232X1630026X?token=B07AC06DB0463B0613A84CE3AC02F8663701F40D46860AACC37B5FC99E377E95D69F7D5B966503A00F27D479F0B6471E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220831121602.0165-232X.>

31. **Litschmann, Tomáš.** Měření půdní vlhkosti. *Informační systém Masarykovy univerzity*. [Online] 19. duben 2010. [Citace: 27. říjen 2022.] https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_PudniVlhkost.pdf.

32. **Naugler, Trudy.** Gravimetric Soil Water Content. *Soil Lab Modules*. [Online] Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike International License. [Citace: 27. říjen 2022.] labmodules.soilweb.ca/gravimetric-soil-water-content/.

33. **Leskelä, Esa.** Moisture measuring of building materials. *Theseus - ammattikorkeakoulujen opinnäytetyöt ja julkaisut verkossa*. Oulu : Oulu University of Applied Sciences, 2013.

34. **Cídlová, Monika.** Pyknometr. *Pedagogická fakulta MU, sekce chemie*. [Online] webdesign: ©Yubix 2009. [Citace: 27. říjen 2022.] <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/fchlab/pyknometr.htm>.

35. **Helan, Tomáš.** Pyknometry Gay-Lussac. *Controls Schleibinger Geräte Building Materials Testing Systems*. [Online] LABTECH s.r.o © 2011. [Citace: 27. říjen 2022.] <https://www.strojprozkusebnictvi.cz/pyknometry-gay-lussac.html>.

36. **Ranjan, Gopal.** Water Content Determination - Pycnometer Method. *Library*. [Online] 2018. [Citace: 27. říjen 2022.] <https://www.elementaryengineeringlibrary.com/civil-engineering/soil-mechanics/water-content-determination-pycnometer-method>.

37. **Vaněk, Kryštof.** Měření vlhkosti a teploty půdy. *Diplomová práce*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2021.

38. **Keita, Zuna.** SR IRROMETER (Tensiometer). *irro africa*. [Online] Copyright 2020 Calafrica. [Citace: 27. říjen 2022.] <https://www.irroafrica.co.za/product-page/tensiometer-400mm>.
39. **Blažek, Jaroslav.** Sádrové bloky Soilmoisture 5201F1. *EkoTechnika Přístroje pro environmentální diagnostiku*. [Online] [Citace: 28. říjen 2022.] <https://ekotechnika.cz/vyrobek/sadrove-bloky-soilmoisture-5201f1>.
40. **Svoboda, Jiří.** Vědy o Zemi se systémem Vernier. *Vernier Science Education*. [Online] © 2022 Edufor s. r. o. [Citace: 28. říjen 2022.] <https://www.vernier.cz/experimenty/esv/7/index.php>.
41. **Adams, Brad.** Soil Moisture Sensors. *Irrrometer*. [Online] Irrrometer Company, Inc. [Citace: 28. říjen 2022.] <https://www.irrometer.com/sensors.html>. 951.682.9505.
42. **Lázna, Tomáš.** Měření záření gama. *Bakalářská práce*. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015.
43. **Fabiano, Palaretti, Fabiano, Palaretti Luiz a Mantovani, Everardo Chartuni.** Methods of Measuring for Irrigation Scheduling - WHEN. *Research Gate*. Sao Paulo : © 2008-2022 ResearchGate GmbH, 2014.
44. **Dover, Kent.** Time domain reflectometers. *Megger*. [Online] © 2022 Megger. [Citace: 28. říjen 2022.] <https://megger.com/products/low-voltage-testers/time-domain-reflectometers>.
45. **Blonquist Jr., J. M., Jones, S. B. a Robinson, D. A.** A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *ScienceDirect*. Utah : © 2005 Elsevier B.V., 2005. 0022-1694.
46. **Smits, Kathleen M. a Illangasekare, T. H.** Empirical two-point a-mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensor in sands. *Research Gate*. Colorado : Copyright 2008 by the American Geophysical Union, 2008. 0043-1397.
47. **Burian, Samuel, a další.** *Vegetační souvrství zelených střech standardy pro navrhování, provádění a údržbu*. Brno : Svaz zakládání a údržby zeleně, 2019.
48. **Curtis, Keith.** Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti. *DPS Elektronika od A do Z*. [Online] © 2023 DPS Elektronika od A do Z, červen 2015. [Citace: 2. leden 2023.] <https://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>.
49. **Pařílková, Jana a Radkovský, Karel.** *Z-metr IV - uživatelský manuál*. Brno : Laboratoř vodohospodářského výzkumu, Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické, 2016.
50. **Králíková, Štěpánka.** Analýza monitorování zemní hráze malé vodní nádrže. *Diplomová práce*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, 2019.
51. **Gardavská, Zuzana.** Monitorování filtračních procesů probíhajících v zemních hrázích. *Disertační práce*. Brno : Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2014.

52. **Bellan, Michal.** Software Mini32. *Environmental Measuring Systems s.r.o., EMS Brno.* [Online] © 2005-2023 Ivasoft s.r.o., 31. březen 2022. [Citace: 6. leden 2023.] <http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Software.html>.
53. —. Datalogger MicroLog SDI-MP. *Data Acquisition Environment, EMS Brno.* [Online] 31. březen 2022. [Citace: 6. leden 2023.] [http://www.emsbrno.cz/r.axd/Datasheets__manuals_v_MicroLog__SDI_t_MP_v_EMS__MicroLog__SDI_t_MP__datasheet_u_pdf.jpg?ver=.](http://www.emsbrno.cz/r.axd/Datasheets__manuals_v_MicroLog__SDI_t_MP_v_EMS__MicroLog__SDI_t_MP__datasheet_u_pdf.jpg?ver=)
54. **Svoboda, Jiří.** Půda - SMT100 - Senzor vlhkosti a teploty půdy. *EkoTechnika, Environmental diagnostics equipment.* [Online] 31. březen 2021. [Citace: 6. leden 2023.] https://ekotechnika.cz/sites/default/files/pdf/datasheet_vlhkostni_cidlo_smt100_cj_2021.pdf.
55. **Hölzer, Mathias.** CS650 and CS655 Water Content Reflectometers. *Fiedler.* [Online] 12. srpen 2020. [Citace: 6. leden 2023.] https://www.fiedler.company/sites/default/files/dokumenty/cs650_manual.pdf.
56. **Waller, Patrick a Li, Yaqi.** Operating Instructions, Pundit Lab / Pundit Lab+ Ultrasonic Instrument. *Screening eagle.* [Online] 21. listopad 2017. [Citace: 7. leden 2023.] https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20Lab_Operating%20Instructions_English_high.pdf.
57. **Pavlík, Adolf a Doležal, Jaroslav.** *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977. 04-705-77.
58. **Pavlíček, Tomáš.** Základní pojmy. *Český metrologický institut.* [Online] Český metrologický institut. [Citace: 1. leden 2023.] <https://www.cmi.cz/node/537>.
59. **Burešová, Eliška.** Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech. *Diplomová práce.* Brno : Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2021.
60. **Patle, Kamlesh S., a další.** Temperature compensated and soil density calibrated soil moisture profiling sensor with multi-sensing point for in-situ agriculture application. *ScienceDirect.* [Online] 11. srpen 2022. [Citace: 4. září 2022.] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0263224122009113?token=57D15F2B57377E082162CE87F79019D82342D24B58A738419A29EDD390442E49F963113D12C1BE13AEF480034CF3F673&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220904141411.0263-2241>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Množství srážek a odtoku vody u šikmé zelené střechy po osmnáctihodinovém vytrvalém dešti [4].	4
Obrázek 2: Vyobrazení shodné povahy jednotlivých vrstev zelené střechy a půd nacházejících se v přírodě [6].	5
Obrázek 3: Zelená střecha v ZOO Praha, výherce soutěže Zelená střecha roku 2022 [10].	6
Obrázek 4: Půdní horizont [15].	7
Obrázek 5: Trojfázový systém půd [14].	10
Obrázek 6: Konzistenční meze [19].	10
Obrázek 7: Schematický diagram toku kapalné vody, páry a tepla v nenasycené, částečně zamrzající půdě [30].	13
Obrázek 8: Pyknometry různých velikostí [35].	15
Obrázek 9: Členění nepřímých metod měření půdní vlhkosti [37].	16
Obrázek 10: Tenziometr [38].	17
Obrázek 11: Sádrové bločky [39].	18
Obrázek 12: GMS senzor [41].	19
Obrázek 13: Typy interakce gama záření [42].	19
Obrázek 14: Neutronová sonda [43].	20
Obrázek 15: Kapacitní sonda [31].	21
Obrázek 16: Snímač založený na principu pulsní reflektometrie [44].	22
Obrázek 17: Snímač měření přenosu v časové oblasti [45].	23
Obrázek 18: Zářič a přijímač založené na metodě fázového posunu [46].	23
Obrázek 19: Metodika práce.	24
Obrázek 20: Vzorky testovaných substrátů, zleva: substrát č 1 až substrát č. 4 vpravo.	25
Obrázek 21: Vzorky umístěné v kontejnerech opatřeny síťovinou a tkaninou.	26
Obrázek 22: Vzorek zatížený betonovou dlaždicí.	26
Obrázek 23: Vzorek zaletý vodou, jejíž hladina dosahuje po horní rysku.	27
Obrázek 24: Navážka vzorku střešního substrátu v pyknometru.	28
Obrázek 25: Drcení vzorku v roztírací misce.	29
Obrázek 26: Křivky zrnitosti střešních substrátů.	30
Obrázek 27: Strukturní schéma ultrazvukového zařízení pro detekci vlhkosti půdy [2].	33
Obrázek 28: Modulární systém Z-meter IV, MEA-ZMT4 – základní měřicí jednotka [49].	34
Obrázek 29: Měřicí sondy Z-metru, povrchová sonda vlevo a hloubková sonda vpravo [49].	36
Obrázek 30: Z-meter IV – adaptér pro měření na jedné sondě [49].	36
Obrázek 31: Datalogger MicroLog SDI-MP [53].	37

Obrázek 32: SMT100 – Senzor vlhkosti a teploty půdy [54].	38
Obrázek 33: CS655 – snímač objemové půdní vlhkosti [55].	38
Obrázek 34: Testovací ultrazvukový přístroj Pundit Lab určený pro laboratorní provoz [56].	40
Obrázek 35: Sondy vysílající a snímající ultrazvukové vlny [56].	41
Obrázek 36: Nádoba vytvořená pro kalibraci kapacitních a odporových přístrojů.	42
Obrázek 37: Laboratorní měření vlhkosti pro kalibraci přístrojů.	42
Obrázek 38: Vzorek vytvořený pro povrchové měření ultrazvukem.	43
Obrázek 39: Nádoba užitá pro kalibraci ultrazvukového přístroje.	44
Obrázek 40: Měření průchodu ultrazvukových vln vzorkem substrátu.	44
Obrázek 41: Kalibrační křivky pro Z-metr.	46
Obrázek 42: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 1.	48
Obrázek 43: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 2.	49
Obrázek 44: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 3.	49
Obrázek 45: Kalibrační křivky kapacitních snímačů pro substrát č. 4.	50
Obrázek 46: Kalibrační křivky pro ultrazvukový signál.	51
Obrázek 47: Tvar, poloha a označení experimentálních modelů zelených střech.	52
Obrázek 48: Experimentální vegetační střechy v experimentálním centru DERIC na Pražákově ulici.	52
Obrázek 49: Návrh střechy s vyznačenými místy měření vlhkosti Z-metrem.	53
Obrázek 50: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v červenci roku 2022.	54
Obrázek 51: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v srpnu roku 2022.	54
Obrázek 52: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v září roku 2022.	55
Obrázek 53: Grafické zobrazení průběhu srážek a vlhkosti naměřené kapacitními snímači v říjnu roku 2022.	55
Obrázek 54: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 12. 12. 2022.	57
Obrázek 55: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 13. 12. 2022.	58
Obrázek 56: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách stanovené odporovou metodou 14. 12. 2022.	59
Obrázek 57: Plošné rozdělení povrchové vlhkosti na střechách – odporová metod.	60
Obrázek 58: Grafické zobrazení vybraných vlastností střešních substrátů.	61
Obrázek 59: Porovnání objemových hmotností měřených jednotlivými metodami.	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnocení zasolení podle USDA [18].....	9
Tabulka 2: Naměřené a vypočtené hodnoty parametrů sustřešních substrátů.	27
Tabulka 3: Objemová hmotnost střešních substrátů stanovena pyknometricky.	29
Tabulka 4: Stanovené hodnoty pH střešních substrátů.	30
Tabulka 5: Technické údaje modulárního systému Z-meter IV a adaptéru (43).....	35
Tabulka 6: Z-metr IV – adaptér pro měření na jedné sondě [49].	36
Tabulka 7: Datalogger MicroLog SDI-MP, technické parametry [53].....	37
Tabulka 8: Technické parametry senzoru SMT100 [54].	38
Tabulka 9: Specifikace snímače CS655 [55].....	39
Tabulka 10: Ultrazvukový přístroj Pundit Lab, technická specifikace [56].	40
Tabulka 11: Hodnoty elektrického odporu měřené Z-metrem a stanovená vlhkost substrátu.	45
Tabulka 12: Hodnoty měřené kapacitními snímači a stanovená vlhkost substrátu.	46
Tabulka 13: Hodnoty měřené ultrazvukovou metodou a stanovená vlhkost substrátu.	51