

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO
MODELOVÁNÍ**



**Česká
zemědělská
univerzita
v Praze**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Porovnání prostorové a časové variability vlhkosti lesní půdy
bukového a smrkového porostu s využitím senzoru TMS4**

Vedoucí: Ing. Lukáš Jačka, Ph. D.

Konzultant: Ing. Marta Kuželková

Bakalant: Martin Kirchhof

PRAHA, 2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Kirchhof

Vodní hospodářství

Název práce

Porovnání prostorové a časové variability vlhkosti lesní půdy bukového a smrkového porostu s využitím senzoru TMS4

Název anglicky

Comparison of spatial and temporal variability of forest soil moisture in beech and spruce stands using the TMS4 sensor

Cíle práce

Hlavní cíle této bakalářské práce jsou:

- 1) Provedení laboratorní přípravy senzorů TMS4 a jejich následná instalace v terénu.
- 2) Vyhodnocení a porovnání dat z průběhu půdních vlhkostí za celé období měření.
- 3) Porovnání prostorové variability půdní vlhkosti smrkového a bukového porostu.

Dílčím cílem je zpracování literární rešerše na téma hydrologie lesních porostů s bližším zaměřením na smrkové a bukové monokulturní porosty.

Metodika

V teoretické části, na základě literární rešerše, identifikovat a popsat rozdíly mezi hydrologickým režimem lesního porostu smrkové a bukové monokultury. Dále porovnat architektonické rysy těchto dřevin a popsat jejich vliv na vstup srážkové vody do lesní půdy.

V praktické části provést laboratorní standardizaci senzorů TMS4 a založit kontinuální monitoring půdní vlhkosti v okolí typického jedince buku a smrku. Dále vyhodnotit data půdních vlhkostí za období celého monitoringu a porovnat jejich průběh mezi oběma porosty. Následně porovnat prostorové rozložení půdní vlhkosti ve zvolených časových krocích.

Doporučený rozsah práce

30

Klíčová slova

Lesní hydrologie, buk, smrk, půdní vlhkost, TMS 4, chytrá krajina

Doporučené zdroje informací

- Bialkowski, R., & Buttle, J. M. (2015). Stemflow and throughfall contributions to soil water recharge under trees with differing branch architectures. *Hydrological Processes*, 29(18), 4068-4082.
- ČERNOHOUS, F. Š. V. (2015). Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60(1), 53-63.
- CHANG, M. *Forest hydrology : an introduction to water and forests*. Boca Raton: CRC, 2002. ISBN 0-8493-1363-5.
- Levia, D. F., Nanko, K., Amasaki, H., Giambelluca, T. W., Hotta, N., Iida, S. I., ... & Yamada, K. (2019). Throughfall partitioning by trees. *Hydrological Processes*, 33(12), 1698-1708.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., & Verhoest, N. E. (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(1), 33-45.
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., Haase, T., 2019. Climate at ecologically relevant scales: a new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agri. For. Meteorol.* 268, 40–47.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Marta Kuželková

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 15. 03. 2023

Abstrakt

V posledních letech dochází k ohrožení lesních porostů především suchem, které způsobuje náchylnost stromů k nemocem, k napadání škůdci a tím dochází k oslabení a následnému úhynu stromů.

Z tohoto důvodu bylo provedeno měření půdní vlhkosti v lokalitě Amálie, která se nachází v chráněné krajinné oblasti Křivoklátsko. Zde byly monitorovány hodnoty půdní objemové vlhkosti u dvou vybraných zástupců nejrozšířenějších stromů v české republice, kterými jsou smrky a buky. Tyto dřeviny mají rozdílné hydrologické režimy a dá se tedy předpokládat, že i hodnoty půdní vlhkosti se budou v čase a prostoru lišit. Pro každý strom byly zvoleny dva kruhy senzorů, které zkoumaly změny vlhkosti, lišící se se vzdáleností od stromu.

Z výzkumu vyplývá zjištění že v chladnějších měsících lze pozorovat rozdílné hodnoty vlhkostí mezi vnějším a vnitřním kruhem senzorů, u obou z vybraných stromů, nicméně u buku se tyto hodnoty liší v maximech jenom o 4 % objemové vlhkosti, zatímco u smrku se tento rozdíl zvětšuje a v maximech dosahuje až 8 %.

V oblasti půdní vlhkosti se objevuje velké množství výzkumů, které s globálně rostoucí teplotou, budou čím dál důležitější z hlediska zadržení vody v přírodě a vlivu sucha na evapotranspiraci, růst a vitalitu rostlin. Proto bylo přínosné vypracovat práci zabývající se těmito problémy, které mohou pomoci v dalších výzkumech.

Klíčová slova: lesní hydrologie, buk, smrk, půdní vlhkost, TMS-4, chytrá krajina

Abstract

In recent years, forest stands have been threatened primarily by drought, which makes trees more susceptible to diseases and pest infestations, leading to weakening and subsequent death of the trees.

For this reason, soil moisture measurements were taken in the Amálie locality, located in the protected landscape area of Křivoklátsko. Soil volumetric moisture values were monitored for two selected representatives of the most common trees in the Czech Republic, spruce and beech. These tree species have different hydrological regimes, and therefore it can be assumed that soil moisture values will vary over time and space. Two sets of sensors were chosen for each tree, which examined moisture changes at different distances from the tree.

The research found that in colder months, different moisture values can be observed between the outer and inner circle of sensors for both selected trees. However, for beech, these values differ in maxima by only 4% of volumetric moisture, while for spruce, this difference increases and reaches up to 8% in maxima.

There are a large number of studies in the area of soil moisture, which with the globally increasing temperature will become increasingly important in terms of water retention in nature and the impact of drought on evapotranspiration, plant growth, and vitality. Therefore, it was beneficial to develop work that addresses these issues, which can help in further research.

Key words: forest hydrology, beech, spruce, soil moisture, TMS-4, smart landscape

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Porovnání prostorové a časové variability vlhkosti lesní půdy bukového a smrkového porostu s využitím senzoru TMS4 vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzi tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

Kirchhof Martin

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukáši Jačkovi Ph.D, za jeho trpělivost při vedení mé bakalářské práce, dále za věcné rady při zpracování bakalářské práce. Dále mé díky patří Ing. Martě Kuželkové za poskytnuté konzultace během práce a za pomoc při měření v laboratoři.

Obsah

1. ÚVOD	1
2. CÍLE PRÁCE	3
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	4
3.1. Půda a její vlastnosti	4
3.1.1. Význam půdy	4
3.1.2. Vznik půdy	4
3.1.3. Složení půdy	5
3.1.3.1. Organická hmota	6
3.1.4. Půdní zrnitost	7
3.1.5. Pórovitost půdy	8
3.1.6. Půdní potenciál	9
3.1.7. Vlhkost půdy	9
3.1.7.1. Hmotnostní vlhkost půdy	10
3.1.7.2. Objemová vlhkost půdy	10
3.1.8. Hydrolimity	10
3.2. Metody měření půdní vlhkosti	11
3.2.1. Metody přímé	11
3.2.1.1. Gravimetrická metoda	11
3.2.2. Metody nepřímé	12
3.2.2.1. Odporová metoda	12
3.2.2.2. Kapacitní metoda	12
3.2.2.3. TDR.....	13
3.2.2.4. TDT	13
3.3. Lesní hydrologický cyklus	14
3.3.1. Lesní půda	15
3.3.2. Srážkové fenomény v lesích.....	15
3.3.2.1. Stemflow	15
3.3.2.2. Throughfall.....	16
3.3.2.3. Intercepce půdního povrchu.....	18

3.3.2.4. Půdní preferenční proudění	18
3.3.3. Monokulturní porosty	19
3.3.3.1. Smrk a buk	19
3.3.4. Smíšené lesy a jejich vliv na vlhkost	20
4. POPIS VÝZKUMNÉ LOKALITY.....	22
4.1. Poloha.....	22
4.2. Podnebí.....	23
4.2.1. Teplota.....	23
4.2.2. Srážky.....	24
4.3. Charakteristika půdy.....	24
4.4. Chytrá krajina I.....	25
5. METODIKA	26
5.1. Standardizace čidel TMS4.....	26
5.1.1. Příprava a měření	26
5.1.2. Přenos dat a stanovení korekce signálu.....	27
5.2. Umístění senzoru na lokalitu.....	27
5.2.1. Výběr vhodných reprezentačních stromu	27
5.2.2. Usazení a ochrana	28
5.3. Práce s daty.....	29
5.4. Výběr vhodného časového úseku pro zjišťování úbytku vlhkosti v okolí buku a smrku.....	30
6. VÝSLEDKY	31
6.1. Porovnání vlhkosti vnější a vnitřních senzorů u buku	31
6.2. Porovnání vlhkosti vnějších a vnitřních senzorů u smrku.....	32
6.3. Porovnání buku a smrku.....	33

6.4.	Teplota a objemová vlhkost	33
6.5.	Interpretace výsledků umístěných senzorů v prostoru	35
7.	DISKUSE	39
8.	ZÁVĚR.....	41
9.	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	43

1. Úvod

Lesy pokrývají třetinu plochy České republiky. Díky tomu mají velký vliv na mnoho funkcí v přírodě. Například zpomalují odtok povrchových vod, snižují vysychání půdy či rychlost větru a ovlivňují klima ve svém okolí (MZ, 2021). V posledních letech jsou ohroženy především smrkové lesy kvůli kůrovci, který se přemnožil v důsledku suchého počasí minulých let. Právě sucho je jedním z největších problémů, který způsobuje oslabení stromů společně ještě s dalšími abiotickými vlivy, jako je nedostatek prospěšných látek pro stromy, silné poryvy větru anebo nerovnoměrnost srážek, která souvisí s již zmíněným suchem. Oslabené stromy jsou následně více zranitelné dalšími biotickými činiteli, jako jsou například houbové patogeny. Nemají sice tak obrovské následky v porovnání s kůrovcem, nicméně zasahují i listnaté stromy což značně zvyšuje jejich nebezpečnost.

Z těchto důvodů je žádoucí sledování hydrologického chování jehličnatých a listnatých stromů a následně jejich možnou vzájemnou symbiózu v lesním prostředí, kdy by za ideálních podmínek nedocházelo k velkému zasažení invazivními činiteli.

Z hlediska lesní půdy by bylo zajímavé pozorování vlhkosti pod bukem a smrkem, což jsou nejrozšířenější zástupci stromů na našem území, přičemž se tyto dvě dřeviny výrazně liší ve své struktuře. Ten nejdůležitější rozdíl je v listech, které u buku opadávají, zatímco jehlice u smrku neopadávají. Mezi další odlišnosti mezi těmito dřevinami může být zmíněna drsnost kůry, která je u buku hladká a smrku šupinatá. Jejich různorodost má vliv na hydrologické chování, které může způsobit pozitivní symbiózu obou dřevin a mohla by znamenat velký pokrok v lesním ekosystému (Britannica, 2021;2022).

Pro efektivní monitoring průběhu objemové vlhkosti v čase je v dnešní době k dispozici několik desítek zařízení, které fungují na různých principech a pomocí odlišných metod měření můžeme zjistit hodnoty vlhkosti v různých situacích, ať už jde o krátkodobé přesné měření pomocí TDR nebo méně spolehlivé ale zato dlouhodobé měření s velkým množstvím dat a nízkou pořizovací cenou za pomoci TDT technologie.

Při nízké ceně je možné osadit několik desítek senzorů na lokalitu a díky tomu zjistit vlhkost celé lokality mnohem snadněji, bez složité přípravy půdního horizontu

na měření a eliminovat tak komplikace spojené s ostatními metodami. Je však třeba počítat s tím, že tyto nízkonákladové senzory je před použitím v terénu nutné kalibrovat na specifické půdní podmínky.

V této práci jsou nejprve formou literární rešerše shrnuty zejména hydrofyzikální vlastnosti půdy, metody měření objemové vlhkosti, hydrologické chování lesních porostů s bližším zaměřením na smrkové a bukové porosty. A dále, v rámci praktické části, experimentálně vyhodnoceny vztahy mezi vlhkostí v okolí smrku a buku na základě časové a prostorové variability.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je porovnání hydrologického půdního režimu pod vybranými jedinci buku a smrku v rámci časové a prostorové variability. V prvotní fázi bude provedena laboratorní standardizace senzorů, které budou následně dále umístěny na lokalitu chytré lesní krajiny Amálie.

Navazujícím cílem bude interpretace rozdílů vlhkostí mezi vnitřním a vnějším okruhem senzorů umístěných v okolí stromu a také rozdíly objemových vlhkostí mezi stromy samotnými, kdy každý z nich má jiné vlastnosti v pozorovaném období.

Posledním cílem této práce bude porovnání prostorové variability půdní vlhkosti, ve vztahu k terénu, posouzení vlivu světových stran na následné výsledky a porovnání skladby smrkové a bukové svrchní části půdy a celkové stavby stromu.

Dílčím cílem, který navazuje na předešlé, je vypracování literární rešerše zabývající se hydrologií lesních porostů z hlediska rozdílnosti smrkového a bukového porostu nebo jejich kombinace a následný vliv na okolí.

Hlavní hypotézou, která bude řešena v této práci, je rozdílnost půdní vlhkosti mezi vnějším a vnitřním kruhem senzorů, kdy u buku předpokládáme větší vlhkost vnitřních senzorů, zatímco u smrku by měla být pozorována vyšší vlhkost u vnějších okruhu senzorů.

3. Literární rešerše

3.1. Půda a její vlastnosti

Půdu lze popsat jako přírodní útvar, který tvoří nejsvrchnější vrstvu naší zemské kůry. Jedná se o horizontálně nebo vertikálně strukturovaný horizont tvořící půdní obal Země neboli pedosféru. Vědní obor, který zkoumá pedosféru se nazývá pedologie. Ten zkoumá různé typy půd na základě jejich odlišností, chemických a fyzikálních vlastností a jejich rozložení na Zemi. Díky tomu může být půda lépe využívána pro potřeby společnosti například pro zemědělskou nebo vodohospodářskou činnost (Pavlů, 2018).

Půda je flexibilní systém vytvářející vhodné podmínky pro přežití všech živých organismů a je nenahraditelnou složkou přírodního bohatství. Proto je důležité ji chránit nejen pro dnešní potřeby, nýbrž i pro další generace (MŽP, 2019).

3.1.1. Význam půdy

Význam půdy je velmi široký, nicméně pro společnost je nejdůležitější z hlediska její produkční schopnosti, například v zemědělství. Další významnou funkci plní půda v hydrologii, protože slouží jako bezpečný a filtrační vstup do podpovrchových vod, kde se uchovává pro další využití (Vašků, 2008).

3.1.2. Vznik půdy

Vznik půdy je dlouhodobý proces, při kterém dochází ke zvětrávání svrchní části zemské kůry, rozkladu produktů různých organismů a zbytků jejich odumřelých těl. Díky půdotvorným činitelům dochází k rozdílné stavbě a složení půdy. Půdotvorné činitele rozdělujeme do dvou skupin, a to půdotvorné faktory a podmínky půdotvorného procesu.

Mezi půdotvorné faktory se řadí například půdotvorný substrát, klima, podzemní voda nebo vliv organismů. Do půdotvorných procesů se řadí georeliéf zemského povrchu a především čas (Mentlík, 2003).

Vývoj půdy je spjat s vývojem země, na které se v průběhu času hromadí odumřelé zbytky, jež se poté přeměňují na humus. Hlavním zdrojem pro tvorbu humusu a veškerého organického materiálu je fotosyntéza, která zvyšuje obsah uhlíku na Zemi. Všechny tyto procesy se nacházejí v geologickém cyklu, který utváří půdu po dobu několika milionů let (Šarapatka, 2014).

3.1.3. Složení půdy

Půdu můžeme rozdělit na živou a neživou složku. Živou složku nazýváme edafon, tímto pojmem rozumíme organismy žijící v půdě, které pomáhají vytvářet nové půdní struktury a zároveň provzdušňují půdu. Neživou složkou chápeme anorganické materiály jako je prach, písek nebo štěrk, které tvoří většinu objemu půdy (Vráblíková & Vráblík, 2006).

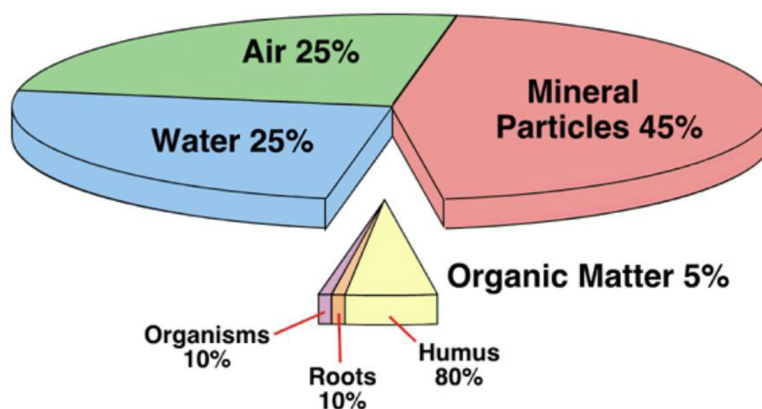
Do živé složky řadíme také humus, což je půdním edafonem přeměněna organická hmota. Všechny tyto složky zmíněné výše mají jednu vlastnost a to, že jsou pevného skupenství (Pavlů, 2018).

Další důležitou složkou v půdě je půdní voda. Je to souhrn veškeré vody, která se nachází v půdě, ať už je ve formě kapalné, pevné, nebo plynné. Díky vodě dochází k fyzikálním nebo chemickým a biologickým pochodům, které vytváří humus.

Voda může prostupovat půdou několika způsoby. Nejběžnější formou je gravitační voda, na kterou působí zemská tíže a v důsledku toho, prostupuje voda skrz půdní profil. Mimo gravitačně řízený tok dochází v půdě také ke kapilárním jevům. Jde o fyzikální proces pohybu vody, který funguje buď proti nebo se stejným směrem jako gravitační síla. Voda se v úzkých prostorech (kapilárách) šíří všemi směry, nicméně nejdůležitější je pro nás voda prostupující půdou vzhůru, což můžeme pojmenovat jako vzlínání vody. Pokud se nejedná ani o jednu z těchto možností pak se nejspíše jedná se o vodu absorpční. Tato forma vody poutá jednotlivá zrna hornin za pomoci slabých vazebných interakcí (Toth 2009).

Půdní vzduch je další důležitá součást půdy. Vyplňuje všechny volné prostory, které nejsou již zaplněné půdní vodou. Oproti složení plynů v atmosféře je v půdě obsaženo větší množství oxidu uhličitého a méně kyslíku. Kvůli této nerovnováze, dochází k difúzi mezi půdou a atmosférou. Tento jev se nazývá půdní dýchání (Mentlík, 2003).

Na obrázku 1 můžeme vidět jednotlivé procentuální zastoupení všech složek půdy jako jsou minerální částice, půdní voda, půdní vzduch a také organickou hmotu (Pidwirny, 2006).



Obrázek 1 - Zobrazení procentuálního zastoupení složek půdy

I když organická hmota tvoří poměrně malou část celkového objemu půdy, tak její přítomnost či absence, může významně ovlivnit hydrofyzikální vlastnosti půdy (Kutílek, 1978). Z tohoto důvodu, je této významné složce půdy věnována následující kapitola.

3.1.3.1. Organická hmota

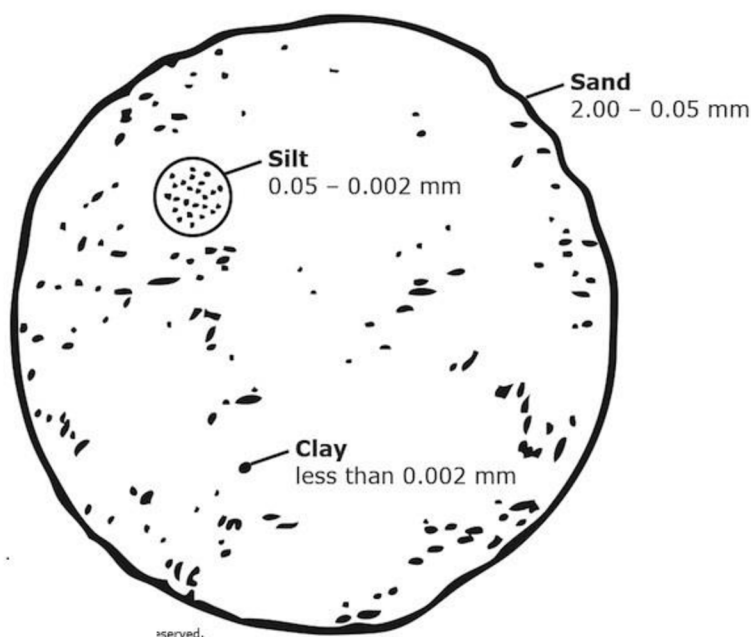
Obecně se používá termín organická hmota pouze pro neživý organický materiál v půdě, který tvoří zdaleka největší část celkových organických složek. Živé organické složky, které jsou součástí půdní bioty, vytváří menší část celkového organického materiálu. Půdní organická hmota může být rostlinného, živočišného nebo mikrobiálního původu a může být relativně čerstvá nebo vysoce rozložená a transformovaná. Z chemického hlediska je možné v půdě identifikovat organickou hmotu, složky patřící do hlavních tříd přirozeně se vyskytujících organických sloučenin vyskytujících se v rostlinách a zvířatech. Každá z těchto sloučenin může být nalezena v široké škále fyzikálních prostředí a fyzikálně chemických asociací (Swift, 1996). Protože je organická hmota směs organických sloučenin různého biologického původu, je mineralizace uhlíku výsledkem složitého souboru biochemických procesů prováděných širokou škálou organismů. Mezi další prvky, které jsou nejvíce zastoupené v organické hmotě jsou kyslík, vodík a dusík (Carter, 2007).

Také zvýšení teploty způsobuje zrychlený rozklad organické hmoty. Těmito procesy dochází ke zvýšení vlhkosti půdy vedoucí k větší produkci biomasy a tím se i zvyšuje počet reziduí pro půdní biotu. Pokud ale dojde k většímu nasycení, pak může docházet ke špatnému provzdušňování zeminy. Většina půdních organismů potřebuje kyslík a pokud není dostupný, dochází ke snížení míry mineralizace a úhynu aerobních organismů. Tyto procesy pak vedou k poškození kořenů rostlin odpadními produkty nebo vytvářením příznivých podmínek pro choroboplodné organismy (Bot & Benites, 2005).

3.1.4. Půdní zrnitost

Půdní zrnitost je jedna z vlastností anorganické složky půdy, která popisuje, jak jsou jednotlivé částice půdy velikostně odlišné. Například rozděluje velikost půdních částic od velkých kusů hornin až po nejmenší jílovité částičky (Tindall, 1999).

Základní dělení půdy je na skelet a na jemnozem. Jemnozem má rozměry menší než 2 milimetry a dělíme ji na jíl, prach a písek. Jejich velikostní rozdíly jsou zobrazeny na obrázku 2.



Obrázek 2 - Velikostní rozdělení jemnozemě

Částice nad 2 milimetry rozdělujeme na hrubý písek, štěrk, kamení a balvany. Ty jsou souhrnně označovány jako skelet.

Zrnitost půdy lze stanovit po splnění několika předpokladů. Zaprvé by měla být zemina dispergována, neboli rozrušená na co nejmenší částice. Dále by měla být zbavena organické části půdy, která stmeluje půdní částice.

Pomocí těchto postupů je připravována půda k zrnitostnímu rozboru tak, aby se poté dala vyhledat v klasifikačním systému pro Českou republiku. V tomto klasifikačním systému máme několik hranic, podle kterých jednotlivé velikosti částic rozlišujeme (Pavlásek & Jačka, 2014).

Tímto rozbořem zjistíme podíl frakcí jílu prachu a písku, a tedy půdní druh. Na základě půdních druhů můžeme odhadovat hydrologické chování půdy například její schopnost infiltrace. Schopnost infiltrace je tím pádem také závislá na velikosti půdních částic, přičemž u prachových až jílnatých půd se tato schopnost snižuje. Chování půdy je názorně zobrazeno v tabulce 1 od Kohnkeho 1968, kde jsou hodnoty infiltrace větší ve všech půdách s vegetačním krytem oproti bez vegetačního krytu (Chmelová, 2020).

Tabulka 1 – Velikost infiltrace půd (Chmelová, 2020)

půdní druh	velikost infiltrace (mm/h)	
	s vegetačním krytem	bez vegetačního krytu
hlinito-písčité	50	25
písčito-hlinitá	25	13
hlinitá	15	8
jílovito-hlinitá	5	3

3.1.5. Pórovitost půdy

Pórovitost udává poměr mezi objemem půdních pórů a celkovým objemem půdy. Další definicí by mohla být pórovitost popsána jako třífázový systém, který lze zapsat vzorcem jako poměr objemu plynné a kapalné fáze ku součtu objemu plynné kapalné a pevné fáze ve vzorku zkoumané půdy. Fyzikální vlastnosti půdy se mění v závislosti na velikosti a charakteru půdních pórů. Pro popis pórů, které mají složitou strukturu způsobenou velikostí zakřivení a průměrem, se využívá pro zjednodušení ekvivalentní průměr. Jejich uspořádání a velikost mají velký vliv na sílu procesů v půdním

prostředí. Pórovitost se udává v procentech a je hlavním působitelem na objemovou hmotnost (Pavlásek & Jačka, 2014).

Pórovitost je také značně ovlivněna tím, jestli jsou v ní tvořené půdní agregáty, které se zřídka kdy vyskytují v písčitéch půdách, proto jsou tyto půdy méně úrodné a s menším obsahem organické hmoty (Kutílek, 1978)

3.1.6. Půdní potenciál

Energetický potenciál půdní vody lze definovat jako rozdíl mezi půdní a standardní vodou. Díky rozdílným potenciálům dochází v půdním prostředí k proudění z míst s vyšším potenciálem do míst s nižší potenciální energií. Terminologicky jde půdní potenciál popsat jako množství práce, kterou je nutné vykonat pro přemístění čisté vody do půdního prostředí, do určité nadmořské výšky. Tím pádem lze celkový potenciál vyjádřit jako algebraický součet potenciálů složek odpovídajících různým polím působícím na půdní vodu:

$$\Phi = \varphi_g + \varphi_w + \varphi_a + \varphi_o + \varphi_e \quad (\text{rovnice 1})$$

φ_g je gravitační potenciál a vyjadřuje práci v gravitačním poli a jak daleko se nacházíme od srovnávací hladiny. φ_w je vlhkostní potenciál, který je roven práci vykonávané při poutání vody v půdě. Dalším potenciálem je pneumatický, který má označení φ_a . Tento potenciál vyjadřuje rozdíly mezi tlaky půdního vzduchu a tlaku na hladinu podzemní vody. φ_o je osmotický potenciál a vyjadřuje rozdíl v osmotickém tlaku na úrovni hladiny podzemní vody a v posuzovaném bodě. Posledním potenciálem je zátěžový (φ_e), který vyjadřuje míru deformace půdy (Warrick, 2001).

3.1.7. Vlhkost půdy

Pro optimální funkci přírodních ekosystémů a pro efektivní zemědělskou a lesnickou produkci je nezbytná přítomnost půdní vody. V následujícím textu bude představena definice půdní vlhkosti a možnosti jejího měření v proměnlivém půdním prostředí za pomoci jednoduchých fyzikálních vztahů.

3.1.7.1. Hmotnostní vlhkost půdy

Hmotnostní vlhkost je fyzikální veličina, která je definovaná jako poměr hmotnosti kapalně fáze a celkové váhy půdy. Nejčastěji je tato hodnota používána v procentech, proto je nutné výsledek stonásobit viz. rovnice 2 (Ranjan, 2007).

$$w = \frac{w_w}{w_s} * 100 \quad (\text{rovnice 2})$$

3.1.7.2. Objemová vlhkost půdy

U objemové vlhkosti je menší míra přesnosti při práci s materiály nestálého objemu. Objem materiálů se mění například bobtnáním nebo smršťováním, což se u hmotností vlhkosti nestává v tak velké míře. K zjištění objemu vody ve vzorku je využíváno číslo vlhkosti, které vyjadřuje poměr objemů mezi objemem vody a pevnou fází viz. rovnice 3 (Ranjan, 2007).

$$\omega = \frac{V_w}{V_M} \quad (\text{rovnice 3})$$

3.1.8. Hydrolimity

Půdní hydrolimity charakterizují rozhraní působení určitých sil a půdní hydrologické vlastnosti jako například pohyblivost půdní vody a její dostupnost pro rostliny. Hydrolimity jsou děleny na základní, které jsou popisovány skutečnými půdními vláhovými charakteristikami a tvoří jasné hranice mezi energetickými kategoriemi půdní vody. Druhými jsou aplikované hydrolimity a ty jsou charakterizovány podrobněji, aby došlo k optimálnímu využívání půdní vody rostlinami (Vlček et al., 2020).

Mezi základní hydrolimity patří adsorpční vodní kapacita, retenční vodní kapacita a lentokapilární bod. Retenční vodní kapacita popisuje rozhraní vody mezi kapilárním a gravitačním stavem a jedná se o maximální množství vody, které je schopna půda zadržet. Adsorpční vodní kapacita obsahuje pouze vodu poutanou silami adsorpčními, které zabraňují pohybu k rostlinám, a nachází se na rozhraní adsorpčních a kapilárních sil (Kutílek, 1978).

Mezi aplikované půdní hydrolimity řadíme polní vodní kapacitu, která popisuje nasycenost půdy vodou, se všemi póry plně zaplněnými, a po překročení této hranice dochází k odtoku gravitační vody, která nemá prostor, ani sílu se zde dále ukládat.

Dalším bodem je bod trvalého vadnutí, který je kritický pro rostliny a při němž k rostlinám neproudí žádná půdní voda, jelikož ta je držena adsorpčními silami, přičemž rostliny vyžadují pohyblivou kapilární vodu (Vlček et al., 2020).

3.2. Metody měření půdní vlhkosti

Metody měření půdní vlhkosti dělíme do více skupin. Pokud dochází k odběru vzorku z půdního pokryvu pak se jedná o metodu destruktivní. Pokud k takovému úkonu nedochází a měříme přímo na lokalitě bez porušení půdy, pak se jedná o metodu nedestruktivní (Kutílek, 1978).

Mezi další rozdělení, které u měření půdní vlhkosti rozlišujeme, jsou metody přímé a metody nepřímé. Toto rozdělení bude popsáno níže.

3.2.1. Metody přímé

Tyto metody jsou založené na měření procentuálního zastoupení vody v půdě a není zde nutné měřit objem vody jinými fyzikálními veličinami, které souvisí s vlhkostí.

3.2.1.1. Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je jednou z nejjednodušších metod měření vlhkosti v půdě. Jedná se v zásadě o nejkonomičtější metodu, protože celý proces je jednoduchý a není zapotřebí složitých a drahých přístrojů. Vlhkost půdy se v této metodě stanoví z množství vody odstraněné z půdy sušením. Následný rozdíl hmotností mezi vzorkem s vodou a vysušeným vzorkem udává hmotnost vody. Výsledná hodnota je pak hmotnost vody obsažená ve vzorku. Následně pak lze lehce spočítat vlhkost vzorku. Nejzásadnějším požadavkem pro používání této metody je přesnost vážení a taky dostatečná teplota sušení, která by se měla pohybovat kolem 105 °C, aby došlo k přerušování silových vazeb mezi částicemi zeminy a molekulami vody (Kutílek, 1978).

Nevýhodami gravimetrické metody je náročnost odebírání vzorků, delší doba sušení a její nevhodnost pro dlouhodobé měření na lokalitách. Navíc při odebírání vzorku dochází k poškození půdního profilu, který může více či méně zkreslit skutečnou vlhkost půdy pro další měření. Vzorky také nemohou být odebírány z příliš velkých hloubek, maximálně do několika desítek centimetrů, nicméně to je ve většině případů dostatečné (Johnson, 1962).

3.2.2. Metody nepřímé

Tyto metody jsou založené na principu měření konkrétní fyzikální veličiny například elektrická kapacita, elektrický odpor, pohlcování gama záření materiálem nebo pomocí zpomalení rychlosti neutronů (Kutílek, 1978). Všechny tyto veličiny mají funkční vztah s vlhkostí, díky které mohou být použity pro měření vlhkosti.

3.2.2.1. Odporová metoda

Metoda odporová se řadí mezi metody nepřímé a je založena na vodivosti vlhké půdy, která se chová jako polovodivý nehomogenní materiál. Se zvyšujícím se obsahem vody v půdě se zvyšuje i její elektrická vodivost. Nevýhodou této metody je, že při vyšších vlhkostech půdy je velmi nepřesná kvůli malé změně v odporu. Dále pak tato metoda není vhodná při rychlých změnách vlhkosti a není žádoucí v bobtnaných nebo písčítých půdách (Kutílek, 1978).

3.2.2.2. Kapacitní metoda

Kapacitní metoda se řadí mezi metody nepřímé. Metoda je založena na změně relativní permitivity půdy s obsahem vody. Výsledky měření jsou získávány ze slabého proměnného elektrického pole.

Permitivita je bezrozměrná jednotka a značíme ji řeckým písmenem epsilon (ϵ). Její hodnota se pohybuje mezi číselným rozpětím 1 až 81, kdy k hodnotě 1 je přiřazen vzduch a k hodnotě 81, voda při teplotě 18 °C. Půda má většinou hodnotu mezi 2 až 10. Kapacitní metoda nabízí řadu výhod oproti ostatním konkurenčním metodám, jako je třeba rychlost měření, bezradiační měření a taky vcelku nízká cena při dlouhodobém využívání. Při použití pomocných systémů může být použita pro dlouhodobé měření vlhkosti (Kutílek, 1978).

Mezi nevýhodami kapacitní metody může být například instalace trubice do půdního horizontu, při které může být porušena struktura, nebo u sypkých zemin rozrušena celá celistvost struktury zeminy.

Zajímavostí je, že půdní profily měřené kapacitní metodou, vykazují podstatně více detailů, než profily měřené ve stejném otvoru pomocí neutronové sondy. Tyto detaily dobře korelují s profily stanovenými gravimetrickou metodou (Bell, 1987).

3.2.2.3. TDR

Na měření pomocí kapacitní metody se ve většině případů používá TDR (Time domain reflectometry), který vyhodnocuje elektrickou vodivost a půdní vlhkost. Oba tyto atributy mají značnou důležitost při studiu různých hydrologických procesů.

Jedná se v podstatě o novou metodu na poměry hydropedologie. První použití této metody bylo v roce 1980. Jako hlavní výhodu by bylo vhodné zmínit velmi vysokou přesnost s odchylkou mezi 1 až 2 procenty půdní vlhkosti. Další výhodou je jednoduchá kalibrace na různé typy půd a také absence radiačního rizika, která je spojená s metodami neutronové sondy nebo gama zářením. Měření pomocí TDR je v některých ohledech snadnější a je schopné poskytovat kontinuální měření prostřednictvím automatizace a multiplexování. Mezi nevýhody se řadí asi jen vysoká pořizovací cena a tím i nemožnost měření na více místech najednou, popřípadě zanechání přístrojů na měřené lokalitě bez dozoru (Jones, 2002).

3.2.2.4. TDT

Kapacitní metoda se v posledním desetiletí posunula velmi rychle dopředu v oblasti přesnosti, dostupnosti a získávání velkého množství dat z měřených lokalit. TDT neboli time-domain transmission, je velmi podobná metoda jako již zmíněná TDR metoda. Narozdíl od TDR, které měří odrazové impulzy vycházející ze zařízení, tak TDT měří přenosy signálu, které poté zařízení vyhodnocuje (Blonquist et al., 2005).

Příkladem TDT zařízení může být TMS-4. Jedná se už o čtvrtou generaci tohoto přístroje, který byl poprvé uveden na trh v roce 2009. Od této doby se již toto zařízení několikrát zdokonalovalo, jak velikostí objemu dat, které lze zaznamenat, tak i životností přístroje, která je přibližně stanovena na 10 let kontinuálního měření v časových cyklech po patnácti minutách (Wild et al., 2019).

TMS-4 je 29 cm vysoký přístroj, přičemž 14 centimetrů představuje spodní část s vlhkostním senzorem. Mezi jeho přednosti náleží 3 teplotní senzory umístěné na zařízení. Jeho výška poskytuje i možnost zjištění unikátních klimatických podmínek pro rostliny nízkého vzrůstu. Další výhodou tohoto zařízení je i jednoduché a rychlé získávání dat do počítače pomocí konektoru umístěného ve vrchní části. Během několika desítek sekund jsou ze zařízení stažena data za několik měsíců či let (Wild et al., 2019).

Pro sběr vlhkostních dat je použita metoda dielektrické permitivity, v tomto případě je nejčastěji využita technologie TDT. Jde o metodu, kdy jsou vyslány do 30 centimetru dlouhého obvodu vysokofrekvenční elektromagnetické impulzy (Blonquist et al., 2005). Po přijetí signálu druhou stranou obvodu dojde k vyslání opačného signálu. Tento proces vyslání 2 signálů trvá 640 mikrosekund. Počet impulzů uvádí prvotní hodnoty dat vlhkosti. Čím více impulzů tím větší vlhkost má zkoumaný vzorek (Wild et al., 2019).

Výhodou této metody je možnost dlouhodobého měření na jedné lokalitě bez změny polohy přístroje. Další výhodou je nízká pořizovací cena oproti přístrojům s TDR metodou. A předností této metody je možnost měření v oblasti blízkosti země, kde žije většina organismů a tím umožňuje zkoumání souvislostí s variabilitou mikroklimatu a biodiverzitou. Jako nevýhodu této metody je nutné zmínit možnost poškození přístrojů zvěří nebo a jejich horší umístování do půdy s vyšším obsahem kamenů a šterku, které poškozují měřící obvod na desce plošných spojů (Wild et al., 2019).

3.3. Lesní hydrologický cyklus

Mezi hlavní vstupy vody do lesního hydrologického cyklu patří srážky. Ty jsou následně zadržovány ve formě intercepce. Forma zadržování se liší les od lesa, nicméně mezi nejdůležitější faktory, které lze dobře zhodnotit, patří typ stromu (listnaté, jehličnaté smíšené), tvary a velikosti korun stromu a také velikost bylinného patra. Mezi další proměnné lze zařadit opad ze stromů v podobě listů nebo jehlic (Gerrits, 2011).

Většina srážkové vody propadne na lesní půdu (throughfall) nebo stéká po listech a následně po kmeni (stemflow). Tato voda má možnost se dlouhodobě akumulovat v lesní půdě. Snižuje se zde výpar díky stínu ze stromů, konzistentní nižší teplotě a celkově se zpomaluje pohyb vody, která poté odtéká do vodních toků. U velkých lesních komplexů dochází ke zvýšení úhrnu srážek o 5 % až 6 % (Švihla 2001). Tento fenomén je zapříčiněn vyšší vlhkostí vzduchu nad velkými lesními celky. Také odtok z lesa je celkově nižší než například z polí. Zapříčiněno je to především vyšší intercepce lesních porostů oproti nízké vegetaci na polích (Švihla 2001). Při prudkých srážkách nedochází k velkým odnosům půdy a snižuje se efekt povodňových vln ve vodních tocích.

Voda, která neodtekla a stihla se vsáknout, je využívána kořenovým systémem nebo dále proudí do hlubších vrstev půdy, kde se shromažďuje v podobě podzemní vody. Dalším výstup vody z lesa je pomocí transpirace stromů, která slouží jako transportní médium. Všechny tyto procesy jsou ovlivněné několika faktory: velikostí lesních komplexů, vlhkostí, teplotou a také charakterem vegetačního krytu a morfologií terénu (Švihla 2001).

Poměr mezi intercepcí, stemflow a throughfall je ovlivněn druhem dřeviny, strukturou listů, koruny a kmene, a tudíž cestou pro proudění akumulované srážkové vody.

3.3.1. Lesní půda

Lesní půda má specifické uspořádání půdy do půdních horizontů, které není běžné jako například u zemědělských půd. Odlišuje se především ve svrchním horizontu A, který je složen podle typu lesa, nicméně buď se jedná o hrabanku v jehličnatých lesech nebo o listy a další spadlé části stromů a rostlin v různém stádiu rozkladu. Pod tímto horizontem se nachází vrstva humusu, která spolu s horizontem A tvoří dostatečně pórovitou oblast půdy, do které je zasakováno velké množství vody oproti zemědělským plochám nebo urbanistickému zastavění.

Historicky byly obdělávány půdy kvalitnější a bohatší na živiny, zatímco půdy s chudším obsahem živin zůstávaly s původní vegetací (ve většině případů lesní celky). Lesní půdy bývají mělké s větším množstvím kamení než zemědělské půdy. Protože většina lesních půd se vyskytuje na svažitém terénu, bývají mladší a s větší variabilitou. I tak mohou být některé z těchto půdních typů z pohledu pedologů velmi produktivní a obsahovat dostatek rozličných živin a minerálů (Němeček, 2001; Brooks, 2019).

3.3.2. Srážkové fenomény v lesích

V následujících kapitolách bude stručně popsán princip proudění srážek, dopadajících na koruny stromů a následné selekce jednotlivých typů srážek do níže zmíněných kategorií.

3.3.2.1. Stemflow

Stemflow je hydrologický proces, který zahrnuje tok vody po kmenech nebo stonkách rostlin poté, co zachytí srážku. Stemflow spolu s throughfall je zodpovědný za přenos

vody a živin z koruny do půdy, což může ovlivnit vlhkost půdy, dostupnost živin a mikrobiální aktivitu. Stemflow může také způsobovat erozní rokle v blízkosti kmene, zejména v tropických deštných pralesích, kde množství vody stékající po stonku může být výrazně zvýšeno. Objem a chemické složení stemflow závisí na různých faktorech, jako jsou druhy stromů, tvar listů, struktura větví, sezónnost a povětrnostní podmínky. Stemflow je důležitou součástí koloběhu vody a ekosystému fungujícího v zalesněných oblastech (Pidwirny, 2006).

Vlastnosti půdy v blízkosti stromů se výrazně odlišují od půdy ve vzdálenějším okolí. Probíhá zde zrychlený proces tvorby půdy a vyvinutější půdní struktury. Stemflow zvyšuje hladinu podzemní vody a zvyšuje nasycenost půdy vodou, což zapříčiňuje zrychlenou hnací sílu celého procesu přetváření a tvorby nové půdy. Stemflow má tedy charakter zvýšené aktivity stékající srážek a tento jev přetrvává během infiltrace a perkolace. Navíc má přímý a významný vliv na ráz půdního prostředí. Půdní hydraulické vlastnosti umožňují rychlé proudění vody v blízkosti stonků rostlin nebo kořenů stromů a mohou urychlovat proudění vody do hlubších vrstev půdy (Metzger, 2021).

Obecně platí, že díky stemflow efektu má okolí stromu vyšší koncentraci živin než u throughfall efektu. Stemflow, který proudí do půdy kolem paty stromu, byl stanoven jako důležitý mechanismus, kterým jsou stromy schopny odolávat suchu, zatímco nadbytečné srážky mohou vést k lokálnímu odtoku v blízkosti kmene (Johnson, 2006).

3.3.2.2. Throughfall

Throughfall označuje vodu prostupující skrz koruny stromů. Dělíme ji na dvě kategorie, a to na volný prostup (free throughfall) a uvolněný prostup vody (release throughfall). U druhé zmíněné kategorie se ještě dělí na podkategorie – prostup vody na stříkající (splash throughfall) a odkapávající vodní kapky (canopy drip). Kinetická energie pronikajících kapek, velikost kapek a rychlost se diferencuje v závislosti na třech již zmíněných typech průchodu vody skrz korunu stromu. V dnešní době je již objasněné, že zachycení deště je ovlivněné velikostí kapek. Co ovšem není známo, tak jsou procentuální zastoupení jednotlivých Throughfall kategorií, které již byly zmíněny výše. S využitím komplexních souborů dat propadů pod korunami stromů

jsme schopni objasnit roli různých vegetativních pokryvů na tvorbu a typ pronikající vody (throughfall) (Calder, 1986; Delphis et al., 2019).

Proudění půdní vody může být silně ovlivněné čistě srážkami. Nicméně půdní vlhkost a podzemní vody mohou být znovu doplněny v blízkosti kmene stromů, kde se jedná o stemflow efekt, který byl zmíněn v kapitole 3.3.2.1. o stemflow.

Nehledě na to, že pronikající voda je důležitým koncovým členem proudění vody do povodí a přispěvatelem tekoucí vody do lesní půdy, tak nemůžeme jednoznačně určit množství, které se tímto způsobem do půdy dostane, protože částečně závisí na typu propadu vody, jeho velikosti a intenzitě a také na typu listu (listnaté a jehličnaté stromy). Například u opadaných listnatých stromů je průměr propadajících kapek větší a se silnějším erozním efektem než u listnatých stromů, kde jsou strukturně vytvořené body pro bezpečné odkapávání kapek vody, a proto je při absenci listů zvýšený efekt síly Throughfall (Delphis et al., 2019).

Měření throughfall srážek se zkoumá pomocí několika přístrojů a metod. Jedna z prvních a nejjednodušších je dešťový simulátor. U této metody jde velmi dobře měnit podmínky, například velikost kapek a hustotu deště. Jeden z největších simulátorů na světě se nachází v Japonsku, kde lze zkoumat několik druhů stromů najednou. Propadající déšť je ve většině případů měřen pod korunami stromů pomocí laserových disdrometrů (Nanko et al., 2008).

Tyto laserové disdrometry jsou složeny z laserového vysílače a přijímače. Když kapka vody projde skrz laserový paprsek, pak je výstupní napětí z přijímače zmenšeno v poměru k zachycené ploše laserového paprsku. Tato změna je digitalizována a uložena na přenosném počítači připojenému k laserovému disdrometru. Velikost kapek se poté vypočítá ze vztahu mezi maximální zachycenou plochou ku výstupnímu napětí. Celkově se podařilo pomocí disdrometrů rozlišit jednotlivé typy padajících srážek skrz koruny stromů a došlo k následné kategorizaci a nastavení jednotlivých měřících postupů (Delphis et al., 2019).

V reálném prostředí se musí počítat i s abiotickými faktory (nesouvisející s živými organismy), které mohou ovlivňovat throughfall, jako třeba intenzita dešťových srážek nebo směr a rychlost proudění větru. Například byl zjištěn vztah mezi rozevřeností koruny a objemem throughfall srážek. V této souvislosti je propad deště oslaben, zatímco intenzita srážky se zvětšuje (Gerrits, 2011).

3.3.2.3. Intercepce půdního povrchu

Často je předpokládáno že srážky, které nejsou zachyceny korunou stromu (throughfall), jsou plně k dispozici pro následnou infiltraci půdou. Nicméně tento pohled je z větší části nepřesný. Lesní půda zachycuje srážky stejně jako koruny stromů a také může dočasně uchovávat vodu na nízké vegetaci, travním porostu nebo holé půdě. Obecně je zachycení vody určeno charakteristikami vegetace, charakteristikou srážek a rychlostí evaporace (Gerrits, 2011).

Podle typu vegetace se odlišuje množství vody, které lze na listech zadržet. Je nutné brát v potaz také tloušťku půdy. Ta se může měnit v různých ročních obdobích. Například na podzim, kdy dochází k opadu listu, při kterém má půdní vrstva největší tloušťku. V dalších ročních obdobích dochází k pomalému rozkladu a tím i zmenšení vrstvy. Sníh má také vliv na akumulaci schopnost půdy, zejména u listnatých stromů (Gerrits, 2011).

3.3.2.4. Půdní preferenční proudění

Preferenční proudění popisuje fyzikální jev rychlého transportu vody a rozpuštěných látek v půdě. Je pozorován ve všech typech půd a často také přispívá makropórovému proudění buď prasklinami nebo biopóry, jako jsou chodby žížal nebo zbytky po kořenových systémech (Bundt et al., 2001).

Variabilita preferenčního proudění je způsobena různými fyzikálními mechanismy. Často působí několik mechanismů současně, což vede k velkým variacím v proudících schématech (Hendrickx & Flury, 2001).

V neobdělávané lesní půdě jsou preferenční cesty velmi stabilní. Lze tedy předpokládat výrazně odlišné fyzikálně-chemické vlastnosti mezi preferenčními cestami a půdní maticí. Z toho vyplývá, že se tyto jevy mohou lišit v mikrobiální biomase a mikrobiálními společenstvími (Bundt et al., 2001).

Technika pro vizualizaci preferenčního proudění v půdě je vytvořena na bázi barevných barviv rozpuštěných ve vodě. Díky tomu je cesta proudu vody zbarvena a lze ji poté zkoumat při další manipulaci s půdním profilem (Bundt et al., 2001).

Srážky v lesním porostu jsou závislé na typu lesa, popřípadě druhu stromů. Stromy ovlivňují řadu složek hydrologického cyklu. Koruny stromu soustřeďují a odvádějí vodu a živiny po kmenech stromů. V důsledku tohoto vzniká u části

listnatých stromů double funneling efekt, který obohacuje půdní rhizosféru kolem kořenů stromů hydrologicky a také biologicky (Johnson & Lehmann, 2006).

3.3.3. Monokulturní porosty

Monokultura je často skloňována v rámci lesů střední Evropy, kdy docházelo ke špatnému úsudku při jejich vytváření a nebyla brána v potaz ekologická stabilita lokality. Pojem monokultury se nejvíce spojuje se socialistickým režimem, nicméně monokulturizace započala již v 19. století, a to zejména v oblasti jehličnatých monokultur v oblasti Krkonoš (Klímová, 2013).

Extenzivní monokulturizace jehličnanů zajišťovala dostatečný objem produkce dřeva, ale tím i podporovala některé negativní fenomény. Jedním s nejdůležitějších problémů je především teze o rychlé degradaci půdy v lese, která souvisí s tvorbou podzolů. Podzolování vzniklá hlavně pod smrkovými a borovicovými monokulturami, v nižších až podhorských oblastech s nedostatkem srážek a vyšších teplot (Klím, 2006).

Další problém je pozorován v oblasti chemického složení, kdy v monokulturách dochází ke zpomalení pohybu živin, zejména dusíku v půdě a celkové acidifikaci povrchové humusové vrstvy (Nihlgård, 1971).

Při použití bukových stromů v jehličnatých monokulturách dochází ke zlepšení povrchového humusu a také snížení kyselosti půdy a zvýšení obsah vápníku v horizontu A (Klím, 2006).

3.3.3.1. Smrk a buk

V následujícím textu bude popsáno rozdílné hospodaření s vodou v rámci smrkového a bukového porostu, způsobené výraznými rozdíly v jejich stavbě.

Smrk je považován za mělce kořenící strom a jeho kořenový systém a jeho největší část se vyskytuje v horních 25 centimetrech půdy. Oproti tomu mají buky hlubší kořenové systémy, a to přibližně v horních 40 centimetrech půdy. Nicméně průměrná hloubka celých kořenových systémů je v obou případech stejná. Nacházeli se mezi 15 a 35 centimetry (Allen et al., 2019).

Buk na rozdíl od smrku spotřebovává výrazně více srážek v zimě, a to i při pozorování na stejných lokalitách. V době zimního období jsou buky schopny

přístupovat k vodním zdrojům uloženým hlouběji v zemi snadněji, nebo k půdní vodě, uložené například v jemných pórech, které jsou často přehlíženy jako zásobárny vody v zimním období a následnému přísunu vody v letních měsících. Oproti tomu smrk využívá především pohyblivou vodu ve velkých pórech a puklinách. Smrky tedy využívají odlišné vodní zdroje vody než buky (Allen et al., 2019).

V letních měsících má největší vliv na vodní režim evapotranspirace. Ta je závislá, jak na hustotě lesa, tak i na bylinném patru. V méně hustém smrkovém lese je větší evapotranspirace bylinného patra než samotné transpirace stromů. V bukovém lese s nízkým obsahem bylinného patra se jedná o obrácenou situaci. Nicméně celková evapotranspirace části lesa je prakticky stejná, ať už se jedná o les bukový s nízkým výskytem bylinného patra, tak les smrkový s vyšším obsahem bylinného patra (Kantor et al., 2010).

V tabulce 2 lze názorně vidět množství zadržovaných srážek v korunách stromů, přičemž nejlépe srážku zachytává smrkový porost z důvodu sedlového sklonu větví. Naopak u bukového porostu s korunou trychtýřového tvaru, je větší procentuální množství srážky, které stéká po kmeni (Holko et al., 2009; Chmelová, 2020).

Tabulka 2 – Celková intercepce, množství zadržené srážky v koruně a množství stékající srážky po kmeni u různých typů dřevin (Chmelová, 2020)

Typ dřeviny	Množství zadržovaných srážek v koruně (%)	Množství srážek stékajících po kmeni (%)	Celková intercepce (%)
Smrk	43,5	2,3	41,1
Borovice	24,5	0,7	27,8
Javor	29,5	8	22,5
Dub	26,4	5,7	20,7
Buk	36,3	16,8	19,5

3.3.4. Smíšené lesy a jejich vliv na vlhkost

Shoda odborníků, že druhová bohatost a jejich diverzita zprostředkovává lepší fungování ekosystému je akceptována širokou veřejností. U stromů existuje široké spektrum možností, jak bojovat se suchem. Od druhů, které jsou suchomilné až po sucho-tolerantní druhy. Reakce stromů na sucho je řízena strukturálními a

fyziologickými adaptacemi, včetně stavby cévních svazků, rozdílnou alometrií rostlin (rozdílnou mírou růstu v různých částech rostliny) nebo jejich formou zakořenění, například hloubka nebo typ kořenů.

Pro pochopení této problematiky, jak rozmanitost druhů stromů přispívá ke snížení zranitelnosti vůči suchu a základní mechanismy interakcí mezi stromy, je důležité si tyto mechanismy rozdělit do tří kategorií. První dvě třídy jsou obtížné rozlišit od sebe bez přímého pozorování a v důsledku toho jsou často uváděny společně (Loreau & Hector, 2001). Poukazují na biologické mechanismy, které modifikují prostředí a míru stresu, kterou stromy pociťují.

Mechanismy související s rozdělováním zdrojů v první třídě naznačují, že rozdíly funkčních rysů snižují konkurenci o zdroje, protože druhy využívají zdroje v rozdílných místech a v jiném čase, a tím je méně pravděpodobné že o ně budou bojovat. Výskyt těchto mechanismů ale neznamená snížení dopadů sucha na stromy. Například při extrémně suchých obdobích může docházet k nedostatečnému rozdělení půdní vody, a to způsobit tak ztrátu flexibility vlastností vyplývajících z proměnlivosti klimatu a tím porušit původní rozdělení vodních zdrojů (Grossiord, 2020).

Toto tvrzení potvrzuje Černohous ve svém článku a výzkumu hydraulického liftu buku pro smrk, kde popisuje chování smrku a buku v suchých obdobích. Smrk zvyšuje objemovou vlhkost půdy v suchém období nejvíce od svrchní části až do 50 centimetrů, zatímco buk má tento proces opačný. Tímto lze dosáhnout, v suchých obdobích, vyšší vlhkosti ve vrstvách půdy. Nejlepší poměr smrkového a bukového porostu je v poměru 70 na 30 (Černohous, 2015).

Druhá třída, se týká mechanismů, ke kterým dochází, když některé druhy mají pozitivní vliv na fungování ostatních druhů. Příklady živých a neživých mechanismů mohou zahrnovat aktivní hydraulickou redistribuci půdy, noční uvolňování vody a zvýšení ochrany před patogeny, což má pozitivní výsledek na zlepšení půdní vlhkosti a snížení poškození živé složky ekosystému během sucha.

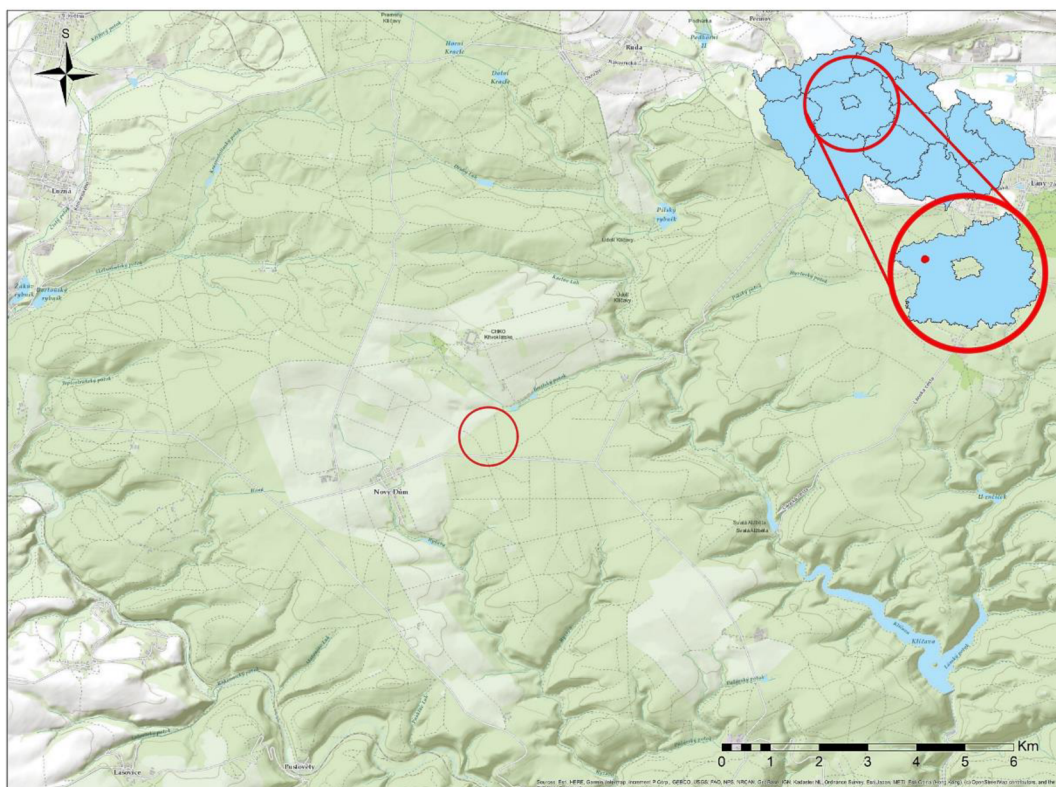
Třetí třída vychází ze selektivních procesů v rámci počátečního druhového fondu, který způsobuje dominanci druhů s výhodnými znaky pro danou lokalitu. V této třídě jsou mechanismy nastavené tak, že zpočátku dominují druhy zvláště odolné vůči suchu ve srovnání se společenstvy s nižší diverzitou. K selekci dochází na úkor jiných druhů. Tato vlastnost se popisuje souhrnným pojmem konkurenční dominance. Nicméně tato kategorie je specifická pro tropické pralesy s velkou mírou diverzity, což není relevantní v oblasti Evropy (Grossiord, 2020).

4. Popis výzkumné lokality

Lokalita, na které byla zaznamenávána data se nazývá Amálie. Tento název je odvozen od nedalekého statku, který je v dnešní době pod správou ČZU. V okolí statku se nachází naučná stezka, která propojuje prvky pro zaznamenávání dat, jako jsou například meteorologická stanice, systémy zavlažování a další „chytré“ zařízení pro optimální fungování krajiny (ČZU, 2021).

4.1. Poloha

Amálie se nachází v katastrálním území obce Ruda v okrese Rakovník. Leží v chráněné krajinné oblasti Křivoklátsko, která představuje zachovaný ekosystém lesů a trvalých travních porostů. Pro hospodaření na této lokalitě platí přísná opatření, která v souvislosti s chytrou krajinou jsou v přirozené harmonii (MŽP, 2022).



Obrázek 3 – Lokalita Amálie (Zdroj ČÚZK, 1:18 000, 2023)

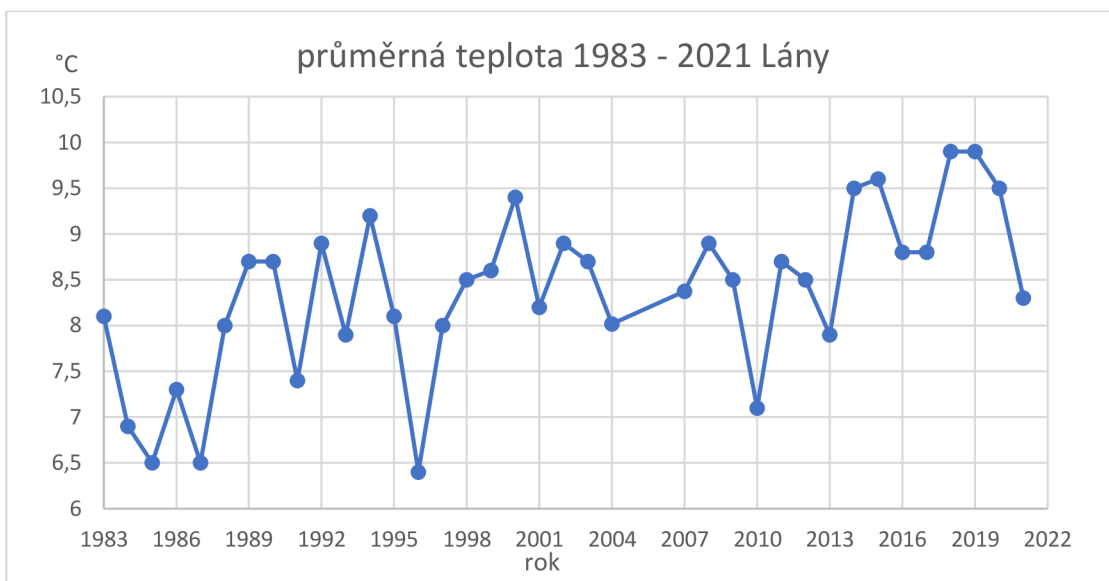
4.2. Podnebí

Poloha této lokality z hlediska České republiky je v západnější části, a díky tomu jsou zde podmínky více ovlivněné západními větry, které přinášejí srážky a teplý vzduch z oceánu (Shocart, 2007).

4.2.1. Teplota

Teplota je v této lokalitě zjišťována nejbližší meteorologickou stanicí, a to v Lánech. Hodnoty korespondují v rámci 30letého horizontu v hodnotách charakteristických pro celou Českou republiku, a to mezi 5 až 10 °C (Shocart, 2007).

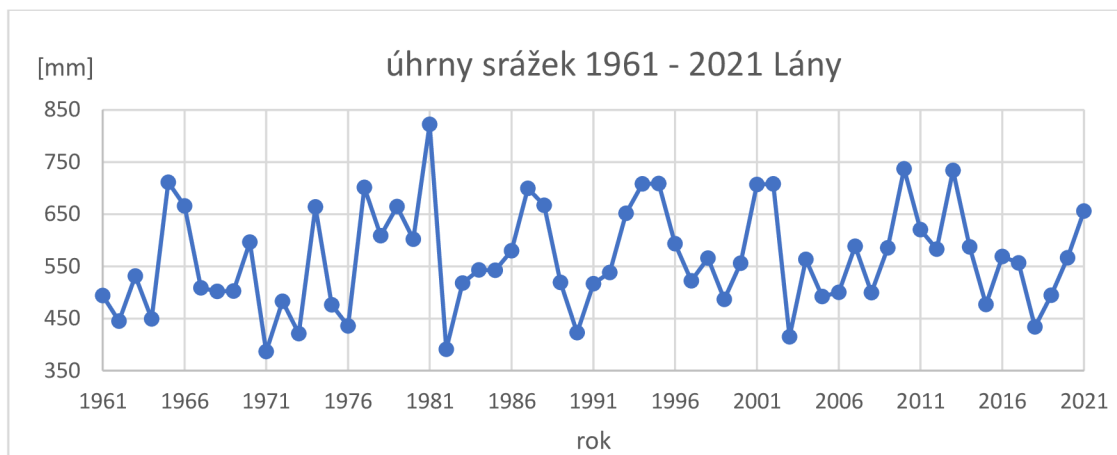
U níže zobrazeného obrázku 4 je vidět průběh zprůměrovaných měsíčních průměrů za posledních 38 let. V grafu jsou chybějící data mezi lety 2004 až 2007 z důvodu chybějících dat v databázi ČHMI.



Obrázek 4 – Průměrná teplota Lány (data ČHMI, graf Autor, 2023)

4.2.2. Srážky

Průměrné množství srážek spadlých za rok se pohybuje v České republice okolo 675 milimetrů. Oproti Lánské oblasti je průměr České republiky vyšší. Z obrázku 5 je patrné, že se většina hodnot pohybuje pod hranicí 675 milimetrů. Přesná hodnota průměrných srážek je pro tuto lokalitu 565 milimetrů.



Obrázek 5 – Průměrný úhrn srážek Lánská (data ČHMÚ, graf Autor, 2023)

4.3. Charakteristika půdy

Půdy na lokalitě Amálie můžeme zařadit do půdní kategorie kambisolů. Jedná se o jeden z nejběžnějších typů půd, který se nachází v České republice. Typické zbarvení je hnědé s výrazným jílovitým horizontem, který vzniká intenzivním zvětráváním zpevněných hornin.

V oblasti, na které bylo prováděno měření se nachází půdní typ kambizem KA, který je podkategorií kambisolů. Kambizemě mají typicky hnědou barvu a často se vytvářejí ve svažitém terénu. Tyto půdy jsou rozličné z hlediska trofismu, zrnitosti a skeletovitosti, protože se tvoří z různých druhů substrátů. Tyto půdy vykazují výrazné vrstvení podle zrnitosti, skeletovitosti a podle chemických a fyzikálních vlastností (Němeček et al, 2001).

Na základě zrnitostního rozboru víme, že se na lokalitě nachází půdní druh silty loam neboli prachovitá hlína. Prachovitá hlína tedy středně jemnozrnná s dobrou schopností zadržovat vodu a živiny, které jsou důležité pro rostliny a celkové udržení vlhkosti v půdě (Ibarra-Arzave et al, 2020).

4.4. Chytrá krajina I

Chytrá krajina I je název projektu, který se zabývá vývojem a implementací inovativních technologií pro zlepšení hospodaření s vodou a půdou v zemědělské krajině. Projekt je realizován Českou zemědělskou univerzitou v Praze ve spolupráci s dalšími partnery.

Cíle projektu Chytrá krajina I jsou:

- Vytvořit modelovou zemědělskou krajinu adaptovanou na klimatickou změnu a podmínky roku 2030 (CVPK, 2021).
- Zavést inovativní technologie pro zlepšení hospodaření s vodou a půdou, jako jsou zavlažovací systémy, bioplynové stanice nebo lesní pastviny (Forbes, 2023).
- Propojit prvky ochrany půdy, vody a biodiverzity v chytrém funkčním systému (CVPK, 2021).

5. Metodika

Za účelem monitorování hydrologického režimu smrkového a bukového porostu proběhla v polovině roku 2022 příprava a osazení mikroklimatických půdních senzorů TMS4. Podrobný postup a další zpracování dat získaných za období červen 2022 až leden 2023 je popsáno v následujícím textu.

5.1. Standardizace čidel TMS4

5.1.1. Příprava a měření

Pro standardizaci signálu senzorů TMS4 byla provedena měření v laboratoři, ve čtyřech různých prostředích. Sensory byly umístěny na okraj laboratorního stolu a byly zde ponechány po dobu 48 hodin za stále teploty a vlhkosti (21.5 °C). Tím byly získány přesné hodnoty pro vzduch. Další prostředí, které bylo zkoumáno bylo ve vodě. Byla použita demineralizovaná voda zbavena všech minerálních látek pro docílení přesnějšího měření. Normální rychlost cyklu, při kterém senzor zaznamenává hodnoty je 15 minut, nicméně pro účely standardizace byly u dalších dvou měření přeprogramovány všechny senzory na rychlejší cykly měření v kontrolním softwaru pro TMS dataloggery Lolly Manager, aby došlo ke zrychlení procesu. V softwaru byla nastavena nejvyšší možná rychlost, a to měření po jedné minutě.



Obrázek 6 – Měření hodnot v laboratoři ve čtyřech různých prostředích (Autor)

Další dvě prostředí, ve kterých byly senzory testovány, byly skleněné kuličky bez vody a s demineralizovanou vodou, které simulují půdní prostředí. Díky této metodě bylo docíleno větší přesnosti měření než v klasické půdě, ve které se mohou nacházet různé dutiny nebo zbytky nerozloženého organického materiálu. Velikost skleněných kuliček byla 4 mm. Každý senzor byl umístěn v nádobách přibližně pět minut, a každý měřicí cyklus trval minutu. Tím bylo dosaženo nejméně tři ustálených měření, ze kterých bylo možné vyvozovat výsledky.

5.1.2. Přenos dat a stanovení korekce signálu

Uložená data v senzorech musela být přenesena do počítače přes již zmiňovaný software Lolly Manager za pomoci TMD adaptéru. Díky tomuto programu bylo vytvořeno několik excelových souborů s daty. Dle naměřených hodnot byla pro každý senzor stanovena hodnota korekce signálu. Té jsme docílili odečtením dlouhodobého standardu od výrobce, který byl následně použit při korekci naměřených dat ve scriptu R.

5.2. Umístění senzoru na lokalitu

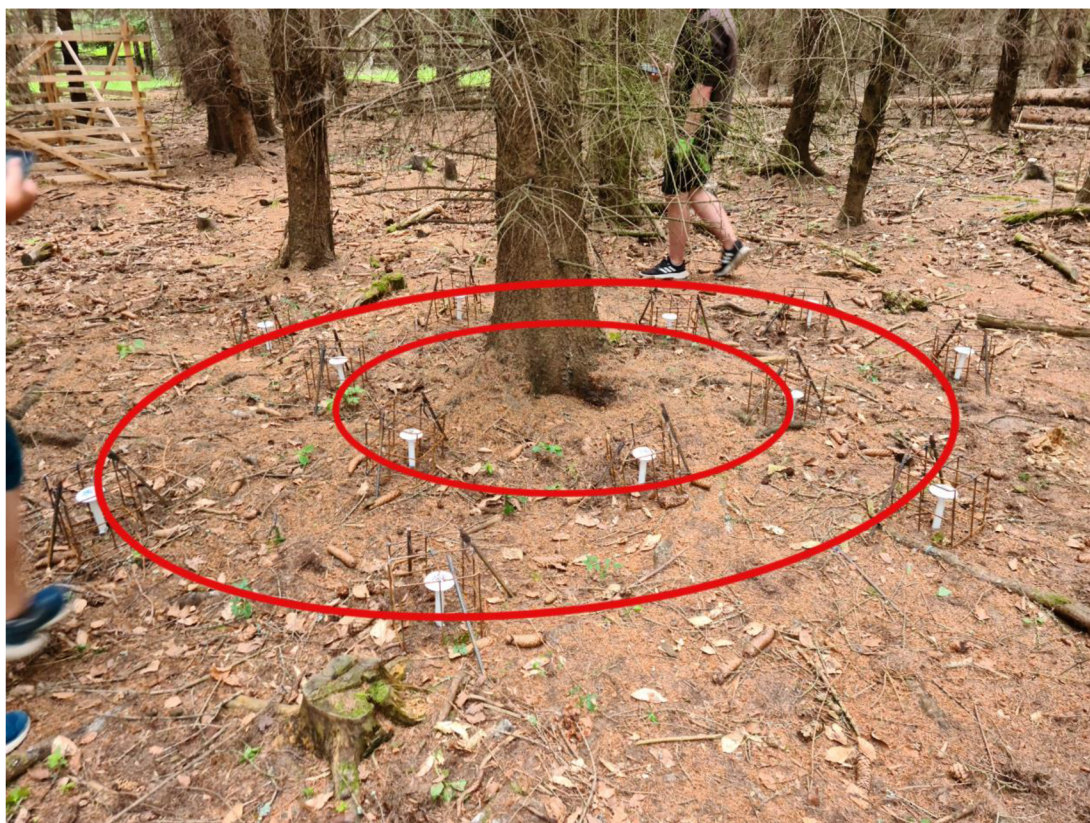
5.2.1. Výběr vhodných reprezentačních stromů

Na výzkumné lokalitě Amálie, bylo vytipováno několik stromů z řad buků a smrků, ke kterým by byla vhodná instalace senzorů, nicméně senzory byly umístěny pouze k jednomu stromu od každého druhu. První byly umístěny senzory okolo zdravě vypadajícího smrku s dostatečným množstvím zelených větví a rovného vzrůstu. Druhý strom byl vybrán buk s podobným poloměrem kmenu a obdobnou velikostí vzrůstu. Celkově bylo dbáno, aby tyto stromy byly umístěny uprostřed stejného typu lesa jako byly zkoumané stromy. Takto bylo docíleno homogenity okolí a tím pádem i přiblížení k realističtějším výsledkům v českých monokulturních lesích.

Umístění senzorů bylo provedeno 16.června 2022 nedaleko Lánské obory za slunečného počasí bez přeháněk, nicméně půda byla lehce zvlhlá, což pomohlo k jednoduššímu výkopu otvorů do země.

5.2.2. Usazení a ochrana

Senzory byly situovány do kruhového uspořádání okolo stromu ve vzdálenosti 1 metru až 1,5 metry od kmene. Celkově bylo zakopáno ke každému stromu 27 senzorů, z nichž 14 bylo přiřazeno k buku a 13 ke smrku. Všechny senzory byly opatřeny kovovou klecí s kotvícími prvky proti divoké zvěři. Při vytváření otvorů pro senzor byla odstraněna vrchní vrstva opadu a následně při zasunutí senzoru bylo prostředí navraceno do původního stavu. V případě, že se na místě vyskytovala zhutnělá půda, bylo potřeba použít předrážedlo a palici. Při zasunování senzorů je nutné zkontrolovat správný kontakt senzoru s půdou. Při lehkém kyvu měřicí jednotkou nesmí docházet k lehkému vyviklání. V tomto případě je nutné zopakovat proces zasazení na místo alespoň 15 centimetrů od původního otvoru. Správně usazený senzor měří vlhkost od 0 do 14 centimetrů pod povrchem. Teplota je měřena ve třech bodech a to 8 centimetrů pod povrchem, na úrovni terénu půdy a 15 centimetrů nad zemí.



Obrázek 7 – Umístění senzorů okolo smrku (Autor)



Obrázek 8 – Umístění senzorů okolo buku (Autor)

5.3. Práce s daty

Data získaná ze senzorů byla nahrána do programovacího jazyka R, které byly následně upravovány a seskupovány do výsledných grafů.

První krokem bylo samotné nahrání všech dat ze všech senzorů. Data byla rozdělena do dvou složek, na buk a smrk. Neupravená data bylo potřeba nahrát do prostředí Rstudia, ve kterém mohly být pojmenovány sloupce určující hodnoty vlhkosti, teploty a čas měření. Následně byla provedena úprava hodnot pomocí standardizace, které byly naměřeny v laboratorních podmínkách. Byl zde použit princip, kdy byla použita třetina hodnoty ze skleněných kuliček bez vody a dvě třetiny hodnoty z nasycených kuliček. Výsledná hodnota byla opravena o standardizační hodnotu stanovenou výrobcem. Dále byly hodnoty signálu převedeny pomocí kalibrační rovnice:

$$y = 1,7 * 10^{-8} * X^2 + 1,18119 * 10^{-4} * X - 1,011168511 * 10^{-1} .$$

Nově vzniklé hodnoty byly převedeny na procenta, nicméně zde bylo nutné ještě vynásobit výsledné hodnoty stem. Následně byla data očištěna od hodnot, kdy se nenacházeli senzory na lokalitě a ze základního 15ti minutového kroku agregována na denní krok podle jednotlivých skupin, jako jsou teplota - T1, T2, T3, hodnota objemové vlhkosti a charakteristika polohy vůči stromu - tedy vnější či vnitřní kruh.

Z těchto skupin byly vytvořeny grafy znázorňující vývoj jednotlivých veličin za období sedmi měsíců. Interpretace hodnot z těchto výsledků je předmětem následující kapitoly.

5.4. Výběr vhodného časového úseku pro zjišťování úbytku vlhkosti v okolí buku a smrku

Pro zjištění změn v objemové vlhkosti v rámci prostorové variability okolo stromů, bylo třeba vybrat vhodný časový úsek. Principem bylo zachytit reakci půdy na srážku a následné vysychání půdy.

Dle měřených hodnot, využitých při vyhodnocení průběhu vlhkosti ze celé období bylo vytipováno období, kde bylo na základě reakce půdní vlhkosti předpokládáno srážkově vydatné období.

Pro tuto analýzu byla zvolena konkrétní srážka, po které byla sledována vlhkost ve čtyřech časových krocích po 12ti hodinách. V rámci prostředí MS Excel byly vytvořeny schémata znázorňující uložení senzorů v okolí obou stromů. Do polí jednotlivých senzorů byly zapsány hodnoty odpovídající objemové vlhkosti, měřené konkrétním senzorem v daném časovém okamžiku. Pro lepší vizuální interpretaci byla následně pomocí podmíněného formátování nastavena barevná škála, označující hodnotu vlhkosti na škále žlutá až červená, kdy červená barva označovala senzory s nejnižší vlhkostí.

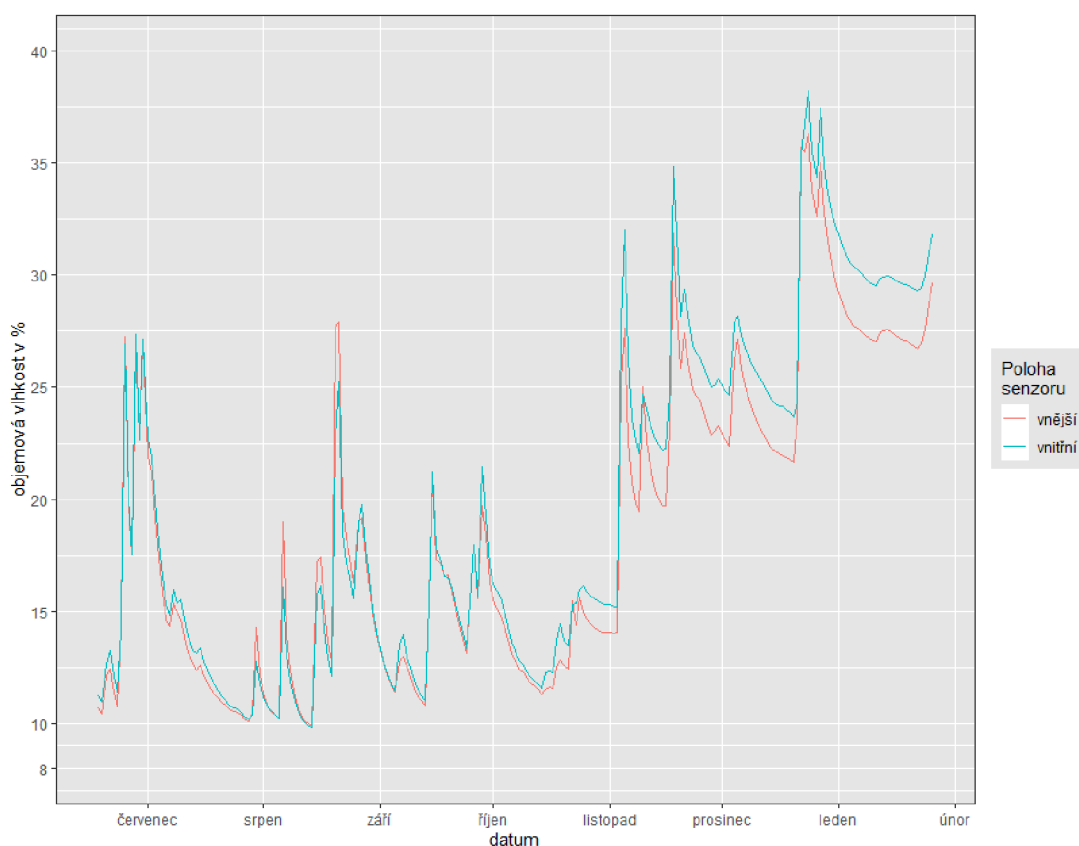
Celkově byly tedy pro každý porost vytvořeny 4 vizualizace půdní objemové vlhkosti za celkovou dobu 48 h po skončení srážky.

6. Výsledky

V této kapitole bude popsán vývoj měřených hodnot v čase.

6.1. Porovnání vlhkosti vnější a vnitřních senzorů u buku

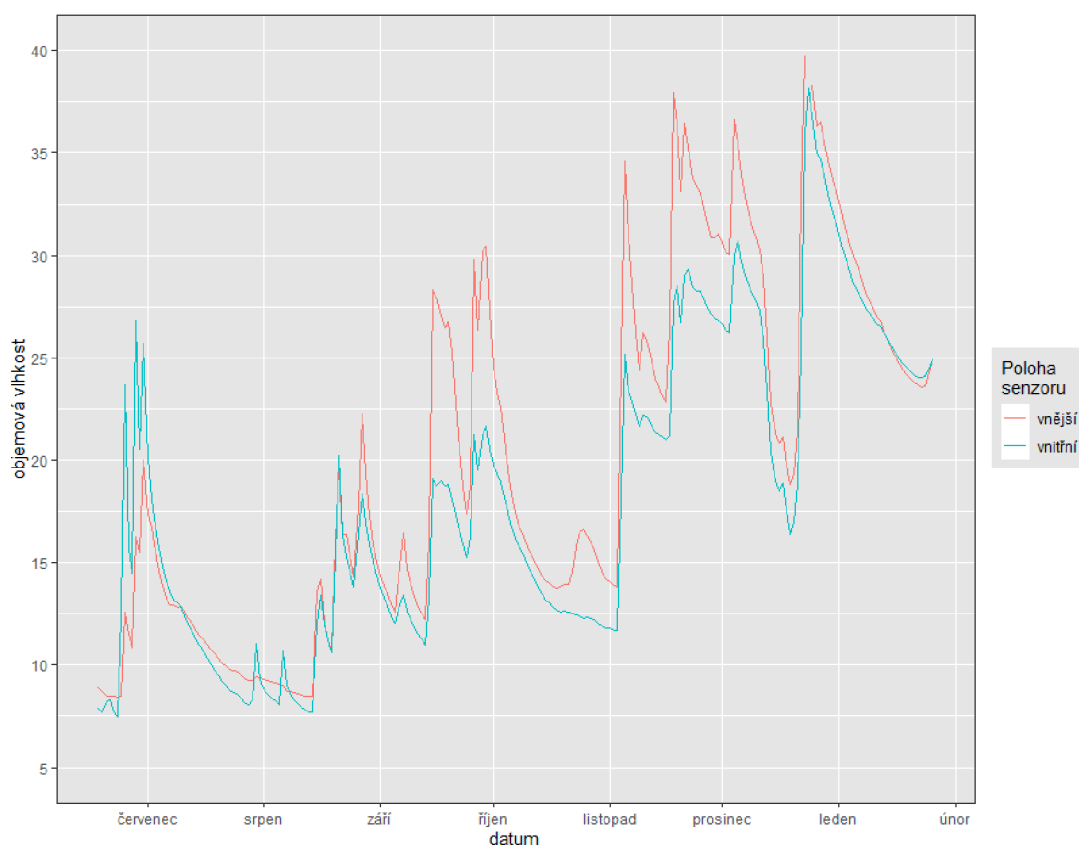
Na základě vyhodnocených dat ze senzorů u buku byl vytvořen graf závislosti objemové vlhkosti na čase (obrázek 9), kdy lze pozorovat výrazné zvyšování vlhkosti od listopadu. Naopak při osazování senzorů v červnu a poté na začátku srpna byla půda nejvíce vyschlá, tudíž s nejmenší objemovou vlhkostí. Rozdíly mezi hodnotami vnějšího a vnitřního kruhu lze částečně vidět v zimních měsících, kde se hodnoty rozcházejí v maximech o 4 % objemové vlhkosti, z kterých nelze vyvozovat vzorec chování srážky v blízkosti stromu.



Obrázek 9 – Denní průměrné hodnoty objemových vlhkostí buku

6.2. Porovnání vlhkosti vnějších a vnitřních senzorů u smrku

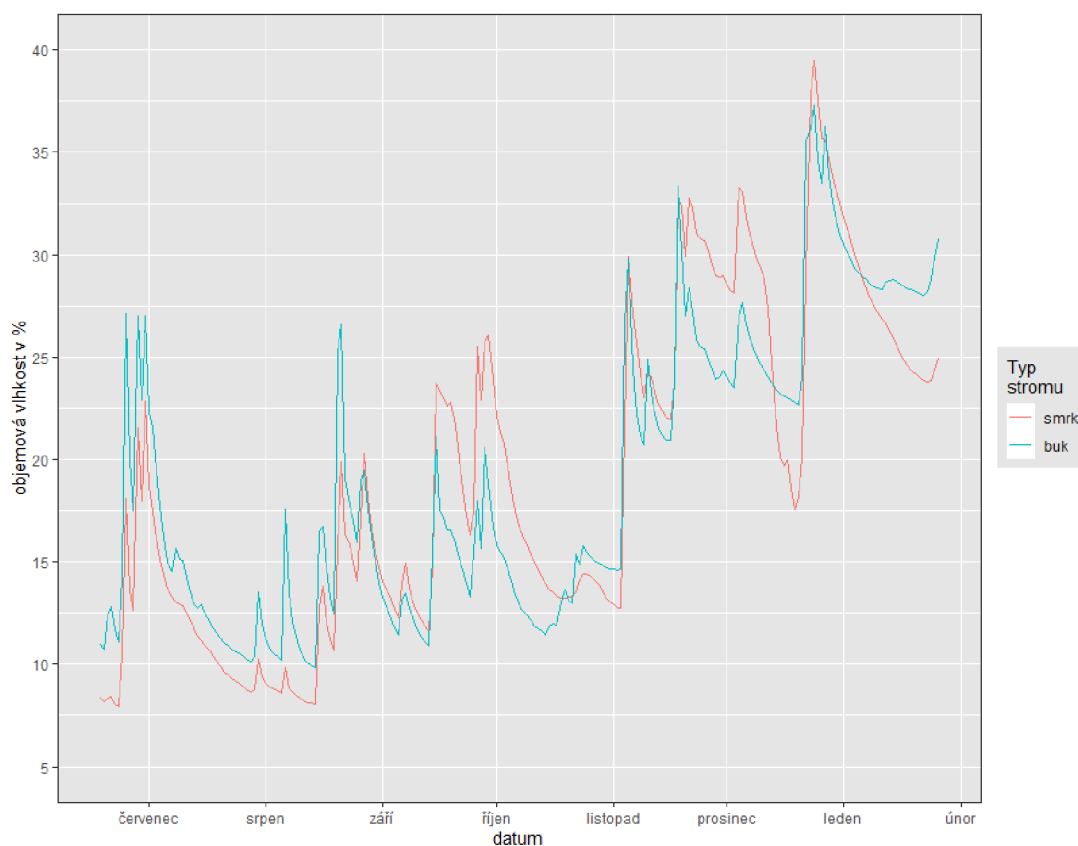
Druhým pozorovaným stromem byl smrk, u kterého byly osazeny senzory stejným způsobem. Byl vytvořen graf závislosti objemové vlhkosti na čase (obrázek 10), kde lze pozorovat zvýšené hodnoty vlhkosti od poloviny září až do začátku října, kde dále v průběhu měsíce došlo k významnému poklesu. Následující druhé období zvýšené objemové vlhkosti lze pozorovat od začátku listopadu do konce prosince s jedním větším výkyvem v polovině prosince. Při osazování senzorů v červnu a poté v měsíci srpnu byla půda nejvíce vyschlá. V této době měla půda nejnižší objemovou vlhkost v celém měřeném období. Při zjišťování rozdílných objemových vlhkostí vnějšího a vnitřního kruhu senzorů, můžeme sledovat větší rozdíly než u prvního zmíněného pozorovaného stromu – buku, kdy byl jeho největší rozptyl hodnot 4 %. U smrku se jedná o rozdíl hodnot mezi vnějším a vnitřním kruhem, který dosahuje v maximech 8 % objemové vlhkosti, což už lze považovat za dostatečně vysoké hodnoty a nemusí být považovány za odchylky senzorů. Oproti buku se zde změnila objemová vlhkost, kdy byla zaznamenána vyšší hodnota vlhkosti u vnitřního kruhu, zatímco u smrku lze pozorovat pravý opak.



Obrázek 10 – Denní průměrné hodnoty objemových vlhkostí smrku

6.3. Porovnání buku a smrku

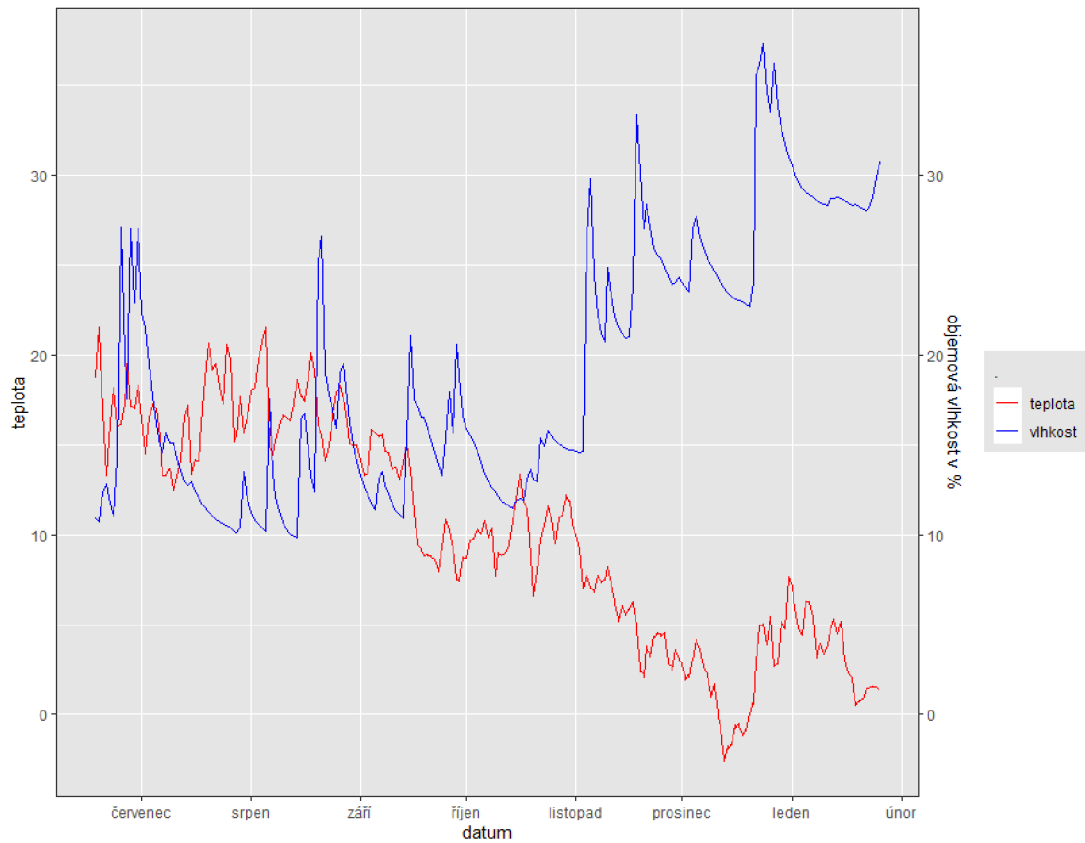
Další graf, který je zobrazen na obrázku 11, srovnává průměr objemových vlhkostí všech senzorů pod bukem a smrkem. Nelze zde jednoznačně určit, pod kterým ze stromů byla vyšší vlhkost, protože hodnoty jsou až na pár výjimek skoro totožné. Většinou se pohybuje objemová vlhkost buku o 2 % výše a jsou u něho pozorovány pomalejší ztráty vlhkosti oproti smrku. Maximální hodnotu objemové vlhkosti za sledované období pozorujeme u smrku v průběhu prosince a minimální hodnotu sledujeme taky u smrku v průběhu června, což naznačuje větší rozkolísanost vlhkosti ve smrkové půdě.



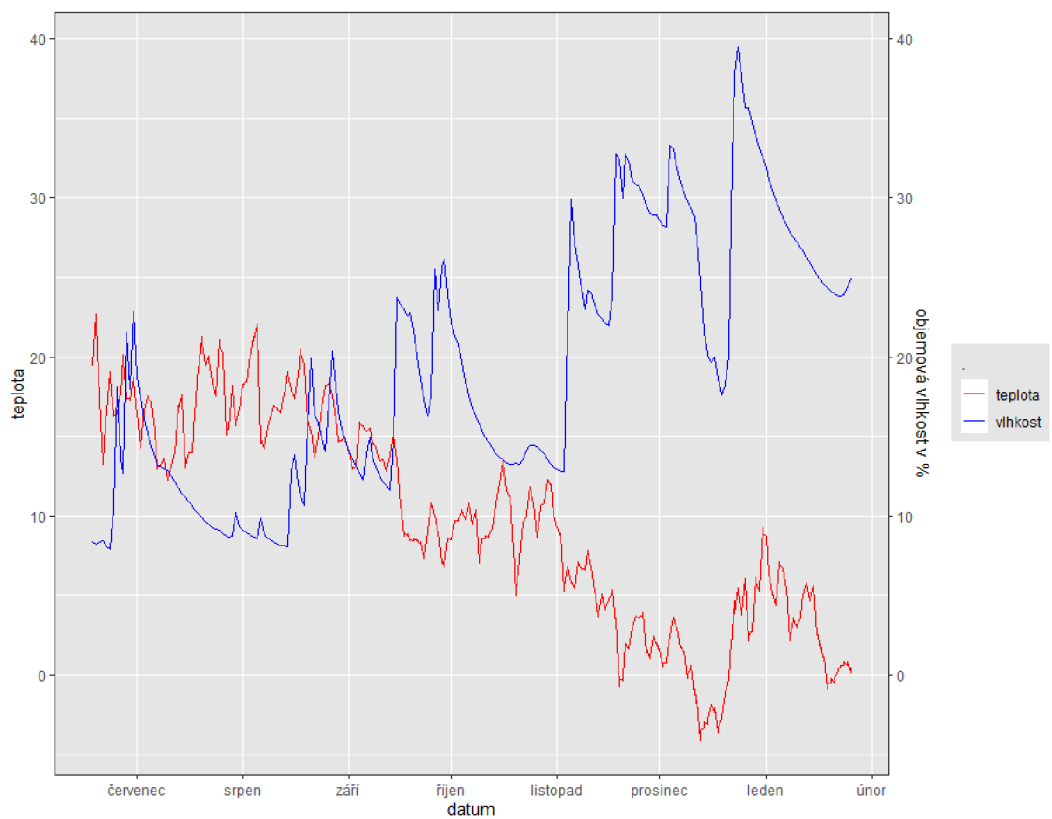
Obrázek 11 – Porovnání hodnot objemových vlhkostí buku a smrku

6.4. Teplota a objemová vlhkost

Následující dva grafy (obrázek 12 a 13) zobrazují proměnlivost vlhkosti buku a smrku a teploty ze senzoru T2, který je umístěn nejbližší povrchu země. V obou případech lze pozorovat zvýšení objemové vlhkosti začátkem listopadu. Po celé zimní období zůstává konstantě vyšší vlhkost.



Obrázek 12 – Hodnoty objemové vlhkosti buku a teploty T2

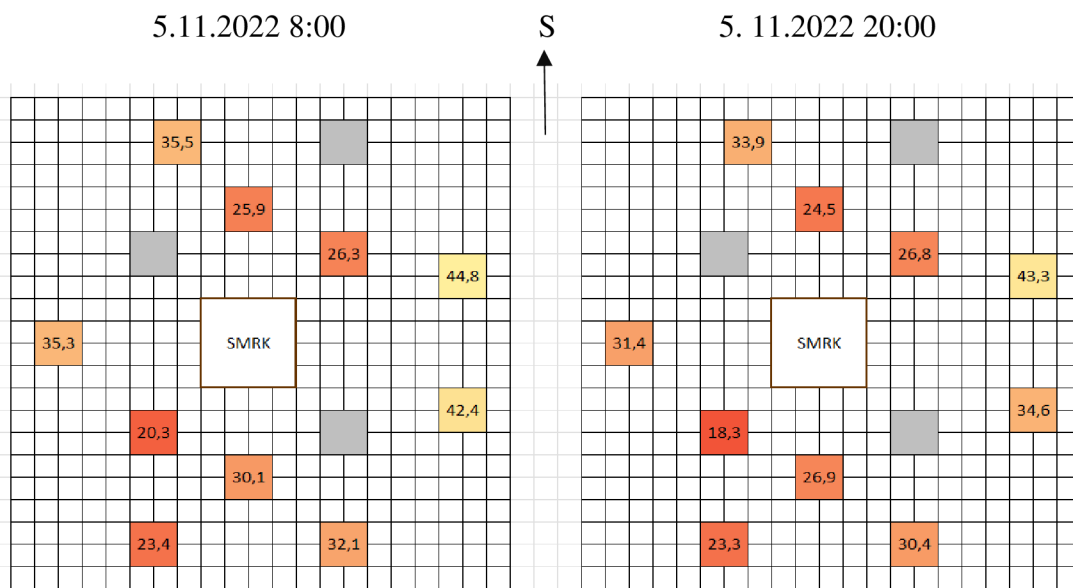


Obrázek 13 – Hodnoty objemové vlhkosti smrku a teploty T2

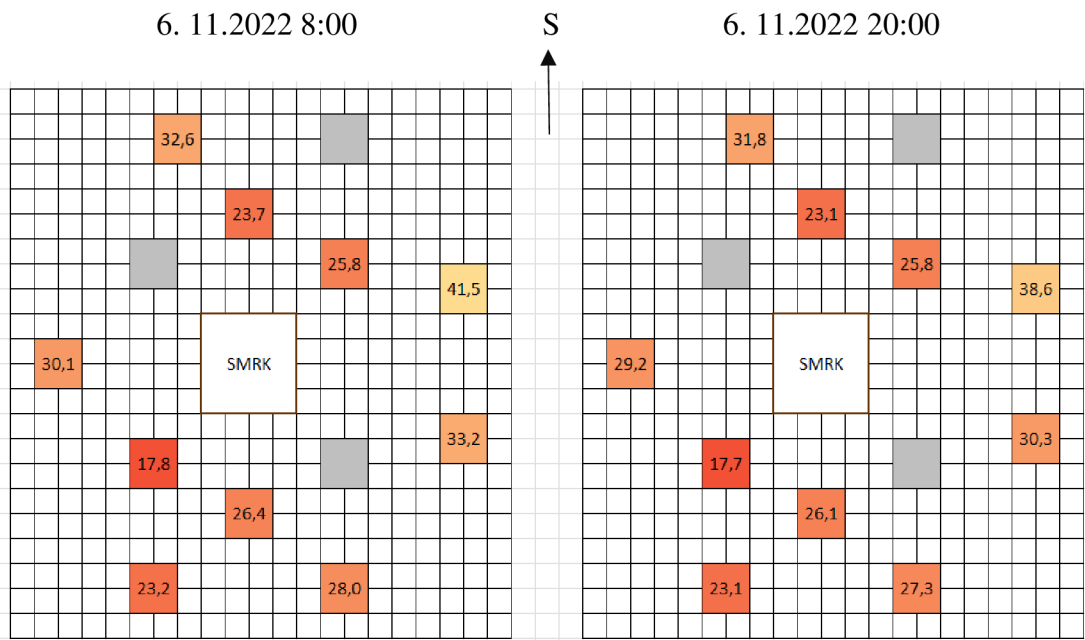
6.5. Interpretace výsledků umístěných senzorů v prostoru

Pro zjištění pohybu vody v okolí stromů byl zvolen časový horizont po větším srážkovém úhrnu a následně byla zjišťována rychlost a velikost změny objemové vlhkosti v závislosti na terénu, pozici stromu z hlediska světových stran a také umístění jednotlivých senzorů vůči sobě.

Bylo vybráno období mezi 30. říjnem a 5. listopadem, kdy bylo počasí srážkově velmi vydatné, zvláště pak 4. listopadu. Proto byl zvolený časový horizont od 5. listopadu do 6. listopadu, kdy se srážka vsakovala a bylo zde možné zjišťovat změny v objemové vlhkosti. V tomto období se teploty pohybovaly mezi 10 až 15 °C a díky tomu nedocházelo k nadměrnému výparu, který by mohl být pozorován v letních měsících při prudkých srážkách. Časový krok mezi jednotlivými obrazy byl zvolen na 12 hodin, přičemž počátek byl zvolen na osmou hodinu ranní.

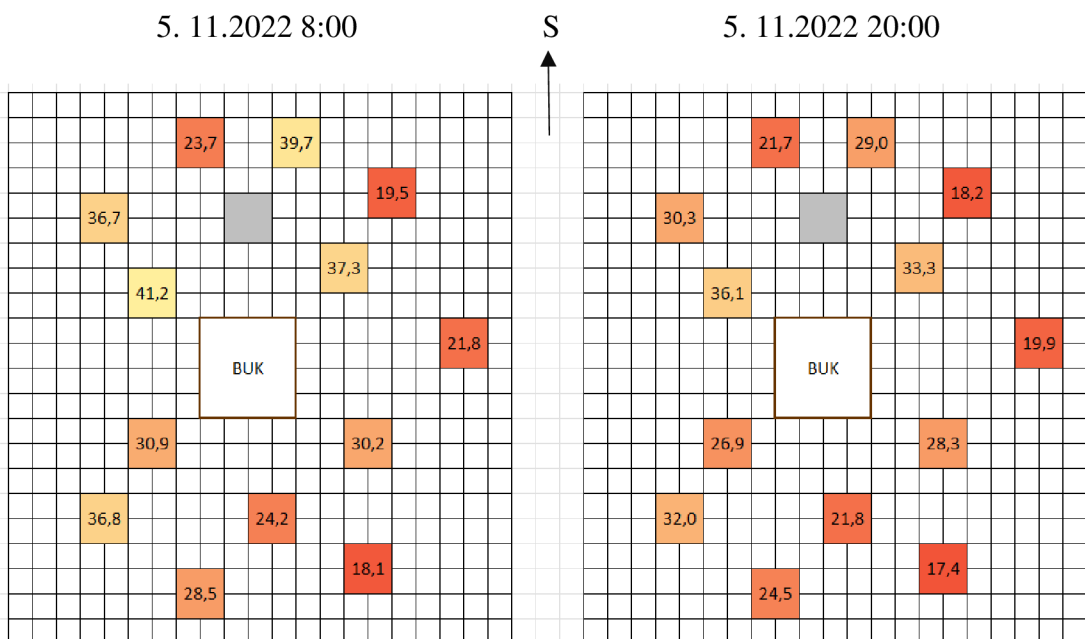


Obrázek 14 - Vlhkosti jednotlivých senzorů v % umístěných u smrku (5.11.2022)

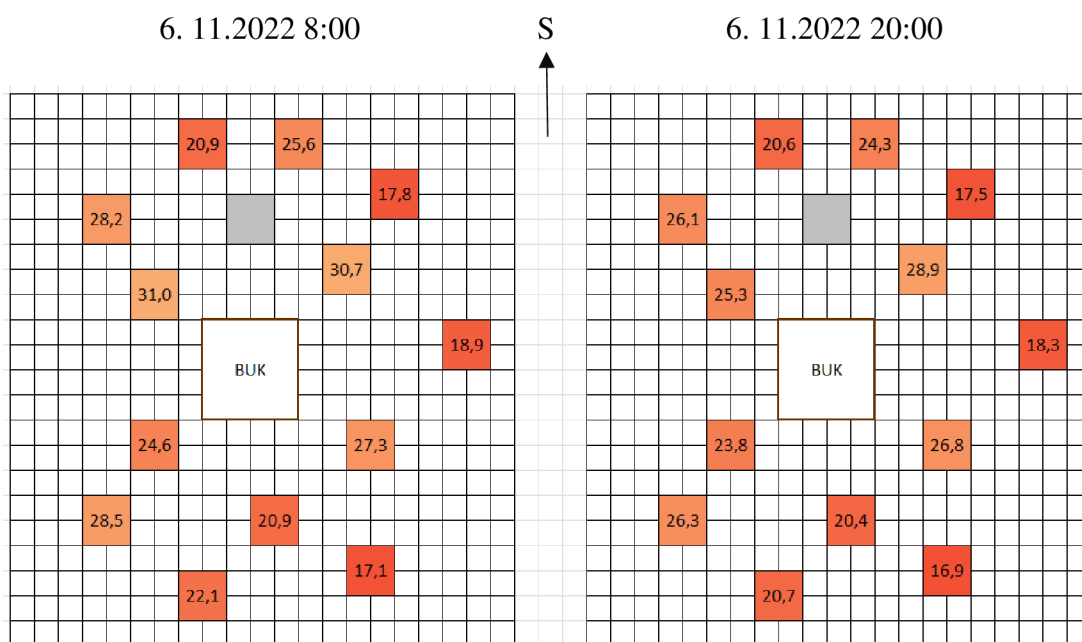


Obrázek 15 - Vlhkosti jednotlivých senzorů v % umístěných u smrku (6.11.2022)

Při pozorování změn u smrku, na obrázku 14 a 15, bylo zjištěno rovnoměrné snižování objemové vlhkosti na všech senzorech, přičemž nejvyšší vlhkost se vyskytovala na východní straně stromu a částečně po celém vnějším obvodu. Naopak nejmenší vlhkost byla zaznamenána v oblasti vnitřního kruhu jihozápadně od smrku.



Obrázek 16 - Vlhkosti jednotlivých senzorů v % umístěných u buku (5.11.2022)



Obrázek 17 - Vlhkosti jednotlivých senzorů v % umístěných u buku (6.11.2022)

Druhým pozorovaným stromem byl buk, u kterého bylo celkové rozložení vlhkosti rovnoměrnější, jak lze vidět na obrázcích 16 a 17. Průměrná vlhkost byla ale nižší než u dříve zmíněného smrku, což lze vidět v tabulce 3, kde jsou porovnány průměrné hodnoty buku a smrku. V celkových datech se ale tato teorie nepotvrdila.

Tabulka 3 – Průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient objemových vlhkostí buku a smrku 5. a 6.11.2022

	05.11.2022 8:00			05.11.2022 20:00		
	průměr	SD	CV	průměr	SD	CV
buk	29,9	7,64	0,26	26,1	5,79	0,22
smrk	31,6	7,60	0,24	29,3	6,66	0,23
	06.11.2022 8:00			06.11.2022 20:00		
	průměr	SD	CV	průměr	SD	CV
buk	24,1	4,64	0,19	22,8	3,76	0,17
smrk	28,2	6,22	0,22	27,3	5,40	0,20

V tabulce 3 je zobrazeno rozdělení buku a smrku v jednotlivých časových krocích. Pro každý časový krok je vypočítán celkový průměr ze senzorů, směrodatná odchylka i koeficient variace. U obou stromů dochází ke snižování hodnoty průměrných vlhkostí

v každém kroku. Nejvyšší hodnoty směrodatné odchylky jsou na začátku, kdy je přirozeně nejvyšší prostorová variabilita vlhkosti. Naopak nejnižší výkyvy hodnot směrodatné odchylky jsou na konci experimentu, kdy dochází k ustálení všech hodnot a tím se snižuje i směrodatná odchylka. Posledním zkoumaným parametrem, byl variační koeficient, který u buku klesal rychleji než u smrku, nicméně u prvního kroku buku je pozorována větší rozkolísanost hodnot než u smrku. V dalších krocích už toto chování není pozorované u buku, ale u smrku.

7. Diskuse

Na základě získaných dat bylo možné pozorovat charakteristický hydrologický režim bukových a smrkových porostů. Nicméně je třeba zdůraznit, že tento experimentální výzkum byl proveden pouze pro jednoho jedince buku a smrku, což je skutečnost, která může významně ovlivnit vyvozené závěry.

Jedna z teorií, která byla potvrzena pouze v druhé polovině zkoumaného období, byla založena na rozdílných vlhkostech vnitřního a vnějšího kruhu senzorů u buku, kdy se nepodařilo zaznamenat předpokládané chování buku, kde by se měla lišit vlhkost vnitřního kruhu od vnějšího a kde by se u vnitřních senzorů nacházela větší hodnota vlhkosti. U buku byl předpokládal, vliv vzdálenosti od stromu na výslednou objemovou vlhkost na základě projevu stoku vody po kmeni – stemflow. Dalším možným vysvětlením je způsob, kterým jsou data upravována, kdy pro přehlednění je několik desítek měřených hodnot za den agregováno do jedné hodnoty. Zde by mohlo docházet k tomu, že srážka, která dopadla na půdu je v rámci kapilárních sil přerozdělena a vzhledem k denní agregaci hodnot objemové vlhkosti může docházet ke zkreslení výsledné hodnoty.

U senzorů usazených u smrku, lze vidět vyšší vlhkosti u vnějšího kruhu. Nejspíše je tento jev zapříčiněn postavením větví, které usměřňují srážku do oblasti vnějšího kruhu senzorů, na které dopadá výrazně více srážky.

Co se týče porovnání vlhkosti mezi bukem a smrkem, tak zde lze pozorovat sníženou vlhkost u smrku oproti buku v zimní období. Toto chování může být zapříčiněno ročním obdobím, kdy podle Allena (2019) v zimních obdobích spotřebovává smrk větší objem vody, což odpovídá snížené vlhkosti v jeho okolí.

Další zvláštností, kterou můžeme vyvozovat z výsledků, je u prostorového rozmístění senzorů, kdy u smrku (obrázek 14 a 15) lze vidět sníženou vlhkost na jednom ze senzorů. Nejpravděpodobnější příčinou tohoto jevu je výčnělek a kořen vystupující nad povrch, u kterého se senzor nacházel a celkový sklon terénu, který odvádí vodu směrem od smrku do údolí.

Podle dat získaných z nejbližší meteorologické stanice Praha – Ruzyně lze zjistit v námi vybraném období větší množství srážek přicházející ze západu a celkově západní proudění větru, což odpovídá obrázku 16, ve kterém je značně větší objemová

vlhkost v západní části od buku (Ogimet, 2022). Nicméně vzhledem k tomu, že se stejné chování nepotvrdilo u smrku, je třeba předpokládat, že na výslednou vlhkost půdy v prostorovém uspořádání má dále vliv i blízké okolí stromu, zejména pak struktura koruny a okolních stromů.

Co se týče vztahů mezi teplotou a objemovou vlhkostí, tak zde se potvrzuje chování srážky a vlhkosti v létě, kdy podle Kantora (2010) zapříčiňují vyšší teploty v období letních měsíců průběžné vysychání půdy, které je z největší části způsobováno vysokou evapotranspirací a celkově nižšími srážkami v pozorované lokalitě.

Při měření senzory byly pozorovány některé nepřesnosti. Například u dvou senzorů se hodnoty pohybovaly v jiné hladině než ostatní, což mohlo být zapříčiněno špatným kontaktem s půdou nebo jejich poškrábáním kameny. Další senzory musely být vyřazeny z pozorování, na základě jejich přerušovaného měření nebo měření jen části parametrů, bez kterých by mohly být ohroženy výsledky nepřesností. Nicméně se u zkoumaných stromů nacházelo dostatečné množství funkčních senzorů pro zobrazení aspoň částečného obrazu, díky kterým bylo možné okolí pozorovaných stromů zhodnotit s určitou přesností a s výsledkem v podobě grafů, které se v některých případech shodují s teorií pozorovanou v ostatních pracích.

8. Závěr

V kontextu klimatické změny, v dnešní době Českou republiku trápí nedostatek vody a s tím spojené nerovnoměrné rozdělení srážek v rámci roku, zahrnující hydrologické extrémny jako jsou dlouhotrvající sucho a přívalové srážky. V důsledku sucha jsou stromy zranitelnější vůči dalším negativním vlivům

Tento experiment pomohl přiblížit chování srážek zachycených stromy a následně jejich zasakování do půdního lesního profilu. Pro tuto úlohu byl zvolen senzor TMS4, který svojí jednoduchostí, cenovou dostupností a přesností měření může být umístěn ve velkém množství na měřenou lokalitu a následně z něho mohou být shromažďována data ve velkém objemu. Navíc pokud chceme dosáhnout měření v řádu několika let, tak jsou tyto senzory ideální možností.

Chování půdního horizontu je obtížně předvídatelné, stejně jako počasí, vliv vegetace a dalších složek, které ovlivňují celkový koloběh vody. Proto se v tomto experimentu nemůžeme s absolutní přesností shodnout na určitých výsledků, který nebyl nakonec pozorován v takové míře, jak bylo předpokládáno z dosavadního výzkumu v oblasti objemové vlhkosti u smrkového a bukového porostu ve střední Evropě.

Co se týče konkrétních výsledků, které z této bakalářské práce můžeme vyvozovat, je to, že při zvýšených teplotách v letních měsících docházelo k vysušování půdy a tím také k horšímu kontaktu senzorů s půdou, což zapříčiňovalo celkově nižší vlhkosti a při srážkách rychlé a vysoké hodnoty objemové vlhkosti nejspíše způsobené dutinami okolo senzoru, který byly při nárazových srážkách naplňovány.

V zimních měsících už se vlhkosti půdy pohybovaly ve vyšších hodnotách. Vlhčí prostředí mohlo také přispět k přesnějšímu měření a patrnému rozlišení vnitřního a vnějšího kruhu, kdy u buku se hodnoty lišily v maximech o 4 % a u smrku se hodnoty vlhkosti lišily v maximech až o 8 %. V případě buku byly u vnitřního kruhu osazených senzorů pozorovány vyšší hodnoty než v případě vnějšího kruhu. Tento jev byl pravděpodobně zapříčiněn efektem stemflow a také opadáním listů v podzimních měsících. Pokud jde o senzory okolo smrku, tak zde bylo chování senzorů jiné než u buku, kdy byly pozorovány zvýšené hodnoty vlhkosti u vnějšího kruhu senzorů, zatímco senzory vnitřního kruhu nedosahovaly tak velkých objemových vlhkostí. Tento výsledek by mohl být způsobován postavením smrkových větví, které odvádějí

srážku dále od kmene. Tyto výsledky částečně podporují hypotézu, která byla stanovena, a to především zimních měsících.

Při sledování vlhkosti po vydatné srážce za pomoci prostorového rozložení senzorů a kratším časovém kroku byla pozorována reakce půdy na srážku a následně její vysychání.

Je třeba mít na paměti že tento experiment byl proveden pouze pro jednoho jedince stromu z každého porostu, a pro hlubší závěry by bylo nutné osazení více senzorů na danou lokalitu a delší časový horizont měření, který by měl trvat nejméně dva roky, abychom mohli pozorovat sezónnost stromů. Nicméně tento experiment nám pomohl přiblížit hydrologické chování těchto porostů a poskytl příležitost pro budoucí rozšíření výzkumu, kde bychom se mohli zaměřit například na odezvy srážek v menším časovém kroku, popřípadě porovnat objemové vlhkosti se stejným druhem dřeviny, ale rozdílného stáří.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

Pavlů, L. 2018: Základy pedologie a ochrany půdy, Česká Zemědělská Univerzita v Praze 2018, ISBN:978-80-213-2876-1.

Ministerstvo životního prostředí, ©2019: Ochrana půdy, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <https://www.mzp.cz/cz/definice_pudy >.

Vašků Z., 2008: Půda je nenahraditelná. Ekolist 3, Praha, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <<https://ekolist.cz/cz/publicistika/rozhovory/zdenek-vasku-puda-je-nenahraditelna>>.

Vráblíková, J., et P., Vráblík, 2006: Základy pedologie, Fakulta životního prostředí UJEP, Ústí nad Labem, 101 s., ISBN 80-7044-805-9.

Mentlík P., 2003: Stručný úvod do pedologie a pedografie pro geografů, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <https://kge.zcu.cz/vyuka2/pudy_uvod.pdf>.

Šarapatka, B. 2014: Pedologie a ochrana půdy, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ČR, 232 s.

Pavlásek, J., Jačka, L., 2014: Hydropedologie (skripta), Fakulta životního prostředí ČZU, Praha, (online) [cit. 16.11. 2022].

Ranjan, G. and S, A., 2007: Basic and Applied Soil Mechanics, New Age International. Str.11.

Tóth, J.,2009: Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization, Cambridge University Press Str. 248.

Johnson, A. F., 1962: Methods of measuring soil moisture in the field, U.S. Gov. Print. Off.

Kutílek, M., 1978: Vodohospodářská pedologie. 2. přepracované vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury.

Bell, J.P., Dean, T.J., & Hodnett, M.G., 1987: Soil moisture measurement by an improved capacitance technique part II, Field techniques, evaluation and calibration. Journal of Hydrology, 93, 79-90.

Jones, S.B., Wraith, J.M. and Or, D., 2002: Time domain reflectometry measurement principles and applications. Hydrol. Process., 16: Str. 141-153.

Wild, Jan & Kopecký, Martin & Macek, Martin & Sanda, Martin & Jankovec, Jakub & Haase, Tomáš, 2019: Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement, *Agricultural and Forest Meteorology*, 268. 40-47.

Brooks, R., 2019: *Forest Soils versus Agricultural Soils*, University of Idaho Extension, Idaho, USA, (online) [cit. 10.12. 2022], dostupné z <[FM45 \(uidaho.edu\)](https://www.uidaho.edu/fm45)>.

Chmelová, R., Frajer, J., 2020: *základy hydrologie, katedra geografie, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ČR, Str.131.*

Švihla, V., 2001: Vliv lesa na odtokové poměry na malém povodí, *Archiv časopisu lesnická práce č.2/01, nakladatelství lesnické práce Praha, str. 66, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <[VLIV LESA NA ODTOKOVÉ POMĚRY NA MALÉM POVODÍ | Lesnická práce - nakladatelství a vydavatelství | Lesnická práce - nakladatelství a vydavatelství \(lesprace.cz\)](#)>.*

Levia, Delphis & Nanko, Kazuki & Amasaki, Hiromasa & Giambelluca, Thomas & Hotta, Norifumi & Iida, Shinichi & Mudd, Ryan & Nullet, Michael & Sakai, Naoki & Shinohara, Yoshinori & Sun, Xinchao & Suzuki, Masakazu & Tanaka, Nobuaki & Tantasirin, Chatchai & Yamada, Kozo, 2019: Throughfall partitioning by trees, *Hydrological Processes*, 33. Str. 1698-1708.

Metzger, J.C., Filipzik, J., Michalzik, B. and Hildebrandt, A., 2021: Hot or not? The effect of stemflow on infiltration and soil properties, In *EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-10110).*

Johnson, Mark & Lehmann, Johannes., 2006: Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow, *ECOSCIENCE*, 13. Str. 324-333. 10.2980/i1195-6860-13-3-324.1.

Warrick, Arthur W., 2001: *Soil physics companion*, CRC press.

Němeček, J. et al., 2001: *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Praha: Česká zemědělská univerzita, ISBN 80-238-8061-6.*

Swift, R. S., 1996: Organic matter characterization. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, Str. 1011-1069.

Vlček, V., Pospíšilová L., Šimečková J., Dvořáčková H., Jandák J., 2020: Půdoznalství, Brno: Mendelova univerzita v Brně, ISBN 978-80-7509-738-5.

Loreau, M., & Hector, A., 2001: Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments, *Nature* 412(6842), Str. 72-76.

Grossiord, C., 2020: Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests, *New Phytologist*, 228(1), Str. 42-49.

Carter, M. R., & Gregorich, E. G., 2007: Soil sampling and methods of analysis, CRC press.

Bot, A., & Benites, J., 2005: The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production (No. 80), Food & Agriculture Org.

Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., 2011: Forest Floor Interception. In: Levia, D., Carlyle-Moses, D., Tanaka, T. (eds) *Forest Hydrology and Biogeochemistry*, Ecological Studies, vol 216. Springer, Dordrecht, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1363-5_22>.

Klímová, E., 2013: Environmentální a historické aspekty socialistického zemědělství v Hustopečích, Masarykova univerzita, Fakulta sociálních studií, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <<https://theses.cz/id/ijv1vx/>>. Diplomová práce.

Klimo, E. M. I. L., & Kulhavy, J., 2006: Norway spruce monocultures and their transformation to close-to-nature forests from the point of view of soil changes in the Czech Republic, *Ekologia (Bratislava)/Ecology (Bratislava)*, 25(1), Str. 27-43.

Nihlgård, B., 1971: Pedological influence of spruce planted on former beech forest soils in Scania, South Sweden, *Oikos*, 22, Str. 302–314.

Hillel, D., 1998: *Environmental Soil Physics*, Academic press, London, UK, 771 s.

Hendrickx, J. M., & Flury, M., 2001: Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone, Str. 149-187.

Bundt, M., Widmer, F., Pesaro, M., Zeyer, J., & Blaser, P., 2001: Preferential flow paths: biological 'hot spots' in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 33(6), Str. 729-738, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <[Preferential flow paths: biological 'hot spots' in soils – ScienceDirect](#)>.

Ministerstvo životního prostředí, ©2022: Chráněné krajinné oblasti, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <[Chráněné krajinné oblasti – Ministerstvo životního prostředí \(mzp.cz\)](#)>.

Česká zemědělská univerzita v Praze, © 2021: Naučná stezka Amálie, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <[Centrum pro vodu, půdu a krajinu \(czu.cz\)](#)>.

Školní atlas ČESKÁ REPUBLIKA a EVROPA Vizovice: z, 2007. 65 s. ISBN 80-7224-247-4. Kapitola Podnebí, s. 8 až 9.

Černohous, F.Š.V., 2015: Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování, *Zprávy lesnického výzkumu*, 60(1), pp.53-63.

Allen, S.T., Kirchner, J.W., Braun, S., Siegwolf, R.T. and Goldsmith, G.R., 2019: Seasonal origins of soil water used by trees, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), pp.1199-1210.

Kantor, P., Šach, F. and Černohous, V., 2010: Vodní režim smrku a buku v Orlických horách ve vegetačních obdobích 2009 a 2010, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <https://www.i.h.cas.cz/files/uploads/4_verejnost/1_verejnost/Hydrologie_maleho_povodi_2011_dil_I_cast_3.pdf#page=8>.

Matějka, K., © 2021: Vývoj teplot a srážek v ČR od roku 1961, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <https://www.infodatasys.cz/climate/KlimaCR1961_2020.htm>.

Johnson, M.S. and Lehmann, J., 2006: Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow, *Ecoscience*, 13(3), pp.324-333.

Centrum pro vodu, půdu a krajinu, Copyright © 2021, Česká zemědělská univerzita v Praze, (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://cvpk.czu.cz/cs/r-13920-chytra-krajina>>.

Chytrá krajina. Čeští vědci bojují se suchem tak, aby byli moderní i za 30 let – Forbes. Forbes [online]. Copyright © 2023 MediaRey, SE [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://forbes.cz/chytra-krajina-cesti-vedci-bojuji-se-suchem-tak-aby-byli-moderni-i-za-tricet-let/>>.

Blonquist Jr, J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A., 2005: A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of hydrology*, 314(1-4), pp.235-245.

Nanko, K., Onda, Y., Ito, A. and Moriwaki, H., 2008: Effect of canopy thickness and canopy saturation on the amount and kinetic energy of throughfall: An experimental approach, *Geophysical Research Letters*, 35(5).

Calder, I.R., 1986: A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 89(1-2), pp.65-71.

Ibarra-Arzave, G., Solleiro-Rebolledo, E., Sanchez, G., Sedov, S., Golyeva, A., Morales, I.S., Carpenter, J. and Chávez-Vergara, B., 2020: Response of surface processes to the Holocene landscape changes in Sonora: evidences from the paleosol-sedimentary sequences at the archaeological sites El Fin del Mundo and El Gramal. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, p.102947.

Pidwirny, M., 2006: "Introduction to Soils". *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition, (online) [cit. 10.11. 2022], dostupné z <<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8k.html>>.

Holko, L., Škvarenina, J., Kostka, Z., Frič, M. and Staroň, J., 2009: Impact of spruce forest on rainfall interception and seasonal snow cover evolution in the Western Tatra Mountains, Slovakia. *Biologia*, 64(3), pp.594-599.

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 2021: beech, *Encyclopedia Britannica*, (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://www.britannica.com/plant/beechn>>.

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 2022: spruce, *Encyclopedia Britannica*, (online) [cit. 28.03.2023], dostupné z <<https://www.britannica.com/plant/spruce>>.

Ogimet Entrada de, (online) [cit. 10.12. 2022], dostupné z <<http://www.ogimet.com/cgi->

bin/gsynres?lang=en&ind=11518&ano=2022&mes=11&day=30&ndays=30&hora=23&ord=DIR>.

Ministerstvo zemědělství, 2022: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2021, Praha: Ministerstvo zemědělství, ISBN 978-80-7434-669-9.

Rovnice, obrázky a tabulky

Rovnice 1 Warrick, Arthur W., 2001: Soil physics companion, CRC press.

Rovnice 2 Ranjan, G. and S, A., 2007: Basic and Applied Soil Mechanics, New Age International. Str.11.

Rovnice 3 Ranjan, G. and S, A., 2007: Basic and Applied Soil Mechanics, New Age International. Str.11.

Obr. 1 Understanding Soil Compaction – Field Crop News. Field Crop News – Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs in partnership with the University of Guelph, Copyright © 2023 Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, All Rights Reserved, [online], dostupné z <<https://fieldcropnews.com/understanding-soil-compaction/>>.

Obr. 2 © Copyright, 2013. University of Waikato. All rights reserved.

Obr. 3 ČÚZK, WMS služba geoportálu. WMS Katastrální mapy on services.cuzk.cz, [Online], dostupné z <<https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>>.

Obr. 4 [online], dostupné z [http://Portál ČHMÚ: Home \(chmi.cz\)](http://Portál ČHMÚ: Home (chmi.cz)) graf vytvořen z dat z ČHMI autorem.

Obr. 5 [online]. dostupné z [http://Portál ČHMÚ: Home \(chmi.cz\)](http://Portál ČHMÚ: Home (chmi.cz)) graf vytvořen z dat z ČHMI autorem.

Tabulka 1 Chmelová, R., Frajer, J., 2020: základy hydrologie, katedra geografie, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ČR, Str.131.

Tabulka 2 Chmelová, R., Frajer, J., 2020: základy hydrologie, katedra geografie, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ČR, Str.131.