

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Zásoby živin v půdě v závislosti na typu lesního porostu

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jindřich Zelinka

Hodnocení a ochrana půd

Vedoucí práce: doc. Ing. Lenka Pavlů, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Zásoby živin v půdě v závislosti na typu lesního porostu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 15.04.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Lence Pavlů, Ph.D. za vedení diplomové práce a členům katedry Pedologie a ochrany půd za ochotu a pomoc při zpracování diplomové práce.

Zásoby živin v půdě v závislosti na typu lesního porostu

Souhrn

Lesní půdy jsou důležitým zásobníkem organické hmoty. V ní je akumulován nejen uhlík ale i další prvky (N, P, K, Ca, Mg aj.) nutné pro fungování lesních ekosystémů. Akumulace či naopak rychlost rozkladu organického materiálu a s tím spojené poutání či uvolňování živin závisí jak na samotném složení organické hmoty, tak na vnějších podmínkách jako jsou například klima, reliéf nebo propustnost půdy a půdotvorného substrátu. Tato diplomová práce se zaměřuje na hodnocení zásob organické hmoty a živin ve vybraných lesních porostech v místě dlouhodobých experimentů na lokalitě Amálie. V rámci práce byly provedeny terénní odběry vzorků půdy v šesti porostech, kde dominují monokultury dřevin smrk ztepilý, modřín opadavý a buk lesní. Provedené analýzy zahrnovaly stanovení obsahu organického uhlíku, objemové hmotnosti půdy, aktivního a výměnného pH, a také kationtové výměnné kapacity a obsahu prvků (Ca, Mg, K) v sorpčním komplexu. Studie ukazuje, že porosty smrku mají nejvyšší zásoby uhlíku v půdním profilu, zatímco bukové porosty mají nejvyšší zásoby výměnných prvků. Typ porostu ovlivňuje chemismus půdy skrze opad, přičemž bukové porosty vykazují příznivější hodnoty půdní reakce a nasycenosti sorpčního komplexu bázemi než jehličnaté. Pravděpodobně vliv distribuce vody na chemismus půdy není tak významný jako složení opadu a hloubka prokořenění dřevinami.

Klíčová slova: lesní půda, nadložní horizonty, zásoba živin, lesní porost

Soil nutrient stocks as a function of forest stand type

Summary

Forest soils are an important reservoir of organic matter. It accumulates not only carbon but also other elements (N, P, K, Ca, Mg, etc.) necessary for the functioning of forest ecosystems. The accumulation or, conversely, the rate of decomposition of organic material and the associated nutrient uptake or release depend on the composition of the organic matter itself as well as on external conditions such as climate, topography or the permeability of the soil and soil-forming substrate. This thesis focuses on the assessment of organic matter and nutrient various forest stands at the Amalia site of long-term experiments. Field soil sampling was carried out in six stands dominated by monocultures of spruce, larch and beech. The analyses performed included the determination of organic carbon content, soil bulk density, active and exchangeable pH, as well as cation exchange capacity and element contents in sorption complex (Ca, Mg, K). The study shows that spruce stands have the highest carbon stocks in the soil profile, while beech stands have the highest stocks of exchangeable elements. The type of stand directly influences soil chemistry through litterfall, with beech stands exhibiting more favourable values of soil pH and saturation of the cation exchange capacity than coniferous stands. The likely influence of water distribution on soil chemistry appears to be less significant than litter composition and root depth.

Keywords: forest soil, overlying horizons, nutrient supply, forest cover

Obsah

1	Úvod	1
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Vznik půdy	3
3.1.1	Mateční hornina	3
3.1.1.1	Zvětrávání	4
3.1.2	Klima	5
3.1.3	Biologický faktor	6
3.1.3.1	Organický uhlík	7
3.1.3.2	Sekvestrace uhlíku	9
3.1.4	Voda	10
3.1.4.1	Voda a les	11
3.1.5	Taxonomie půd	13
3.1.5.1	Humusové formy	14
3.2	Dřeviny	15
3.2.1	Smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>)	15
3.2.2	Modřín opadavý (<i>Larix decidua</i>)	16
3.2.3	Buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	16
3.2.4	Specifika lesních půd	17
3.2.5	Důležité živiny pro dřeviny	18
4	Metodika	20
4.1	Charakteristika zájmového území	20
4.2	Odběr vzorků	23
4.3	Laboratorní práce	23
4.3.1	Zjištění objemové hmotnosti	24
4.3.2	Aktivní a výměnné pH	24
4.3.3	Stanovení množství organického uhlíku C _{ox}	25
4.3.4	Stanovení kationtové výměnné kapacity (KVK) a obsahu výměnných prvků	26
4.3.5	Výpočet zásob	29
4.3.6	Zpracování výsledků	30
5	Zpracování výsledků	31
5.1	Obsah uhlíku v půdě a půdní reakce	31
5.2	Sorpční komplex	33
5.3	Zásoby živin	37

6	Diskuse	43
7	Závěr	49
8	Zdroje	50

1 Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na zkoumání půdních vlastností, obsahu organického uhlíku a zásob živin (Ca, Mg, K) v různých typech lesních porostů na pilotním území projektu "Chytrá krajina-Amálie". Projekt Amálie je součástí iniciativy České zemědělské univerzity a zaměřuje se na podporu biodiverzity, optimalizaci hospodaření s vodou a minimalizaci dopadů hydrologických extrémů prostřednictvím propojených vodohospodářských, půdoochranných a ekostabilizačních prvků.

Lesní ekosystémy jsou rozsáhlé po celém světě, jde o jeden z nejstabilnějších ekosystémů. S lesem je spojena i půda, která pro něj představuje médium, bez kterého by nevznikl. Mezi lesem a půdou je určitý vztah a koloběh živin. Dřeviny obohacují půdu svým opadem a zároveň vynášejí některé prvky ze spodních horizontů. Zároveň les je důležitým zdrojem organické hmoty, v němž se akumuluje mnoho důležitých prvků (C, Mg, K, Ca). Živiny z půdy jsou nezbytné pro základní fyziologické procesy rostlin, jako je fotosyntéza, dýchání a tvorba nových buněk. Optimální zásobením živinami je klíčové pro zdraví a odolnost lesních ekosystémů vůči stresovým podmínkám (sucho, choroby, škůdci). Porozumění a správná péče o vztah mezi lesními ekosystémy a půdou jsou zásadní pro udržitelné hospodaření s lesy, ochranu biodiverzity a boj proti klimatickým změnám prostřednictvím zachycování uhlíku a udržení ekologické stability krajiny.

S narůstajícím povědomím o změnách klimatu se stále více klade důraz na schopnost ekosystémů, včetně lesních a půdních, sekvestrovat oxid uhličitý a tím přispívat k regulaci atmosférických skleníkových plynů. Potenciál lesních ekosystémů a půd na ukládání uhlíku je významný, což zvyšuje jejich hodnotu v kontextu řešení environmentálních výzev. Environmentální výzvy lze řešit prostřednictvím principů založených na přírodě, které se opírají o přirozené procesy a funkce ekosystémů (Richards a kol., 2022).

Tato diplomová práce se snaží hlouběji popsat vztah mezi lesními porosty a půdou a jejich vztah k vodě. Zaměřuje se na distribuci uhlíku a draslíku, vápníku a hořčíku, ale i dalších půdních parametrů v půdách pod porosty buku, smrku a modřínu a snaží se identifikovat příčiny rozdílů v půdních vlastnostech pod těmito porosty.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Cílem diplomové práce je zjištění zásob organické hmoty a živin v porostech smrku, buku a modřínu v místě dlouhodobých experimentů na lokalitě Amálie a posouzení vlivu jednotlivých dřevin na utváření těchto zásob. Bude posouzen i vliv dalších půdních parametrů, chemických i fyzikálních.

Hypotézy:

- 1) Celková zásoba živin je pod porosty obdobná, liší se ale distribuce živin mezi jednotlivými půdními horizonty.
- 2) Porost ovlivňuje chemismus půdy přímo prostřednictvím chemických vlastností opadu a nepřímo prostřednictvím odlišné distribuce vody v půdních horizontech.

3 Literární rešerše

3.1 Vznik půdy

Půda je definována jako povrchová vrstva souše, která se vyvíjí v důsledku působení půdotvorných faktorů a podmínek. Primárními půdotvornými faktory jsou mateční hornina, (zvětráváním mateční horniny vzniká půdotvorný substrát), klima, v němž se půda vyskytuje, vegetace a půdní organismy neboli edafon (ty využívají půdu k životu a jako zdroj živin, přičemž dodávají organickou hmotu a živiny zpět do půdy), vodní bilance a lidská činnost. Podmínky pro vznik půdotvorného procesu jsou čas a reliéf. Podmiňují vznik některých typů půd, aktivně je neformují, jako je to u půdotvorných faktorů (Pavlů, 2019). Půda („pedosféra“) je svrchní zvětralá kůra pevného povrchu Země na rozhraní mezi litosférou, biosférou, atmosférou a hydrosférou. Je to směs primárních a sekundárních minerálů, organické hmoty, vody, vzduchu a živých organismů. Důležitost půdy jako média pro růst rostlin je dána klasickou definicí Thompsona z roku 1957, která říká, že půda je „horní vrstva země, kterou lze rýt, orat, konkrétně sypký povrchový materiál země, ve kterém rostou rostliny“. Půda je komplexní materiál, který je extrémně variabilní ve svém fyzikálním a chemickém složení. Velká variabilita půd vyplývá z interakcí pedogenetických faktorů a jejich vlivu na tvorbu půdního profilu (Bendor a kol., 2009).

3.1.1 Mateční hornina

Mateční hornina tvoří půdotvorný substrát a část minerální složky půdy. Zvětráváním zabezpečuje přísun minerálních látek do půdy. Pro pedologii není tolik rozhodující, jestli je hornina vyvřelá, sedimentární nebo metamorfovaná. Důležité je její minerální složení, struktura, textura a rychlost zvětrávání. Struktura a textura ovlivňují hloubku půdy, zrnitost, prostorové uspořádání a transportní a transformační procesy (Vavříček a Kučera, 2017).

Zájemové území diplomové práce, které se nachází na lokalitě Amálie je tvořeno geologickým podložím z droby a břidlic s flyšovým vývojem. Za procesů zvětrávání, které jsou popsány níže se tvořila půda na lokalitě Amálie. Droby jsou druhem pískovce, kdy obsahuje nejméně 15-20 % jílovito-siltové primární hmoty a mnoho nestabilních (snadno zvětratelných) minerálů (živců). Břidlice s flyšovým vývojem je usazená hornina tvořena primárně z jílu a siltu (Petránek, 2016).

3.1.1.1 Zvětrávání

Při procesu zvětrávání dochází k rozpadu hornin a k přeměně primárních minerálů na sekundární minerály. Jde o velmi pomalý proces. Jeli původním materiálem tvrdá hornina, pak rozklad a tvorba pár centimetrů půdy může zabrat stovky až tisíce let. Desintegrace může probíhat rychleji, pokud se jedná o pískovce nebo vápence. Zvětrávání zahrnuje fyzikální a chemické přeměny hornin. K zmíněným procesům, můžeme přidat i činnost organismů (Šarapatka, 2014).

Mechanické zvětrávání

Mechanické či fyzikální zvětrávání způsobuje rozpad hornin bez změny chemického složení. Příčiny zvětrávání jsou mráz, krystalizace solí, insolace a pronikání kořenů rostlin. Dalšími faktory jsou destruktivní vlivy větru, řek, mořských příbojů a ledovců. Insolace se nejvýznamněji projevuje v horských oblastech bez vegetace. Vlivem velkých výkyvů denních a nočních teplot způsobuje narušení povrchu hornin (Petránek, 1963). Minerály různých barev adsorbují jiné škály a množství slunečního záření a liší se i jejich rozpínání (Blatt a kol., 1972). Zvětrávání za pomoci mrazu je způsobeno změnou skupenství vody, kdy následné rozpínání působí destruktivně na horninu (Petránek, 1963). Změnou skupenství vody na led zvětší voda objem o 9,2 % (Blatt a kol., 1972). Podobný princip je u krystalizace solí, které mají větší objem než roztok a tlakem zapříčiní prasknutí horniny (Petránek, 1963). Ledovce a proudící voda způsobují mechanický rozpad při přesouvání hornin. Transportem horniny dochází k omílání kusů, rozpadu a postupnému zaoblení. Vlivem větru jsou odnášeny jemné částice, tím odkrývá povrch horniny k dalšímu zvětrávání (Šarapatka, 2014).

Chemické zvětrávání

Chemické zvětrávání zahrnuje rozpouštění, hydrolýzu, hydrataci, karbonizaci, oxidaci a redukci. Způsobuje fyzikální a chemické změny a mění vlastnosti původních hornin. Rozpouštění je jednoduchá, ale významná forma zvětrávání. O konečné formě procesu rozhoduje rozpustnost minerálů ve vodě. Proces rozpouštění výrazně ovlivňuje teplota rozpouštědla. Při rozpouštění s následujícím transportem prvků a dochází k degradaci některých horizontů. Hydrolýza způsobuje rozštěpení složitějších nerostů, základem je disociace vody na kladný vodíkový kationt a záporný hydroxylový aniont. Hydrolýzou se štěpí

primární křemičitany na zásadité složky (kationty), ty se po uvolnění sloučí s hydroxylovou skupinou a vytváří zásady a kyselé složky (anionty), anionty reagují s vodíkovým kationtem za vzniku druhotných vodných křemičitanů (Šarapatka, 2014).

Biologické zvětrávání

Hlavní silou biologického zvětrávání jsou organismy od nejnižších forem až po nejvyšší, a to zástupci flóry i fauny (Smolíková, 1982). Organismy mechanicky a chemicky působí na mateční horninu a na půdotvorný substrát. Některé organismy vylučují kyseliny jako buněčné či kořenové exsudáty, ty podporují hydrolytický rozklad (Šarapatka, 2014).

3.1.2 Klima

Klima se řadí mezi půdotvorné faktory s velkým vlivem hlavně proto, že typ klimatu určuje charakter a intenzitu zvětrávání horniny. Ovlivňuje utváření půd prostřednictvím teploty, srážek a jejich vzájemného poměru v dlouhodobém měřítku. Lze se i často potkat s půdami, které se vyvíjí ve vztahu na zeměpisnou šířku, s menším významem typu mateční horniny, a to v závislosti právě na klimatu. Typem klimatu je i půdní klima, které vypovídá o dlouhodobém režimu fyzikálních vlastností půd. Pro půdní klima je zásadní obsah půdní vody, půdního vzduchu, organických látek, fyzikální vlastnosti půdy, avšak rozhodující je i vliv přízemní vrstvy atmosféry nebo vegetace. Půdní klima je určeno hlavně primárními klimatogenetickými procesy a to energetickou, radiační a vodní bilancí. Tento typ klimatu se řadí mezi mikroklima (Vavříček a Kučera, 2017).

Velké rozdíly v charakteru dynamiky pedogenetických procesů se nachází v humidních a aridních oblastech (Pánek a Buzek, 2002). V chladných a suchých podmínkách s výskytem extrémních teplot je omezena pedogeneze a výskyt rostlin. Za těchto extrémních podmínek je biologický vliv na tvorbu půdy malý (Matthews, 1992). Naproti tomu vyšší úhrn srážek a mírné až teplé klima mají pozitivnější vliv na rostlinou produkci, s tím souvisí rychlejší hromadění organické hmoty (Walker a kol. 1996).

3.1.3 Biologický faktor

Většina organických látek, je zpracována organismy v půdě. Jejich činností dochází k postupnému rozkladu vysokomolekulárních organických látek, na jednoduché nízkomolekulární anorganické sloučeniny. Zároveň mohou syntézou vznikat složité organické sloučeniny. Ty jsou částí humusu, který má nezastupitelnou roli v půdě. Mikrobiota v půdě rozkládá organickou hmotu na jednodušší chemické sloučeniny a minerální látky a ty jsou poté přístupné pro rostliny. Organická hmota se dostane do půdy ve formě odpadu, odumřelých kořenů, dřeva, těl živočichů a mikroorganismů. Hlavní prací půdních živočichů je mechanické zpracování mrtvé organické hmoty. Např. žížaly dokážou hmotu rozmělnit a v zaživacím traktu smísit s minerálními částicemi. Většina půdních živočichů přesune organické a minerální látky v půdě na jiná místa a vytváří organominerální komplexy. S půdními živočichy jsou funkčně spojeny mikroorganismy, které tvoří složitou strukturu symbiotických, potravních, konkurenčních a dalších vztahů. Půda by nebyla půdou bez těchto organismů, ale jen mrtvým substrátem, který by nemohl plnit důležité procesy v ekosystému (Šarapatka, 2014). Mikroorganismy jsou primárními rozkladači organické hmoty v suchozemských ekosystémech. Chemické složení rostlinných zbytků a organické hmoty v půdě zase ovlivňuje mikrobiální aktivitu a strukturu mikrobiálního společenstva a tím i rychlost rozkladu. Rostlinný detritus (např. opad z listů, dřevní úlomky, odumřelé kořeny) představuje hlavní zdroj energie a živin pro společenství mikrobiálních rozkladačů, mimo samotnou půdní organickou hmotu (POH). Zatímco stechiometrické poměry bilance prvků hlavních živin uhlíku, dusíku a fosforu (C:N:P) se během stárnutí listů a opadu liší, mikrobiální zpracování zužuje tyto poměry během rozkladu opadu a hromadění POH. Struktura a funkce mikrobiálních společenstev a převládající životní strategie se přizpůsobují změněným zdrojům. Zároveň silně ovlivňují rychlost a směr stechiometrických posunů zdrojů při rozkladu. Kromě toho hraje organická hmota důležitou roli při určování dynamiky draslíku v půdách, protože organické koloidy mají negativní náboje, které vznikají disociací karboxylových a fenolických skupin během rozkladu organické hmoty. Zbytkový draslík se stává dostupnějším díky působení organických kyselin uvolňovaných při rozkladu organické hmoty (Erriquens a kol., 2007).

Edafon a kořeny rostlin, které odumřou se rozkládají a transformují za pomoci rozvíjející se mikroflóry, následně se hromadí humus. Přítomnost organické hmoty v půdě je zásadní pro udržení půdní úrodnosti a snížení ztráty živin. Slouží jako médium pro biologickou

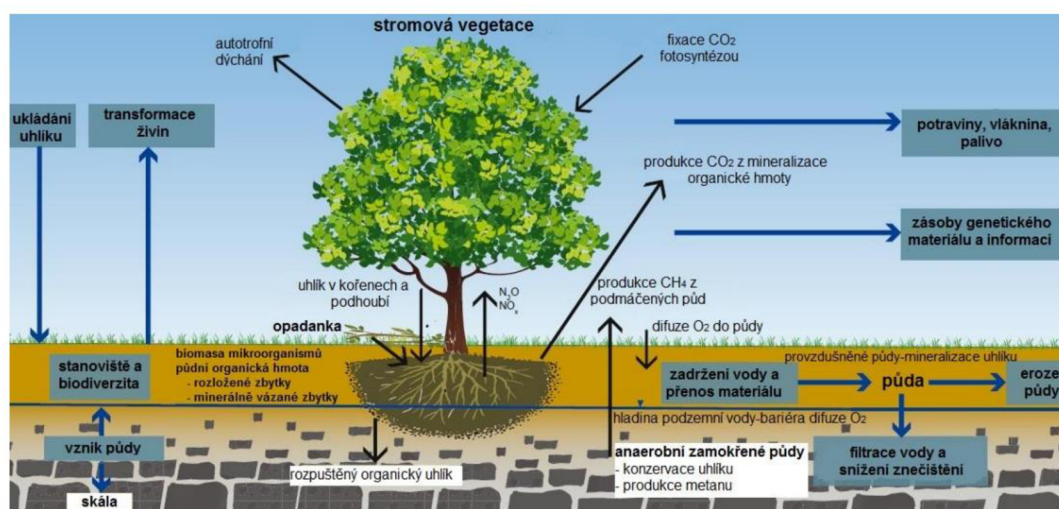
aktivitu, zvyšuje počet přirozeně se vyskytujících mikroorganismů. Dodává půdě potřebné živiny, zlepšuje zadržování vody a tím zlepšuje provzdušňování pro klíčící semena a následný vývoj kořenů (Bernard-Reversat a kol, 2007). Kromě toho je úrodnost půdy spojena s mineralizací živin obsažených v organické hmotě a jejich uvolňování v rostlině dostupné formě do půdního roztoku (viz kapitola níže). Nitrogenní bakterie vážou atmosférický molekulární dusík, který se dále začlení do koloběhu v různorodých minerálních a organických sloučeninách. Postupem času vzniká primitivní půda a půdotvorným procesem se rozvíjí, proces odpovídá podmínkám stanoviště a pokračuje postupný vývoj půdy (Šarapatka, 2014). Nitrifikace je biologický proces, který postupuje rychle v teplých, vlhkých, dobře provzdušněných půdách. Nitrifikace se v půdě zpomaluje při teplotě pod 15 °C. Dusičnany tvoří záporně nabitý iont, který není přitahován k půdním částicím nebo půdní organické hmotě jako u amonného kationtu (NH_4^+). Je tedy dobře rozpustný ve vodě a může se pohybovat pod zónou zakořeněné plodiny. Denitrifikace je proces, při kterém dochází k přechodu aniontu dusičnanového (NO_3^-) na ostatní plyny (oxid dusičitý (NO_2), oxid dusnatý (NO), oxid dusný (N_2O), dusík (N_2) pomocí bakterií. Vzniklé plyny unikají do atmosféry. Denitrifikační bakterie využívají dusičnanový aniont (NO_3^-) místo kyslíku v metabolických procesech. Denitrifikace probíhá v podmáčených půdách s dostatkem organické hmoty a poskytuje energii pro bakterie. Denitrifikace může probíhat rychle, když jsou půdy teplé a nasycené vodou po dobu 2 nebo 3 dní. Dočasné snížení množství pro rostliny dostupného dusíku (N) může vzniknout imobilizací N z půdy. Bakterie, které rozkládají zbytky s vysokým obsahem uhlíku a nízkým obsahem dusíku, jako jsou kukuřičná stébla nebo drobná obilná sláma, potřebují více N, aby strávily tento materiál, než je přítomno v rostlinných reziduích. Imobilizace nastává, když dusičnanový aniont (NO_3^-) nebo amonný kationt (NH_4^+) přítomný v půdě využívá rostoucí mikrobiální společenstvo k tvorbě bílkovin. Aktivně rostoucí bakterie mohou rozkládat půdní organiku, a dochází k uvolňování dusíku během vegetačního období (Fernandez a kol., 2014).

3.1.3.1 Organický uhlík

Většina organického uhlíku v suchozemských ekosystémech se nachází v půdách (Jackson a kol. 2017). Desetiletí výzkumů zdůrazňuje roli uhlíku ve změně klimatu (Davidson a Janssens, 2006). Klíčovým faktorem v mnoha studiích je potenciální zpětná transformace organického uhlíku na atmosférický CO_2 . Jeho stabilizací a destabilizací se také řídí další faktory

jako struktura půdy, což může dále ovlivňovat akumulaci vody a tím produktivitu ekosystému (Obr. 1) (Souza a kol., 2023).

Aktivita kořenů a další vstupy C do půdy mohou podporovat strukturu agregátů (Gould a kol., 2016). Takové procesy řídí strukturu sítí půdních pórů, které zase modifikují tok vody a transport živin, což potenciálně ovlivňuje půdní ekosystém (Yudina a Kuzyakov, 2019). Půda s vysokým obsahem organické hmoty má nižší objemovou hmotnost a ovlivňuje architekturu sítě pórů tvorbou agregátů, kdy organické sloučeniny působí jako pojiva, která vzájemně spojují částice půdních minerálních látek (Souza a kol., 2023). Rozložení organického uhlíku ve větší hloubce profilu podléhá několika vzájemně se ovlivňujícím procesům. Kořeny slouží jako klíčový vstup C a propojují půdu s atmosférou a kontrolují distribuci zdrojů pro biotu prostřednictvím transportu vody, živin a plynů (Hinsinger a kol., 2009). Hloubka zakořenění vegetace může být největší hnací silou pro organický uhlík do půdy, ale distribuce ve větších hloubkách je také řízena dostupností vody, která je důležitá pro produktivní půdní ekosystém. Dostupnost vody je částečně ovlivněna rovnováhou mezi srážkami a evapotranspirací, které ovlivňují vlhkost půdy a tím i vstup uhlíku do půdy. Srážky ovlivňují toky látek v půdním profilu, mohou podporovat pohyb rozpuštěné nebo nerozpuštěné organické hmoty. Kořenové systémy vytváří průtokové cesty a tím může voda infiltrovat do hloubky zakořenění. Procesy ovlivňující cykly smáčení a vysoušení půdy mohou pohybovat půdou a tím ovlivnit pórovitost půdy a transport organického uhlíku v půdním profilu (Souza a kol., 2023). Kořeny podporují vstup C do půdy a ovlivňují půdní strukturu, tím i ovlivňují dynamiku vody v půdě. Závislost mezi množstvím kořenů, vlhkostí a půdní strukturou pravděpodobně hraje důležitou roli v distribuci organického uhlíku do hloubky půdy (Canadell a kol., 1996).



Obr. 1: Koloběh uhlíku na úrovni ekosystému (UNEP, 2012)

3.1.3.2 Sekvestrace uhlíku

Sekvestrace uhlíku (různé způsoby jeho poutání a ukládání omezující jeho koncentraci v atmosféře) je jednou z environmentálních výzev, kterou lze řešit prostřednictvím principů založených na přírodě, které se opírají o přirozené procesy a funkce ekosystémů (Richards a kol., 2022).

Sekvestrace uhlíku v půdě

Sekvestrace uhlíku je procesem zachycování a ukládání uhlíku do půdy, tento typ sekvestrace hraje klíčovou roli pro snížení obsahu atmosférického CO₂. Tento proces má za cíl zpomalit rychlost emisí do atmosféry a klimatickou změnu. Přírodní i antropogenní aktivity mohou usnadnit sekvestraci uhlíku, přičemž cílem antropogenních vlivů je zachovat vyvážený globální uhlíkový rozpočet. Účinnost strategie však závisí na různých faktorech, jako jsou klimatické podmínky, typy půd a postupy hospodaření (Nazir a kol., 2024).

Klimatické změny jsou patrné na teplotách, srážkách a celkovém počasí, kdy tyto změny získaly pozornost v minulém století. Hlavní hnací silou těchto změn je lidská činnost, jako je spalování fosilních paliv, agresivní industrializace a odlesňování (Obioha, 2008). Tyto činnosti vytvářejí nadměrné množství skleníkových plynů, zejména CO₂, které zachycuje teplo a zvyšuje teplotu Země. Extrémní povětrnostní jevy ovlivňují vlhkost a teplotu půdy, druhové složení v ekosystémech a zejména půdní vegetaci. Antropogenní aktivity jako odlesňování, změny využití půdy, nadměrné použití hnojiv a spalování fosilních paliv jsou jedny z hlavních hybatelů změny klimatu. Zachycení uhlíku v půdě tedy představuje životaschopnou strategii ke zmírnění klimatických změn. Přírodě blízké ekosystémy mohou tlumit kolísání množství uhlíku v půdě a zvýšit objem uhlíku prostřednictvím opadu, exsudací kořenů. Půda zadržuje celosvětově 3,3krát více uhlíku, než se nachází v atmosféře (Nazir a kol., 2024).

Sekvestrace uhlíku v lese

Lesní ekosystémy ukládají více než 50 % suchozemského uhlíku, což poukazuje na velký potenciál lesů. Lesy na úrovni mírného pásu mají pokryv jen 8 % z celkové plochy souše, avšak mají významný vliv na sekvestraci uhlíku v celosvětovém měřítku (Tab. 1). Pro oblast Evropy se odhaduje, že se v nich ukládá 40 % uhlíku (Světlík a kol., 2016). Nadzemní biomasa představuje významnou a viditelnou zásobárnu uhlíku v lesních ekosystémech. Koncentrace

uhlíku v lesích a akumulace uhlíku z biomasy vykazují vysokou prostorovou a časovou variabilitu na velkých plochách a jejich dynamika je ovlivněna biodiverzitou, strukturou porostu a podmínkami prostředí. Podmínky mohou být přírodního charakteru a antropogenního a určují množství nadzemní biomasy a akumulaci uhlíku (Wang a kol. 2024). Druhy stromů ovlivňují ukládání uhlíku v ekosystémech několika způsoby. Jehličnaté dřeviny s mělkým kořenovým systémem mají tendenci půdní organickou hmotu akumulovat ve svrchním horizontu, ale méně v hlubších minerálních horizontech ve srovnání s listnatými dřevinami. Při stejných objemech biomasy stromů mají stromy s vysokou hustotou dřeva (mnoho listnatých dřevin) větší schopnost akumulovat C než stromy s lehkým dřevem (mnoho jehličnatých druhů). Druhy, které zaujímají různé ekologické niky, se mohou vzájemně doplňovat, takže produkce biomasy smíšených porostů je vyšší než u monokultur (Jandl a kol., 2007).

Tab. 1: Globální zásoba uhlíku ve vegetaci a v půdě do hloubky 1 metru v terestrických biomech (Rotter a Purchart, 2022)

Biom	Rozloha (10 ⁹ ha)	Globální zásoby uhlíku (Gt)		
		Vegetace	Půda	Celkem
Tropické lesy	1,76	212	216	428
Temperátná lesy	1,04	59	100	159
Boreální lesy	1,37	88	471	559
Tropické savany	2,25	66	264	330
Temperátní louky a pastviny	1,25	9	295	304
Pouště a polopouště	4,55	8	191	199
Tundra	0,95	6	121	127
Mokřady	0,35	15	225	240

3.1.4 Voda

Primární zdroj vody v půdě tvoří atmosférické srážky, které v ČR činí v průměru 550-1800 mm. Zdrojem může být i podzemní voda, která se do půdy dostává díky kapilárnímu zdvihu. Možností je i boční přítok, kdy se půdy nacházejí v blízkosti vodních toků, nádrží, rybníků atd. Zdrojem vody může být i kondenzace vodních par. Hlavní trasy vody z půdy jsou evaporace, transpirace a podzemní odtok (Vavříček a Kučera, 2017). Voda může také sublimovat přímo z pevného skupenství (led) do skupenství plynného. Rychlost vypařování

určují dopadající sluneční paprsky, vlhkost vzduchu a pohyb vzdušných mas nad lokalitou (Bradshaw, 1997). Vodu lze brát jako primární produkční faktor pro les, jelikož je důležitá nejen pro výživu (medium pro živiny), ale také pro růst a vývoj lesa (Vavříček a Kučera, 2017).

Voda je primární složkou všech organismů a rovněž prostředím, ve kterém probíhají všechny životní pochody. Rozpouští většinu živin a má velkou tepelnou kapacitu. Kvantita vody v půdě je jeden z nejdůležitějších faktorů, jenž určuje biologickou aktivitu půdy a růst rostlin. Voda je životním prostředím pro mikrofaunu a mikroorganismy. Kořeny rostlin a mikroorganismy tzv. osmotrofové přijímají nezbytné látky rozpuštěné ve vodě transportem přes membrány. Dostupnost a množství vody v půdě určuje přístupnost živin a potravy. Kvantita vody v půdě též reguluje difúzi plynů, pH, teplotu a zředěnost půdního roztoku. Póry různého tvaru a velikosti jsou zaplňovány vodou a schopnost půdy zadržovat vodu, tzv. retenční schopnost půdy, záleží podobně jako pórovitost na půdním druhu, struktuře a obsahu organické hmoty. Voda v půdě je zadržována v pórech kapilárními silami a absorpcí. Jemnozrnné půdy jsou schopny zadržet větší množství vody než hrubozrnné, a s větším obsahem organické hmoty roste schopnost zadržovat vodu (Šantrůčková, 2014).

3.1.4.1 Voda a les

Stromy jsou důležité pro interakci mezi biosférou a atmosférou. Ovlivňují koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, toky povrchové energie, hydrologický cyklus a biochemický cyklus. Vliv stromů na okolní prostředí je komplikovaný a zohledňuje druhy dřevin, zápoj lesa, habitus dřevin i exogenní stresory (Levia a kol. 2017). Obecně platí, že snížení zakmenění porostu vede ke zvýšenému odtoku, zatímco zvýšené zakmenění dlouhodobě snižuje odtok (Patric, 1978). Vliv vegetačního krytu na změny hydrologických poměrů je přitom obtížné předvídat (Ganatsion a kol., 2012).

Schopnost stromů ovlivňovat propustnost půdy závisí také na druhu dřeviny a struktuře jejich kořenů, zejména na jejich hloubce a prostorovém rozložení, které ovlivňuje další atributy půdy, jako je pórovitost půdy, podíl organických látek a biomasy (Chen a kol., 2013). Současně kořenový systém ovlivňuje i transport půdní vody. Zatímco hlavní kotvící kořen ovlivňuje vertikální transport vody, jemné kořeny mají větší vliv na propustnost v laterálním směru (Fan a kol. 2016).

Les má významnou roli při zmírňování povodní. Evapotranspirací dochází k deficitu vlhkosti půdy, což vytváří prostor pro zadržení vody. Mezi lesními vegetačními typy existují sezónní rozdíly ve využívání a zachování vody v důsledku fenologických změn v asimilačních orgánech, které jsou patrné zejména mezi stálezelenými a listnatými lesy (Crockford a Richardson, 2000; Kupec a kol. 2019). Také lze pozorovat různé strategie kořenových systémů, zejména mezi dubovými a smrkovými lesy, kdy výsadba dubu má větší dopad na hydraulické vlastnosti půdy, obnovu půdní struktury, vyšší infiltraci a také retenční kapacitu (Julich a kol., 2021). Lesní půdy mají vyšší míru infiltrace a nižší povrchový odtok než jiné typy půd. Kořeny stromů zvyšují počet makropórů v půdě, snižují zhutnění půdy a zlepšují strukturu půdy, čímž zvyšují rychlost infiltrace a schopnost zadržovat vodu v půdě (Hemr a kol. 2023).

Vstup srážek do lesních půd může probíhat buď propadem mezi korunami stromů nebo jsou srážky zpočátku zachyceny nadzemní vegetační plochou a následně odkapávají na půdu (Hemr a kol. 2023). Stemflow (tok vody po kmenu) je pohyb vody ze srážek, která se pohybuje z povrchu listů a větví ke kmenu a následným pohybem po kmeni až do půdy (Levia a kol. 2011). Stemflow je ovlivňován řadou vnitřních a vnějších vlivů, které v konečném důsledku řídí množství rozpuštěných látek vstupujících do půdy. Mezi vnitřní vlivy patří mikrorelief kůry, geometrie zápoje, stáří porostu a hydrofobnost koruny. Do vnějších vlivů jsou zahrnuty srážky, sezónnost a zdroje znečištění (Siegert a Levia, 2014). Morfologie kůry také hraje klíčovou roli v stemflow, mocnější kůra na stromě vede k adsorpci vody, čímž se snižuje objem vody, která by se měla dostat do půdy (Levia a Herwitz, 2005). Stemflow představuje 1-20 % ze srážek dopadlých na les (Gonzalez-Ollauri a kol., 2020).

Srážky propadem koruny stromu nebo stemflow se dostávají do lesní půdy, kde mohou začít infiltrovat. Během infiltrace se voda dostává do půdního profilu a redistribuce je významně ovlivněna preferenčními cestami (Sidle a kol., 2001). Infiltrační plocha pro stemflow v blízkosti stromu je obvykle uváděna jako velmi malá ($<1 \text{ m}^2$). Infiltrační plocha pro buk byla také zjištěna jako $<0,1 \text{ m}^2$, ale může se pohybovat od $0,04$ do $11,8 \text{ m}^2$ (Van Stan a Allen, 2020).

Během vegetačního období ve střední Evropě dosahují srážky, které projdou korunami stromů v bukových porostech přibližně 65 %, stemflow 5 % a zbývajících 30 % tvoří intercepce (Staelens a kol., 2008). U smíšeného lesa s převahou buku a dubu dosahuje propad korunami 76,3 %, stemflow 2,6 % a intercepce 21,2 %. Množství vody, které se dostane korunou stromu do půdy bez zachycení či stemflow, se může lišit pro různé intenzity deště, to platí i pro stemflow. Studie z Belgie prokázala, že množství propadlých srážek korunou ve vegetačním

období nepřesahuje 12 % a stemflow nepřesahuje 8 % u srážek do 5 mm (Staelens a kol., 2006).

3.1.5 Taxonomie půd

Platný Taxonomický klasifikační systém půd České republiky (TKSP) je postaven na přesné diagnostice půdních horizontů a jejich vlastností. Česká klasifikace byla vytvořena, aby svou strukturou a názvoslovím odpovídala mezinárodní klasifikaci (Němeček a kol. 2008). Klasifikační systém má několik úrovní: referenční třída, půdní typ, půdní subtyp, půdní varieta a půdní subvarieta. Půdní jednotku klasifikujeme na základě sledu a vlastností diagnostických horizontů (organický horizont (O, T), organominerální povrchový horizont (A), podpovrchový horizont (E, B, G) a substrát a horizont níže sola (C, M, R, D).

Detailní členění organického horizontu O v TKSP odpovídá členění dle Greena a kol. (Green a kol., 1993). Nadložní organické horizonty jsou ty, které obsahují více než 12-18 % organického uhlíku a více než 20-30 % organických látek. Vznikají-li na půdách, které nejsou zamokřeny a dělí se na horizont opadanky (L), drti – fermentační (F) a horizont měli – humufikační (H). Horizont opadanky (L) je tvořen relativně čerstvým rostlinným opadem bez známek zjevného rozkladu, proto jeho původ je snadno rozeznatelný. Dělí se na horizont nové opadanky (Ln) a horizont změněné opadanky (Lv). Horizont drti (F) tvoří částečně rozložené organické zbytky, u kterých je jejich původ většinou ještě rozeznatelný. Převažují rozpoznatelné části nad materiálem. Horizont drti dále dělíme na mykogenní horizont drti (Fm), zoogenní horizont drti (Fz) a amfigenní horizont drti (Fa). Horizont měli (H) tvoří rostlinné zbytky v silném stupni rozkladu, takže jejich struktura není většinou rozeznatelná. Část humifikovaného materiálu zřetelně převládá nad méně rozloženými zbytky, přičemž tyto tvoří převážně zbytky kořenů. Horizont měli se dělí na humusový horizont měli (Hh), zoogenní horizont měli (Hz) a reziduální horizont měli (Hr) (Končel, 2016). Hydrogenní horizonty nadložního humusu (Oh) vznikají na půdách, které jsou větší část roku zamokřené. Rašelinné horizonty (T) jsou tvořeny zrašeliněnými organickými zbytky. Jejich mocnost u organosolů je větší než 0,5 m (Šarapatka, 2014).

Organominerální povrchové horizonty jsou povrchové minerální horizonty s akumulací humifikovaných organických látek do obsahu 20-30 procent hmotnostních. Mezi anhydrogenní humózní horizonty (A) spadá iniciální (Ai), humózní lesní (Ah), humózní drnový

(Ad), melanický (Am), černický (Ac), atd. Kulturní humózní horizonty jsou orniční (Ap), drnový (Ad) antropický (Az) horizonty (Šarapatka, 2014).

Podpovrchové horizonty se nacházejí pod horizonty akumulace organických látek. Do této skupiny patří: vysvětlené, jílem nebo oxidací železa a manganem ochuzené horizonty, kambické (metamorfované) horizonty, spodické horizonty, luvické, jílem obohacené horizonty, mramorové redoximorfní horizonty, glejové, reduktomorfní horizonty, horizonty akumulace reoxidovaných oxidů železa a manganu, horizonty akumulace solí (Šarapatka, 2014).

3.1.5.1 Humusové formy

Lesní půdy, které jsou předmětem této práce, jsou specifické přítomností nadložních organických horizontů, a proto je samostatná kapitola věnována i detailnímu popisu těchto horizontů, respektive popisu humusových forem. Jsou definované tři základní formy nadložního humusu: mor, moder a mul (Green a kol., 1993).

Mor se vždy skládá ze všech tří vrstev organického horizontu (L, F, H) a vzniká v nepříznivých podmínkách pro dekompozici a transformaci organické hmoty. Pod morem se nejčastěji nachází organominerální horizont Ae (ochuzený, eluviovaný). Nejčastěji se nachází v horách s chladným podnebím, pod jehličnatými dřevinami s kyselým opadem a s vegetací s kyselým opadem (brusinka, borůvka, vřes). Hrabanka se u této formy hromadí na povrchu půdy a stagnuje její dekompozice. Mocnost moru se pohybuje okolo 8 a 10 cm, v některých případech až 40 cm. Ze všech forem má nejnižší biologickou aktivitu, která je hlavně zajištěna houbami a plísněmi. Vznik moru je zesilován chudým půdním prostředím na báze a jílu. Vyskytuje se v silně kyselých prostředích. Ve větším množství se ze zástupců zoedafonu vyskytují roztoči a chvostoskoci. Procesy mineralizace a humifikace jsou značně omezeny. U moru se nadložní humus kupí ve zplstnatělé vrstvě propletené hyfami hub, mycelii plísní a kořeny rostlin (Vavříček a Kučera, 2017).

Moderová humusová forma vzniká v příznivějších klimatických a půdních podmínkách, oproti moru, který je vázaný na chladné klima. Velkou roli při rozkladu, který u této formy podmiňuje významnou, ale ne úplnou mineralizaci a humifikaci organických zbytků, hrají stanovištní podmínky, hlavně vlhkost a provzdušenost opadané vrstvy. U moderu je vždy přítomný horizont H. U moderu je aktivita zoedafonu mnohonásobně vyšší než u moru, ale

nedosahuje na aktivitu v mulových humusových formách. Morový moder je forma moderové humusové formy, která se vyznačuje přechodnou subformou k moru s mocností 3-10 cm a stratigrafií L, Fa, Fm, Hh. Podobnost s morem vyplývá hlavně z přítomnosti amfigenního drťového horizontu Fa, ve kterém jsou mimo exkrementů zoedafonu části i mycelia hub (Končel, 2016).

Mulové humusové formy vznikají v podmínkách velice příznivých pro rozklad a transformaci organických zbytků. Mul vzniká v mírném a teplém klimatu, na půdách s příznivou trofností, provzdušeností a s mírným vodním režimem, v listnatých nebo smíšených lesích. Charakteristický je dobře vyvinutý humózní horizont A, který bývá černohnědý až hnědočerný. Jiné horizonty se buď nevyskytují, nebo jsou velmi tenké. V mulu je hodně intenzivní činnost zoedafonu, bakterií a aktinomycet, které zapříčiňují rychlý rozklad organické hmoty. Pravý mul má maximální mocnost 2 cm a stratigrafii (L), (Fz). Semimul je humusová subforma s mocností do 2 cm a stratifikací (L), (Fz), (Hz). Přítomnost tenkého zoogenního horizontu drti Hz odlišuje semimul od pravého mulu. Tvoří se na jílem chudších minerálních substrátech, na kterých bývá půda sušší a mělčí (Končel, 2016).

3.2 Dřeviny

Pro diplomovou práci byli vybrány tři dřeviny, které jsou významné pro lesní hospodářství v České republice. Dřevina smrk má nevyšší zastoupení v ČR s 43,1 %, jelikož jde o nejvýznamnější hospodářskou dřevinu, díky jejím nárokům na pěstování a kvalitu dřeva. Buk má nejvyšší zastoupení z listnáčů s 10,5 %. Jde o nejpěstovanější listnatou dřevinu u nás. Modřín má zastoupení 3,2 % v ČR, jeho funkce jsou hlavně podpůrné. Nejvíce je v porostech využíván jako větrolam.

3.2.1 Smrk ztepilý (*Picea abies*)

Popis: Stálezelená dřevina, dosahuje výšky 30-50 m. Délka života je 350-400 let. U smrků rostou větve v pravidelných přeslenech, v zápoji spodní přesleny odumírají, ale ve vysokohorských podmínkách zůstávají přesleny až k zemi. Kmen je rovný až do koruny stromu, koruny mají pravidelný kuželovitý charakter se špičatým vrcholem. Kořenový systém je mělký a talířovitého tvaru, prokořenění se pohybuje od desítek centimetrů u těžkých jílovitých půd, naproti tomu u lehkých a propustných půd se mohou kořeny dostat až přes

jeden metr. Borka má červenohnědé až šedé zbarvení. Jehlice jsou tmavě zelené, lesklé a zašpičatělé, vydrží na stromě 6-9 let. Začátek plodnosti u solitérních jedinců začíná mezi 30-40 roky, v zápoji až od 60 let. Plodnost je urychlena dostatkem světla, naproti tomu dostatek živin počátek plodnosti oddaluje. Semenné roky se po 4 až 5 letech opakují (Slavík a Bažant, 2016).

Ekologické optimum: V mladém věku polostinná a ve stáří světlomilná dřevina. Z důvodu mělkého kořenového systému je náročný na dostupnost vody v horním horizontu půdy. Půdní a geologické nároky má nízké, vyskytuje se na kyselých stanovištích. Porosty smrku velmi ovlivňují půdní vlastnosti, hlavně tvorbou vrstvy surového humusu. Při nedostatku vláhy se stupňuje ukládání surového humusu, chudost půdy a nedostatek vápníku v půdě (Slavík a Bažant, 2016).

3.2.2 Modřín opadavý (*Larix decidua*)

Popis: Modřín dosahuje výšek přes 50 metrů s průměrem kmene 1- 1,5 (2) metry. Může se dožít až 500 let. Výška na extrémních stanovištích pouze 20 metrů i méně. Větve netvoří přesleny, rostou nepravidelně. Koruna ve stáří tvoří široké a často nepravidelné tvary. V mladém věku tvoří jeden hlavní kůlový kořen. Hlavní kořen je časem doplněn kosterními kořeny, tudíž kořenový systém má srdčitý tvar. Díky dobrému ukotvení v půdě zvládá čerpat živiny i vodu z hlubších vrstev. Borka je šedavá až hnědočervená s typickým fialovým zbarvením, je odolná proti většině škodlivým činitelům a může vzdorovat požáru. Jehlice vyrůstají z brachyblastů ve svazečku, ve kterém se nachází 30-50 jehlic, které opadávají každý rok. Relativně brzy začíná plodit, mezi 20 a 30 roky, ve vyšších polohách později. Semenný rok může být po 3 až 5 letech, ve vyšších polohách až 6-10 let (Slavík a Bažant, 2016).

Ekologické optimum: Náročná dřevina na světlo, trpí na zástin. Modřínu nevyhovují vysychavé půdy a oblasti s nižšími srážkami. Preferuje hlubší a živnější půdy, ale je schopen růst i na suťových svazích, mělkých půdách s dostatkem vláhy. Dobře snáší teplotní extrémy (Slavík a Bažant, 2016).

3.2.3 Buk lesní (*Fagus sylvatica*)

Popis: Buk dorůstá výšky okolo 35 metrů s průměrem kmene 1,5 metru. Může se dožít 200-400 let. Koruna u solitérů roste kulovitě, v zápoji metlovitě. Kmen většinou roste

průběžně do koruny. Kůra je hladká se šedivou barvou. Kořenový systém má srdčitý tvar. Buk z velkého kořenového uzlu vysílá silné kořeny všemi směry do půdy, díky tomu je stabilní a dobře ukotven. Ve volném prostoru začíná plodit mezi 20-40 lety, v porostu 60 let. Plodná období jsou v intervalu 5-10 let, za špatných podmínek za 9 až 12 let (Úradníček a Chmelař, 1998).

Ekologie optimum: Stínomilná dřevina. Nároky na vláhu jsou střední, nedaří se mu v extrémně suchých a zamokřených půdách. Nesnese vzestup hladiny podzemní vody k povrchu půdy. Vyhýbá se suchým pískům, těžkým nepropustným jílům, rašelinám a bažinám. Opad se může špatně rozkládat a začne se tvořit vyšší vrstva hrabanky, která vrstevnatě sléhává a váže na sebe vodu, čímž zabraňuje provzdušnění. Následkem může být tvorba surového humusu, která následně zabrání růstu bylinného patra a zmlazení dřevin (Úradníček a Chmelař, 1998).

3.2.4 Specifika lesních půd

Lesní půdy oproti zemědělsky využívaným půdám mají jiný charakter koloběhu živin. U zemědělských půd je koloběh živin velmi ovlivněn antropogenním vlivem, kdy člověk dodává živiny do půdy. Lesní půdy jsou charakteristické různým rozsahem uzavřenosti koloběhu živin. Koloběh živin je ovlivněn způsobem hospodaření s lesem. Přírodě blízké lesy mají nižší ztrátu látek a těsnější vztahy v jejich koloběhu, ale i hospodářské lesy mají procesy cyklů prvků zřetelně dlouhodobější, v závislosti na obmýtí porostu, během kterého minerální látky v půdním roztoku, v opadu a jeho dekompozici absolvují jistou formu koloběhu. Je tedy zapotřebí vnímat přírodní specifika stanoviště při pěstování lesa, přičemž by se měly respektovat ekologické nároky dřevin. Lesy jsou charakteristické množstvím živin v opadu a specifikací jeho dekompozice, kdy modřín, smrk a borovice mají chudý opad na živiny a jsou pokládány za dřeviny s kyselým opadem. Kdežto opad melioračních dřevin, jako jsou dub, buk a lípa, je na bázi výrazně bohatší, protože za pomoci kořenů vynášejí ze spodních půdních horizontů bazické látky do listů, se kterými se ve formě opadu dostávají na povrch půdy a následně do koloběhu (Vavříček a Kučera, 2017). K hospodaření v lese patří i těžba dřeva, která může velmi ovlivnit půdu. Intenzitou těžby se mohou značně ovlivnit ztráty prvků v ekosystému, čímž se naruší přirozený koloběh živin. Pokud se po těžbě odvezou i potěžební zbytky, zvyšuje se tím odnos prvků z ekosystémů a snižuje zásoba prvků v půdě, což může některých v podmínkách vést k acidifikaci půdního prostředí (Rotter a Purchart, 2022). Obsahy důležitých prvků (N, P, K) jsou nejnižší v kmenu stromu a vyšší hodnoty obsahu jsou ve dřevě

větví, v kůře, kořenech a asimilačních orgánech, tedy právě v potěžebních zbytcích (Remeš a kol., 2015).

3.2.5 Důležité živiny pro dřeviny

Dřeviny nepotřebují k růstu a vitalitě jen energii ze slunečního záření, uhlík z CO₂ a vodu. Důležité jsou i další prvky. Ve větším množství jsou zapotřebí makronutrienty (N, P, Ca, K, S, Mg) a v menším množství jsou to mikronutrienty (Fe, Mo, Mn, Zn, B). Pokud je nedostatek těchto zmíněných prvků, může to mít za následek limitování růstu a vitality dřevin a tím i celého lesního ekosystému (Rotter a Purchart, 2022). Tato práce se zabývá třemi makroprvky (Mg, K, Ca), které jsou důležité pro lesní ekosystém. Popis jejich působení na les je uveden níže.

Hořčík se v půdě nachází především jako výměnný v sorpčním komplexu, odkud je rostlinami z půdy čerpán. Dodání do půdy se uskutečňuje zvětráváním mateční horniny, hlavně z dolomitů, hadců, peridotitů a dalších bazických a ultrabazických hornin obsahující primární Mg-Fe silikáty a sekundární Mg silikáty. Hořčík je podstatný koagulát při tvorbě půdní struktury. Obvykle je koncentrace Mg v půdě menší než koncentrace vápníku, kdy hořčík zaujímá v sorpčním komplexu 5-20 %, kdežto vápník cca 69-90 %. Výjimkou jsou třeba půdy na hadcových substrátech, kde hořčík dosahuje 3-9x vyšších koncentrací než vápník. Při těchto vysokých koncentracích dochází k porušení výživy rostlin, vlivem nedostatku Ca a toxicity Mg. Ale je stále nepostradatelným prvkem pro rostliny, kdy je důležitou součástí chlorofylu, potřebný pro průběh fotosyntézy, ale také pro syntézu olejů a pro spuštění enzymů podílejících se na metabolických procesech. Významný je pro tvorbu rostlinného těla, přijímání energie, pro funkci stomat a dalších funkcí. Hořčík oproti vápníku se pohybuje ze starších do mladších orgánů (Vavříček a Kučera, 2017).

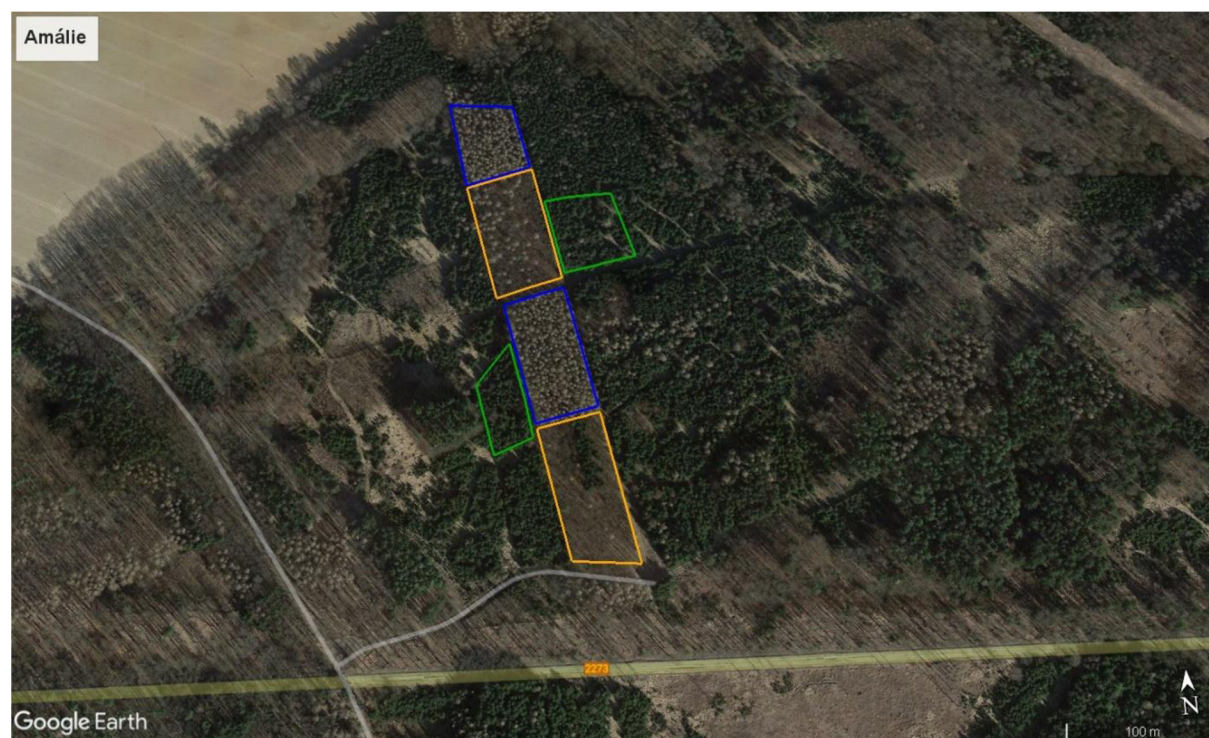
Vápník a draslík se vyskytují hlavně v rozpustné formě. Ve vakuolách rostlinných buněk se podílejí se na regulaci osmotických a stomatárních procesů. Vápník je důležitou složkou některých buněčných membrán a shodně jako draslík a hořčík hraje významnou roli v elasticitě membrán, tím snižuje jejich propustnost a zpomaluje vstup K, Fe a těžkých kovů do buněk. Vápník také redukuje příjem H⁺, Mg²⁺ a NH₄⁺, ale stimuluje příjem Cl⁻ a NO₃⁻. Ca a K mají vliv na doprovázení dusičnanů až na místa, kde jsou redukovány v kořenech nebo listech. Draslík je významný pro růst a dělení buněk, pro fotosyntézu, zvyšuje elasticitu buněk, podílí se na

regulaci vodního režimu a tvorbě a rozvoji kořenového systému. Potlačuje příjem Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} a NH_4^+ , naproti tomu stimuluje příjem PO_4^- , NO_3^- a Cl^- . Normální množství draslíku v asimilačních orgánech je 4,5 – 6 g/kg u jehličnanů, 8 g/kg u dubu a buku. V půdách se draslík nachází v podílu cca 0,5 – 3,2 %, nižší obsah je možné najít v píscích nebo rašelinách. Vyskytuje se jako nevýměnný (v primárních minerálech) či výměnný (2-7 %), kdy výměnný je vázaný hlavně na jílové minerály typu vermikulit a illit. Pro výživu dřevin je optimální 10-20 mg/l draslíku zastoupeného ve výměnné formě (cca 1-10 %). Koncentrace draslíku jakožto jednomocného kationtu (K^+) je podmíněná mobilními anionty (Vavříček a Kučera, 2017).

4 Metodika

4.1 Charakteristika zájmového území

Území pro diplomovou práci se nachází na území pilotního projektu „Chytrá krajina-Amálie“ (Obr. 2). Projekt Amálie je tvořen ze tří projektů chytré krajiny, které založila Česká zemědělská univerzita. Cíle projektu jsou například podpora biodiverzity, optimalizace hospodaření s vodou, minimalizace dopadů hydrologických extrémů. Snahou projektu je dosáhnout promyšleného krajinného systému navzájem propojených vodohospodářských, půdoochranných a ekostabilizujících prvků, společně s racionálním managementem krajiny (CVPK, ©2022).



Obr. 2: Zájmové území (oranžová – buk, modrá – modřín, zelená – smrk) (Google earth Pro)

Amálie se nachází ve Středočeském kraji v okrese Rakovník, současně se nachází v CHKO Křivoklátsko. Na Amálii jsou relativně nepříznivé klimatické podmínky, protože je ovlivněna srážkovým stínem Krušných hor (cca 8 km od Rakovníka). Oblast patří mezi nejsušší oblasti v České republice (Klimšová, ©2022). Průměrná roční teplota je okolo 7-8,5 °C a průměrný roční srážkový úhrn činí 450-550 mm. V dané oblasti se může pravděpodobně z

30-40 % vyskytnout suché vegetační období (eAGRI, ©2022). Geologické podloží tvoří droby a břidlice s flyšovým vývojem. Sklon zalesněné experimentální lokality (Obr. 2) má charakter mírného svahu se svažitostí 5-10 %. Stáří porostů nacházejících se na experimentálních plochách je 25-35 let, se skladbou dřevin smrk ztepilý (SM; *Picea abies*), modřín opadavý (MD; *Larix decidua*) a buk lesní (BK; *Fagus sylvatica*), které jsou pěstované v monokulturách. Předchozím porostem byla na celém studovaném území smrková monokultura (Zdražil a kol., 2021).

V rámci diplomové práce jsem spolupracoval s doktorem Lukášem Jačkou z Fakulty životního prostředí. Jeho tým se věnuje na stejném zájmovém území hydrologickým cyklům od měření vlhkostí, srážek, infiltrací vody a retenci. V devíti experimentálních stojanech mají umístěno 54 senzorů (TMS4), tedy šest senzorů na jeden stojan. Polovina senzorů měří vlhkost půdy do 15 cm hloubky profilu a zbylá pod 15 cm. Senzory mají umístěny cca 1,5 m od kmenů stromů (Kuželková a kol. 2023). Pro diplomovou práci bylo možné využít jejich dat a poznatků (viz kapitola 6).

Půdní typ na zájmovém území byl určen pomocí kopané půdní sondy (Obr. 3 a 4) jako luvizem oglejená s půdními horizonty a jejich mocnostmi:

- organický horizont (O) 5-6 cm,
- organominerální horizont (Ah) 4-6 cm,
- eluviální horizont El 25 cm
- luvický oglejený horizont (Btg) 30 cm,
- luvický horizont (Bt) 30 cm,
- půdotvorný substrát (C) od 90 cm



Obr 3: Výkop půdní sondy (Pavlů, 2023)



Obr. 4: Kopená půdní sonda (Zelinka, 2023)

4.2 Odběr vzorků

Na lokalitě Amálie byl proveden odběr vzorků v listopadu 2022 v šesti porostech, kde byly zastoupeny monokulturně dřeviny smrk ztepilý, modřín opadavý a buk lesní. Odběr byl proveden kvantitativně za pomoci železných rámců o rozměrech 25x25 cm, kdy v každém porostu byly použity čtyři rámy. Celkem bylo dvacet čtyři odběrů. Rám byl umístěn na povrch půdy a následně se ve vymezeném prostoru odebíraly vzorky zvláště z organických horizontů (L, F, H) a organominerálního horizontu (Ah), kdy u dřeviny BK byla z horizontu L odebrána zvláště vrstva Ln a Ls (Obr. 5). Z eluviálního horizontu (El) byly vzorky odebrány lopatkou (nekvantitativně) a zároveň byly odebrány neporušené půdní vzorky pomocí Kopeckého válečků pro zjištění objemové hmotnosti.



Obr. 5: Odběr vzorků v terénu (Tejnecký, 2022)

4.3 Laboratorní práce

Všechny vzorky byly usušeny v sušárně při teplotě 30°C. Po vysušení byly zváženy pro stanovení zásob (kromě horizontu El). Vzorky z organických horizontů byly namlety a následně se zbylými horizonty přesáty na jemnozem (2 mm). Pro analýzy byla použita polovina vzorků,

jelikož z některých kvantitativních odběrů bylo získáno jen velmi malé množství vzorku. Obsah organického uhlíku u dřevin BK a SM byl stanoven ve všech vzorcích, jelikož při prvním měření byla získaná data vysoce variabilní.

4.3.1 Zjištění objemové hmotnosti

Pro zjištění objemové hmotnosti byly využity Kopeckého válečky. Válečky byly vloženy do sušárny při 125 °C a po 24 h byly vyndány a zváženy na váze. Následně se vypočítala objemová hmotnost, kdy byla čistá hmotnost (g) suchého vzorku vydělena objemem Kopeckého válečku (100 cm³).

4.3.2 Aktivní a výměnné pH

Pro každý horizont byla stanovena hodnota aktivního a výměnného pH (ISO 10390). Vzorek byl odebrán za pomoci odběrové lžičky s objemem 5 ml a následně přesunut do lahvičky o objemu 50 ml. Pro zjištění aktivního pH byla použita destilovaná voda, která byla převařena nad kahanem a pro výměnné pH byl použit roztok 0,01 M CaCl₂. Následně za pomoci dávkovače bylo ke vzorku nadávkováno 25 ml destilované vody nebo roztoku CaCl₂. V dalším kroku byly vzorky protřepávány po dobu jedné hodiny a poté setrvaly jednu hodinu v klidu. Na závěr už byla zjištěna hodnota pH za pomoci pH metru (Obr. 6).



Obr. 6: laboratorní stolní pH metr (Zelinka, 2024)

4.3.3 Stanovení množství organického uhlíku C_{ox}

Obsah organického uhlíku byl stanoven mokrou cestou neboli modifikovanou Tjurinovou metodou, kdy se využívá oxidace organického uhlíku (C_{ox}) chromsírovou směsí (Skjemstad and Baldock, 2007).

Pro metodu je zapotřebí namíchat chromsírovou směs a Mohrovou sůl. Na chromsírovou směs je zapotřebí rozpustit 39,2296 g $K_2Cr_2O_7$ v 700 ml destilované vodě, pro lepší rozpuštění je využito ultrazvuku. V dalším kroku se přilévá 1000 ml koncentrované H_2SO_4 za stálého chlazení a míchání. Na závěr se doplní objem na 2000 ml destilovanou vodou. Příprava Mohrovy soli vyžaduje rozpustit 78,42 g $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ v 800 ml destilované vody. Ke vzniklému roztoku přidáme 40 ml koncentrované kyseliny sírové H_2SO_4 a doplníme objem do 2000 ml.

Vzorek se přeseje přes síto 0,2 mm do váženky, následuje vážení do kádinky, navážka pro horizonty L, F, H, A byla 0,1 g a horizont E 0,2 g. Do kádinky se vzorkem přidáme 10 až 30 ml 0,4N chromsírové směsi a dáme do laboratorní sušárny přikryté hodinovým sklíčkem na jednu hodinu při teplotě 125 °C. Po vytažení necháme vychladnout vzorky. Po vychladnutí opláchneme hodinové sklíčko a stěny kádinky a vložíme míchadlo. Kádinku položíme na magnetickou míchačku a ponoříme elektrody (Obr. 7). Následně titrujeme za pomoci digitální byrety, v které je 0,1N Mohrova sůl. Při titraci sledujeme barvu roztoku, při blížícím se zbarvení na modrou barvu začneme sledovat výchylku ručičky galvanometru, dokud nedojde k jejímu trvalému vychýlení. Pro měření použijeme dva slepé vzorky.



Obr. 7: Měření C_{ox} (Zelinka, 2024)

Výpočet faktoru Mohrovy soli:

$$F = 40 / ((bl_1 + bl_2) / 2)$$

F= Faktor

bl₁, bl₂= spotřeba Mohrovy soli na slepé vzorky (ml)

Úprava spotřeby Mohrovy soli:

$$S = sp * F$$

S= upravená spotřeba Mohrovy soli (ml)

Sp= spotřeba Mohrovy soli (ml)

F= Faktor

Výpočet obsahu organického uhlíku C_{ox}:

$$C_{org} = (V - S) * 0,3$$

C_{org}= množství organického uhlíku (mg)

V= objem použité chromsírové směsi přepočtený na 0,1N (40, 80, respektive 120 cm³)

S= upravená spotřeba

$$C_{ox} = C_{org} / (N * 10)$$

C_{ox}= množství organické uhlíku (%)

C_{org}= množství organického uhlíku (mg)

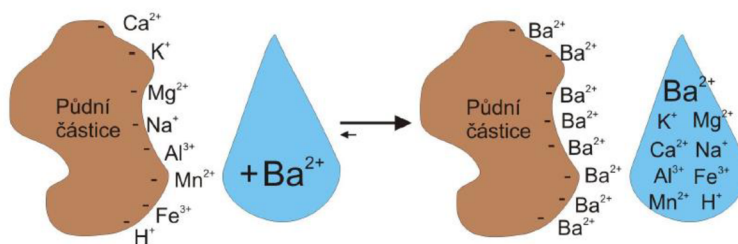
N= navážka

Tab. 2: Vyhodnocení obsahu humusu

Obsah C _{ox} (%)	Obsah humusu (%)	Vyhodnocení
<0,6	<1	Velmi nízký
0,6 – 1,1	1,0 – 2,0	Nízký
1,1 – 1,7	2,0 – 3,0	Střední
1,7 – 2,9	3,0 – 5,0	Vysoký
> 2,9	> 5,0	Velmi vysoký

4.3.4 Stanovení kationtové výměnné kapacity (KVK) a obsahu výměnných prvků

Princip metody spočívá v nasycení sorpčního komplexu přebytkem kationtu (Ba²⁺) a vytěsnění sorbovaných kationtů do roztoku (Obr. 8). Následuje měření H⁺ potenciometricky a prvková (Ca, K_g, K, Na, Al, Fe, Mn) analýza pomocí optické emisní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem (Obr. 9) (Cools a De Vos, ©2016).



Obr. 8: Princip KVK (Tejnecký, 2019)

Vzorky se naváží ($2,5 \pm 0,05$ g) do 50 ml lahvíček. Poté se do lahvíček se vzorkem přidá dávkovačem 30 ml 0,1 M roztoku BaCl_2 , dále následuje třepání jednu hodinu. Po třepání vložíme vzorky do centrifugy na 5 minut a dále odstředěný roztok přefiltrujeme přes papírový filtr do nové zkumavky. Změříme pH přefiltrovaných roztoků a samotného roztoku BaCl_2 . Roztok před prvkovou analýzou ještě zředíme desetkrát a přefiltrujeme přes membránový filtr s póry $0,45 \mu\text{m}$. Poté jsou vzorky připraveny pro prvkovou analýzu za pomoci optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem iCap 7000 (Obr. 9). Ze stanovení KVK byl vyřazen horizont L.



Obr. 9: optický emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem iCap 7000 (Thermo) (Zelinka, 2024)

Stanovení iontového ekvivalentu:

$$IE (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = \frac{c \cdot V}{m \cdot EQ \cdot 10}$$

IE – iontový ekvivalent ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

c – koncentrace prvku v roztoku v mg L^{-1}

V – objem přidaného roztoku v ml

m – navážka vzorku půdy v gramech

EQ – ekvivalent prvku v g mol^{-1}

EQ = M/z (M – molární hmotnost prvku v g mol^{-1} , z – náboj prvku)

Výpočet koncentrace výměnného vodíku H^+ :

$$\text{H}^+ (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = 10^{-1} * \frac{(10^{-\text{pH}_p} - 10^{-\text{pH}_o}) * V * 1000}{m * 88} - \frac{c(\text{Al}) * V}{m * M(\text{Al}) * (1 + \frac{10^{-\text{pH}_p}}{10^{-5,58}})}$$

H^+ - výměnný H ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

pH_p – hodnota pH BaCl_2 roztoku po extrakci půdy

pH_o – hodnota pH připraveného roztoku BaCl_2

V – objem přidaného roztoku v ml

m – navážka vzorku půdy v gramech

c (Al) – koncentrace Al z roztoku BaCl_2 v mg L^{-1}

M (Al) – molární hmotnost Al v g mol^{-1}

Výpočet KVK:

$$\text{KVK} (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = \text{BC} + \text{EA}$$

$$\text{KVK} (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+} + \text{H}^+$$

$$\text{BC} (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$$

$$\text{EA} (\text{cmol} + \text{kg}^{-1}) = \text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+} + \text{H}^+$$

$$\text{BS} (\%) = \text{BC}/\text{KVK} * 100$$

KVK – kationtová výměnná kapacita ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+} + \text{H}^+$ - intový ekvivalent (IE, $\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

BC – bazické kationty ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

EA – výměnná acidita ($\text{cmol} + \text{kg}^{-1}$)

BS – nasycenost sorpčního komplexu bazickými kationty (%)

4.3.5 Výpočet zásob

Výpočtem zásob jednotlivých prvků jsou převedeny hodnoty jejich koncentrací na kvantitativní údaj vztažený k ploše (m² nebo ha), díky čemuž lze získat nejen informace o distribuci prvků v půdním profilu, ale po sečtení hodnot z jednotlivých půdních horizontů lze získat i informaci o celkové zásobě prvku v půdním profilu.

Přepočet hmotnosti půdy v jednotlivých horizontech na jednotkovou plochu:

$$m = \left(\frac{m_1}{1000} \right) / 0,0625$$

m = hmotnost půdy (kg/m²)

m₁ = hmotnost vzorku (g)

0,0625 = plocha rámu (m²)

$$m = \rho * 1000 * 0,25$$

m = hmotnost půdy pro E (kg/m²)

ρ = objemová hmotnost (g/cm³)

Výpočet koncentrace prvku:

$$C = \frac{(c_1 - c_2) * V}{m}$$

C = koncentrace prvku (mg/kg)

c₁ = koncentrace z ICP (mg/l)

c₂ = koncentrace slepého vzorku (mg/l)

V = objem přidaného roztoku (l)

m = navážka vzorku půdy (kg)

Výpočet zásoby Ca, Mg, K:

$$Z = m * C$$

Z = zásoba (mg/m²)

m = hmotnost půdy (kg/m²)

C = koncentrace prvku (mg/kg)

Výpočet zásoby uhlíku:

$$Z = \left(m * \left(\frac{C}{100} \right) \right) * 1000$$

Z = zásoba (g/m²)

m = hmotnost půdy (kg/m²)

C = koncentrace organického uhlíku (%)

4.3.6 Zpracování výsledků

Získané výsledky byly zpracovány s využitím programů Excel 2023 a STATISTICA 12. V Excelu byly zhotoveny tabulky a grafy. STATISTICA byla využita pro statistické šetření, základní popisné charakteristiky jako průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient (směrodatná odchylka dělená průměrem). Pro zjištění rozdílů mezi jednotlivými horizonty a variantami porostů byla použita dvoufaktorová ANOVA (analýza rozptylu) a Scheffeho test. Z této analýzy byla vyřazena data z horizontu E. Hodnoty z tohoto horizontu byly výrazně odlišné a při použití celého souboru dat nebyla splněna podmínka normality, zbylá data byla transformována pomocí Box-cox metody.

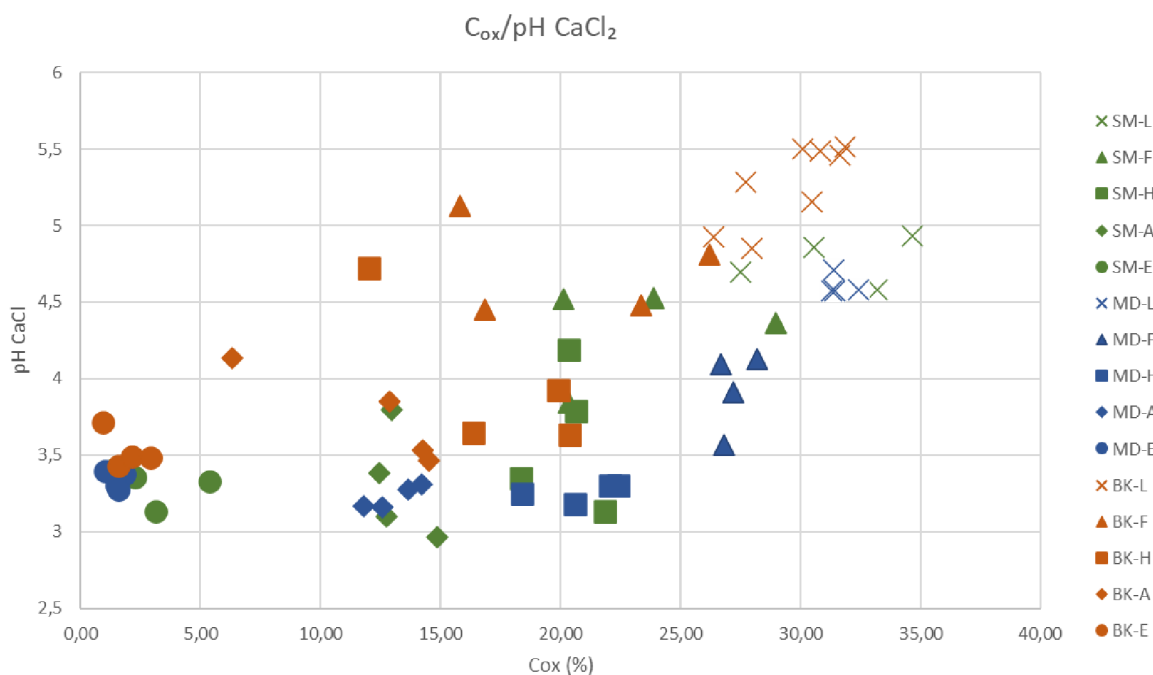
5 Zpracování výsledků

5.1 Obsah uhlíku v půdě a půdní reakce

Tab. 3: Obsahy organického uhlíku (C_{ox}) a hodnoty aktivního a výměnného pH (pH_{H_2O} , pH_{CaCl_2}), s popisnými charakteristikami: průměr ($\bar{\varnothing}$), směrodatná odchylka (SD) a variační koeficient (CV). Pro C_{ox} je $n=8$, kromě dřeviny MD, kdy je $n=4$. Zbylé charakteristiky byly zpracovány s $n=4$.

Dřevina	Horizont	$C_{ox} \bar{\varnothing}$	$C_{ox} SD$	$C_{ox} CV$	$pH_{H_2O} \bar{\varnothing}$	$pH_{H_2O} SD$	$pH_{H_2O} CV$	$pH_{CaCl_2} \bar{\varnothing}$	$pH_{CaCl_2} SD$	$pH_{CaCl_2} CV$
		%		%			%			%
SM	L	31,737	2,311	7,283	5,304	0,158	2,974	4,767	0,159	3,329
	F	23,958	2,976	12,423	4,915	0,282	5,730	4,314	0,324	7,503
	H	19,805	1,356	6,847	4,383	0,236	5,378	3,615	0,471	13,031
	A	12,031	1,754	14,577	4,084	0,205	5,030	3,310	0,367	11,085
	E	2,607	1,223	46,922	4,064	0,176	4,331	3,308	0,121	3,658
MD	L	31,634	0,522	1,649	5,189	0,268	5,168	4,608	0,065	1,420
	F	27,227	0,696	2,557	4,636	0,366	7,901	3,925	0,258	6,580
	H	20,873	1,827	8,751	4,040	0,093	2,307	3,259	0,056	1,731
	A	13,066	1,082	8,284	4,060	0,094	2,307	3,228	0,077	2,375
	E	1,488	0,345	23,206	4,024	0,107	2,663	3,336	0,059	1,781
BK	Ln	30,418	2,578	8,475	5,748	0,211	3,678	5,054	0,201	3,984
	Ls	26,393	4,082	15,465	6,171	0,036	0,579	5,490	0,022	0,403
	F	19,668	5,541	28,171	4,721	0,498	10,540	4,717	0,318	6,738
	H	17,027	4,124	24,223	4,330	0,152	3,516	3,981	0,512	12,864
	A	12,558	3,882	30,916	5,485	0,407	7,417	3,746	0,310	8,264
	E	1,903	0,562	29,505	4,552	0,365	8,020	3,532	0,125	3,528

Z tabulky (Tab. 3) je viditelný klesající trend u všech naměřených hodnot (C_{ox} i pH) směrem od organického horizontu po minerální. Nejvyšší variace je pod porosty SM v E horizontu, kdy je až dvojnásobná, oproti ostatním minerálním horizontům. V porostech BK je v horizontech L, F, H a A několikanásobně vyšší variační koeficient u C_{ox} . Dle tabulky 3 je u všech dřevin dle horizontů vysoký obsah organického uhlíku, kromě eluviálního horizontu (E), kde se pohybuje obsah C_{ox} od středního po vysoký. pH_{H_2O} u horizontů L je nejbližší k neutrálnímu pH, kdy pH Ls jediné přesahuje pH 6. S hloubkou půdy pH_{H_2O} klesá, s výjimkou horizontu Ls a A v porostu BK. Dle výsledků se pod porosty všech dřevin vyskytuje středně kyselá půda. Výměnné pH má shodný klesající trend v závislosti na hloubce, ale horizont Ls v porostu BK z trendu vybočuje a horizont A se trendu drží. U jehličnanů v A a H horizontech je až silně kyselá půda, jelikož hodnoty pH jsou okolo 3,3.



Obr. 10: Grafické znázornění dat z tabulky 3

Z grafu (Obr. 10) je viditelné, že u pH je možné pozorovat od horizontu E do horizontu H hodnoty na podobné úrovni a od F začínají stoupat. Nejvyšších hodnot pH ve všech horizontech dosahuje buk, což je možné i vidět v Tab. 3. Jehličnany dosahují nižších a vzájemně si podobných hodnot. Obsah C_{ox} stoupá od horizontu E až po nejsvrchnější L ve všech porostech. Jsou tedy viditelné rozdíly mezi dřevinami a horizonty. Jejich průkaznost byla testována za pomoci analýzy rozptylu (Tab. 4). Horizont E, který se od ostatních horizontů výrazně odlišuje hodnotami C_{ox} , nebyl do analýzy zahrnut, z důvodu splnění normality testovaného souboru.

Tab. 4: Výsledky vícecestné analýzy rozptylu, byla využita Scheffeho metoda a hladina významnosti je 95 %. Pro C_{ox} je $n=8$, kromě dřeviny MD, kdy je $n=4$. Zbylé charakteristiky byly zpracovány s $n=4$.

	C_{ox}		pH H ₂ O		pH CaCl ₂	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Horizont	49,533	0,000	52,248	0,000	63,681	0,000
Dřevina	7,225	0,002	25,182	0,000	21,810	0,000
L	a		a		a	
F	b		b		b	
H	c		c		c	
A	d		c		c	
SM	a		b		b	
MD	a		b		b	
BK	b		a		a	

Rozložení všech studovaných veličin (C_{ox} , pH_{H_2O} , pH_{CaCl}) v půdním prostředí je ovlivněno jak rozdílností jednotlivých horizontů, tak jednotlivých porostů. Průkaznost rozdílů dokládá tabulka 3. Je z ní patrné, že obsah uhlíku má klesající trend od nejsvrchnějšího horizontu L do nejhlubšího horizontu A. V bukových porostech je jeho koncentrace průkazně nižší než v jehličnatých porostech. Hodnoty obou typů pH mají klesající trend jen v organických horizontech a mezi humifikačním a organominerálním už hodnoty nejsou rozdílné. Buk dosahuje vyšších hodnot pH než jehličnaté dřeviny.

5.2 Sorpční komplex

Tab. 5: Hodnoty kationtové výměnné kapacity (KVK) a bazické saturace (BS), s popisnými charakteristikami: průměr ($\bar{}$), směrodatná odchylka (SD) a variační koeficient (CV). Kdy hodnoty byly spočteny z $n=4$.

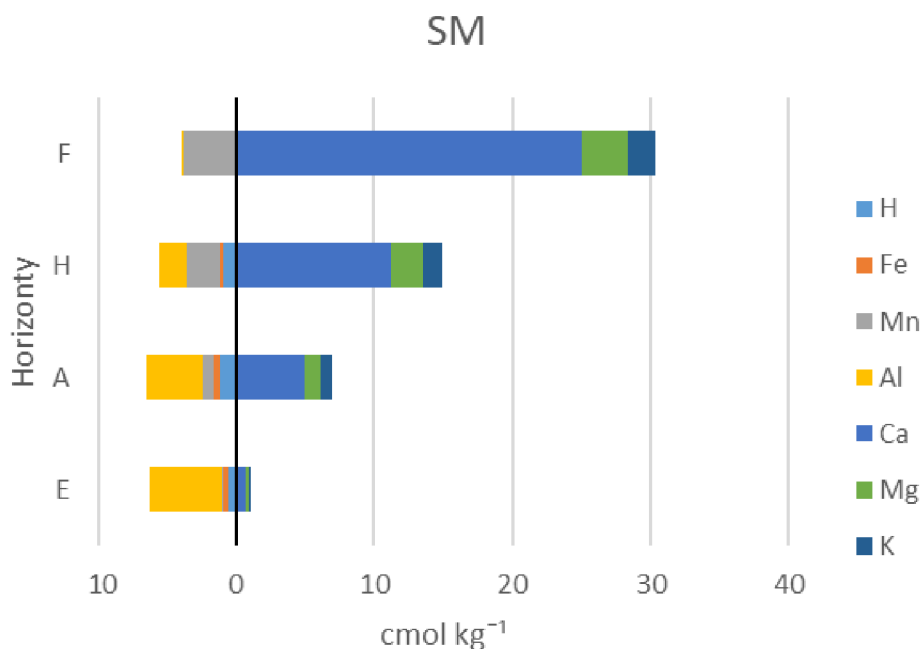
Dřevina	Horizont	KVK $\bar{}$	KVK SD	KVK CV	BS $\bar{}$	BS SD	BS CV
		cmol+kg ⁻¹			cmol+kg ⁻¹		
SM	F	34,139	7,785	22,803	89,016	1,106	1,243
	H	20,408	5,916	28,988	70,768	11,930	16,857
	A	13,474	2,129	15,804	49,680	20,298	40,857
	E	7,316	1,473	20,132	13,833	8,180	59,133
MD	F	34,719	3,624	10,439	77,911	3,080	3,953
	H	20,622	1,840	8,924	66,881	6,403	9,574
	A	13,271	1,109	8,354	49,577	4,401	8,878
	E	6,123	0,794	12,960	12,694	1,106	8,710
BK	F	36,320	11,331	31,197	88,786	13,152	14,813
	H	21,384	5,765	26,962	83,835	9,879	11,784
	A	13,680	1,929	14,104	74,137	11,868	16,008
	E	6,495	1,422	21,897	30,271	6,865	22,678

Základní parametry sorpčního komplexu půd ukazuje tabulka 5. U KVK jsou hodnoty pro všechny dřeviny v odpovídajících si horizontech téměř shodné. Hodnoty KVK v porostech SM a BK mají větší směrované odchylky a variační koeficienty než v porostu MD. BS pod porosty BK v horizontech A a E je mnohem vyšší než pod jehličnany. Vysoká směrodatná odchylka se vyskytuje u SM v A horizontu. Variační koeficient v horizontech A a E u SM je několikrát větší než u jiné dřeviny.

Tab. 6: Výsledky vícecestné analýzy rozptylu pro kationtovou výměnnou kapacitu (KVK) a bazickou saturaci (BS). Scheffeho metoda a hladina významnosti je 95 %. Charakteristiky byly zpracovány s n=4.

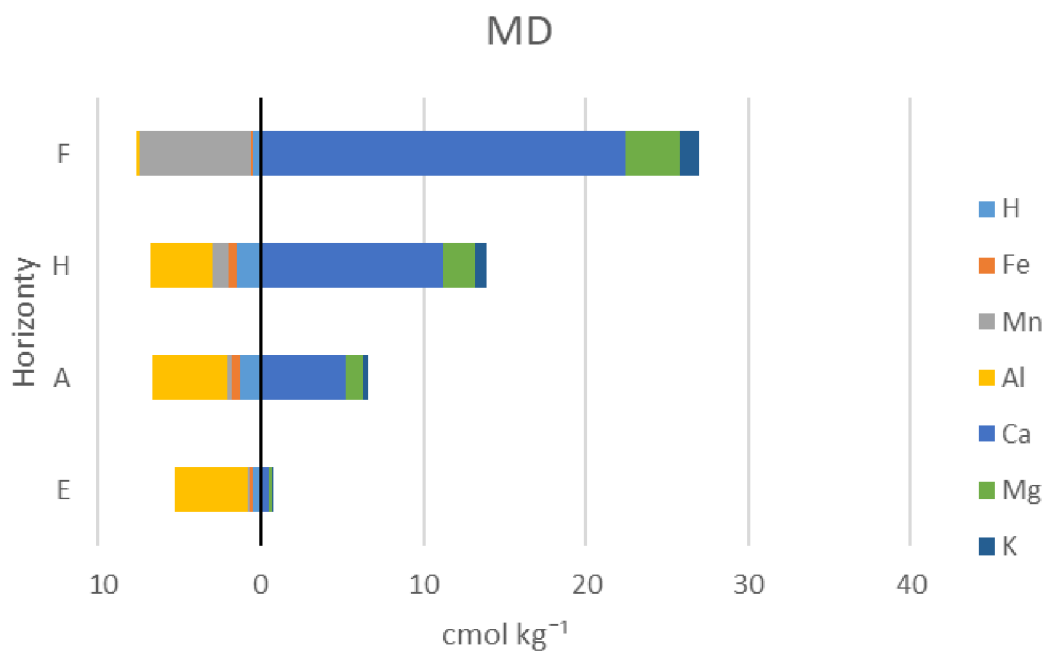
	KVK		BS	
	F	p-value	F	p-value
Horizont	65,905	0,000	19,553	0,000
Dřevina	0,067	0,935	9,368	0,001
F	a		a	
H	b		b	
A	c		c	
SM	a		b	
MD	a		b	
BK	a		a	

Z tabulky 6 je zřejmé, že analyzované veličiny (KVK, BS) v půdním prostředí jsou ovlivněny jak půdním horizontem tak porostem. U KVK nebyl zjištěn průkazný rozdíl mezi jednotlivými porosty. Hodnoty KVK i BS mají klesající trend směrem od fermentačního horizontu do organominerálního horizontu. Půdy pod porosty buku mají vyšší kationtovou výměnnou kapacitu než pod jehličnatými dřevinami.



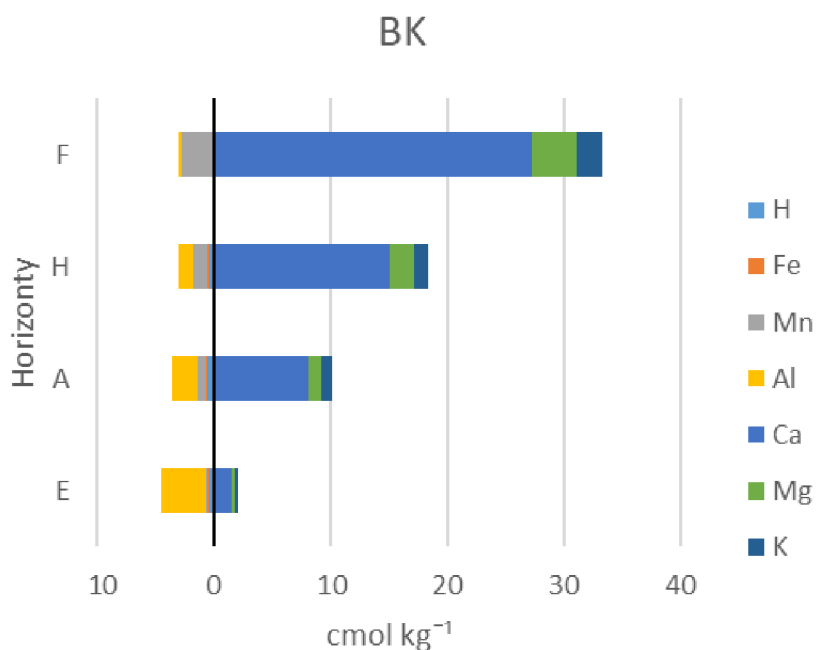
Obr. 11: Sorpční komplex půdy pro dřevinu – smrk ztepilý

Z grafu (Obr. 11) je viditelný trend u bazických kationtů, jejichž obsah v půdách pod smrkovým porostem klesá s hloubkou. Poměrné zastoupení jednotlivých bazických kationtů je ve všech horizontech podobné. Vápník tvoří většinový podíl, pak následuje hořčík a draslík. U kyselých kationtů je situace odlišná. V F horizontu převládá mangan, jehož obsah postupně klesá až v E není patrný, naopak hliník se v F téměř nevyskytuje, ale s hlubšími horizonty nabírá na zastoupení až v E převládá. V horizontech F a H převládají bazické kationty, v A jejich koncentrace odpovídá kyselým kationtům a v hlubších horizontech již kyselé převažují.



Obr. 12: Sorpční komplex půdy pro dřevinu – modřín opadavý

Z grafu (Obr. 12) vyplývá, že stejně jako u smrkových porostů, i v porostech modřínu můžeme vidět u koncentrací bazických kationtů klesající trend od F po E horizont. Poměrné zastoupení jednotlivých bazických kationtů je ve všech horizontech také podobné. Vápník rovněž tvoří většinový podíl a následuje jej hořčík a draslík. Suma kyselých kationtů vykazuje klesající trend směrem od svrchního horizontu F po horizont E, kdy v horizontu F převládá mangan a postupně k hlubším horizontům jeho obsah klesá. Hliník je naopak dominantní v horizontu E a v nejsvrchnějším horizontu je jeho množství mizivé. Vzájemný poměr bazických a kyselých kationtů se v profilu mění. Ve svrchních horizontech dominují bazické složky a v hlubších pak naopak kyselé.



Obr. 13: Sorpční komplex půdy pro dřevinu – buk lesní

Z grafu (Obr. 13) je v porostech buku viditelný trend v obsahu bazických kationtů, a to klesající od fermentačního po eluviální horizont. Stejně jako u předchozích dvou dřevin i zde vápník tvoří většinový podíl méně je zastoupen hořčík a pak draslík. U kyselých kationtů žádný trend patrný není. V horizontu F převládá mangan a hliníku je jen malé množství. Horizont H má podobné zastoupení manganu a hliníku. Od horizontu A už začíná převládat hliník s malým zastoupením dalších prvků a v horizontu E je již sorpční komplex z většiny nasycen hliníkem. Od horizontu F do A dominují v sorpčním komplexu bazické kationty. V horizontu E již dominují ionty kyselé.

Tab. 7: Výsledky vícecestné analýzy rozptylu pro bazické kationty a výměnou aciditu. Scheffeho metoda a hladina významnosti je 95 %. Charakteristiky byly zpracovány s n=4.

	BC		EA	
	F	p-value	F	p-value
Horizont	146,009	0,000	0,411	0,746
Dřevina	4,306	0,020	16,877	0,000
F	a		a	
H	b		a	
A	c		a	
E	d		a	
SM	ab		a	
MD	b		a	
BK	a		b	

Z tabulky 7 vyplývá, že zastoupení bazických kationtů je ovlivněné jak jednotlivými horizonty, tak i jednotlivými dřevinami. U horizontů je viditelný klesající trend od nejsvrchnějšího F po nejnižší E. Buk vychází nejlépe se zastoupením bazických kationtů, následuje smrk a nejhůře na tom je modřín. U výměnné acidity byl prokázán jen vliv dřevin na studovanou veličinu, kdy jehličnany vykazují vyšší hodnoty než buk.

5.3 Zásoby živin

Tab. 8: Objemové hmotnosti pro jednotlivé dřeviny z eluviálního horizontu. Statistické metody jsou zde zastoupeny průměrem (\bar{x}), směrodatnou odchylkou (SD) a variačním koeficientem (CV). Průměrné hodnoty byly získány z n=8.

Dřevina	Objemová hmotnost \bar{x} g/cm ³	ρ SD	ρ CV %
BK	1,326	0,205	15,440
SM	1,192	0,133	11,150
MD	1,337	0,089	6,633

V tabulce (Tab.8) je možné vidět objemové hmotnosti, které byly důležité pro výpočet zásob v eluviálním horizontu. Buk a modřín mají skoro shodnou objemovou hmotnost. U buku je největší variabilita hodnot. U smrku byla zjištěna nižší objemová hmotnost.

Tab. 9: Hmotnosti půdy pro jednotlivé horizonty. Statistické metody jsou zde zastoupeny průměrem (\bar{x}), směrodatnou odchylkou (SD) a variačním koeficientem (CV). Průměrné hodnoty byly získány u F, H, A a E z n=20, u L je n= 7, Ln je tvořeno n=8 a Ls n=7.

Horizont	Hmotnost půdy \bar{x} kg/m ²	Hmotnost půdy SD	Hmotnost půdy CV %
L	0,77	0,39	50,69
Ls	0,37	0,05	13,06
Ln	0,50	0,18	35,10
F	3,31	3,82	115,21
H	2,50	2,19	87,60
A	9,28	7,27	78,34
E	322,20	43,24	13,42

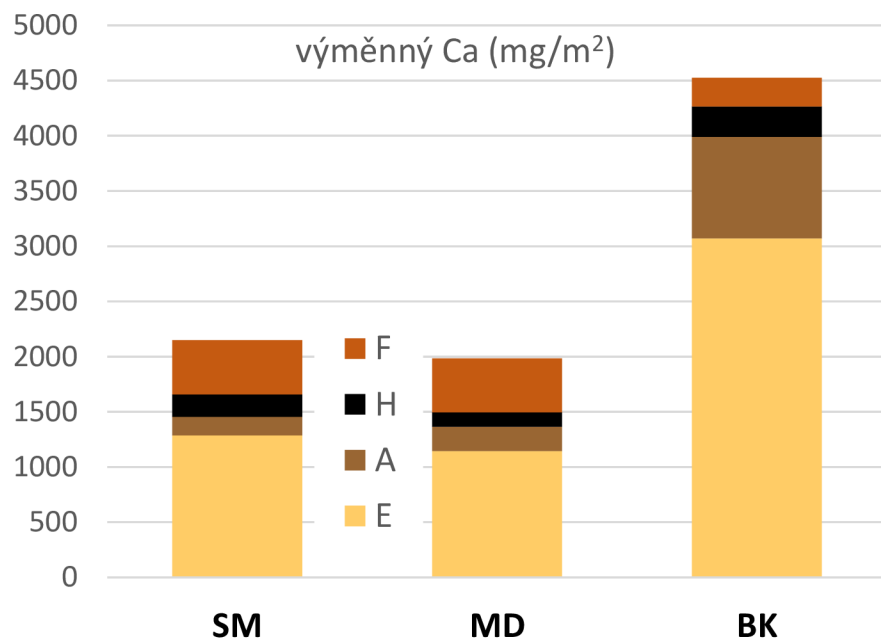
Z tabulky (Tab. 9) je patrné, že hmotnosti pro jednotlivé horizonty jsou různé. Tato získaná data (pomocí rámečků a Kopeckého válečku), byla důležitá pro výpočet zásob v jednotlivých horizontech. Nejvyšší hmotnost je u horizontu E, která je až 34,6x vyšší než má A horizont, který má druhou nejvyšší hmotnost. Nejnižší hmotnosti jsou u L, kdy L je pro jehličnany a Ln a Ls je pro buk (sečtením Ln a Ls vznikne L). Je možné vidět vysoké variability u L, F, H a A. Tato vysoká variabilita se dále projevuje v další tabulce (Tab. 10), kdy zásoby prvků mají vysoké variační koeficienty.

Tab. 10: Zásoby prvků vztažené na plochu (mg/m^2). Byla vytvořena pro vápník, hořčík, draslík a uhlík. Statistické metody jsou zde zastoupeny průměrem (\emptyset), směrodatnou odchylkou (SD) a variačním koeficientem (CV). Tabulka má dělení dle dřevin a horizontů. Každý horizont má uvedenou průměrnou mocnost. Průměr pro mocnost byl vytvořen z $n=8$ a zásoby prvků z $n=4$, kromě uhlíku $n=8$.

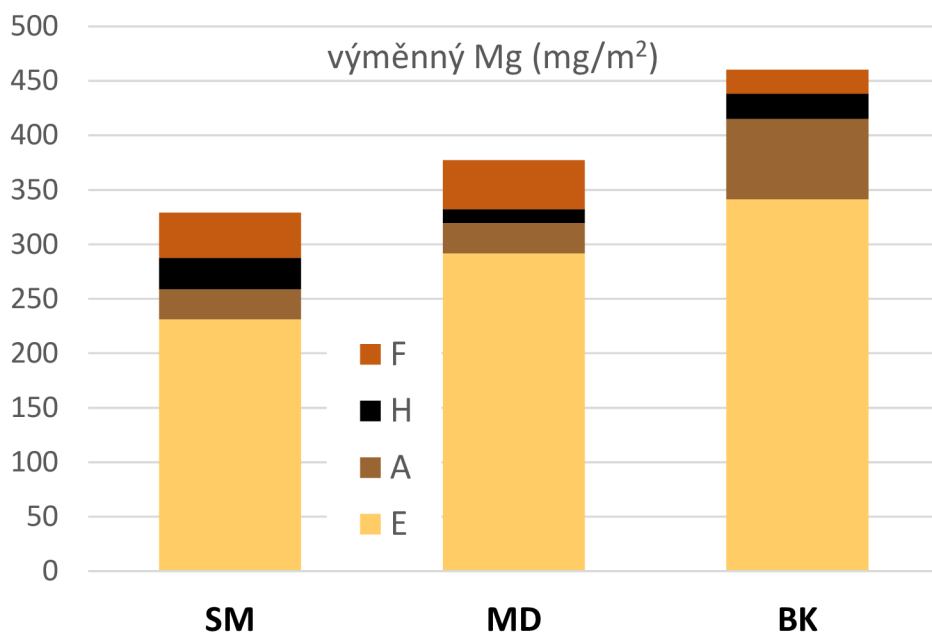
Dřevina	Horizont	Hloubka H. \emptyset	Ca \emptyset	Ca SD	Ca CV	Mg \emptyset	Mg SD	Mg CV	K \emptyset	K SD	K CV	C \emptyset	C SD	C CV
			mg/m^2		%	mg/m^2		%	mg/m^2		%	g/m^2		%
SM	L	0,6										264	126,1	47,9
	F	1,5	490,5	190,7	38,9	41,5	26,3	63,3	77,2	33,0	42,8	1086	1341,5	123,5
	H	1,3	204,2	91,6	44,9	28,9	20,0	69,2	75,3	86,3	114,5	651	599,0	92,0
	A	1,3	168,7	115,2	68,3	27,6	12,1	43,8	64,5	29,0	44,9	661	329,3	49,8
	E	25,0	1285,0	1022,6	79,6	231,1	82,6	35,8	445,9	178,9	40,1	7478	2482,6	33,2
	L-E	do 30	2148,3			329,1			662,9			10139,5		
MD	L	0,6										204	111,4	54,7
	F	1,9	488,0	296,9	60,8	44,8	26,4	59,0	48,9	27,7	56,7	1107	313,4	28,3
	H	0,8	133,0	97,3	73,2	12,7	8,2	64,6	13,9	9,1	65,4	490	253,8	51,8
	A	1,9	219,5	93,0	42,4	27,8	14,8	53,4	27,3	12,5	45,8	1148	491,1	42,8
	E	25,0	1143,5	148,7	13,0	291,8	76,7	26,3	378,5	224,4	59,3	5217	1108,7	21,3
	L-E	do 30	1983,9			377,2			468,7			8165,3		
BK	Ln	0,9										113	15,6	13,8
	Ls	0,5										131	51,8	39,4
	F	1,1	260,6	145,2	55,7	21,9	10,7	48,8	42,5	20,2	47,5	377	372,9	99,0
	H	0,5	273,3	255,4	93,4	23,1	22,7	98,3	43,2	37,2	86,1	347	402,5	116,0
	A	2,6	920,5	614,2	66,7	73,9	30,6	41,4	174,0	65,4	37,6	1531	667,7	43,6
	E	25,0	3070,1	979,8	31,9	341,4	106,2	31,1	1144,9	272,4	23,8	6155	1430,6	23,2
	L-E	do 30	4524,5			460,3			1404,6			8654,1		

Z tabulky (Tab. 10) je patrné, že všechny horizonty E mají několikrát vyšší hodnoty než jiné horizonty, to je způsobeno mocností tohoto horizontu. Směrodatné odchylky a variační koeficienty jsou pro všechna data v tabulce vysoké, průměrné CV pro celou tabulku je 55 %. Nejnižší variační koeficient (13 %) je u modřínu v eluviálním horizontu v zásobách vápníku a nejvyšší (124 %) má smrk ve fermentačním horizontu v zásobách uhlíku. Zásoba vápníku (Obr. 14) v sorpčním komplexu půd pod porosty SM vykazuje klesající trend od F po A, ale u buku můžeme sledovat opačný stoupající trend od F po E, modřín žádný trend nevykazuje. Buk v má v horizontu A skoro až pětkrát vyšší zásoby vápníku než jehličnany, to samé je i u E, kdy hodnota buku je skoro třikrát vyšší než u jehličnanů. Jehličnany naopak mají 1,9x vyšší zásobu vápníku v horizontu F. Zásoby hořčíku (Obr. 15) ukazují stejné trendy jako u vápníku. Modřín má v horizontu H až dvakrát nižší množství hořčíku než smrk a buk. Jehličnany opět mají

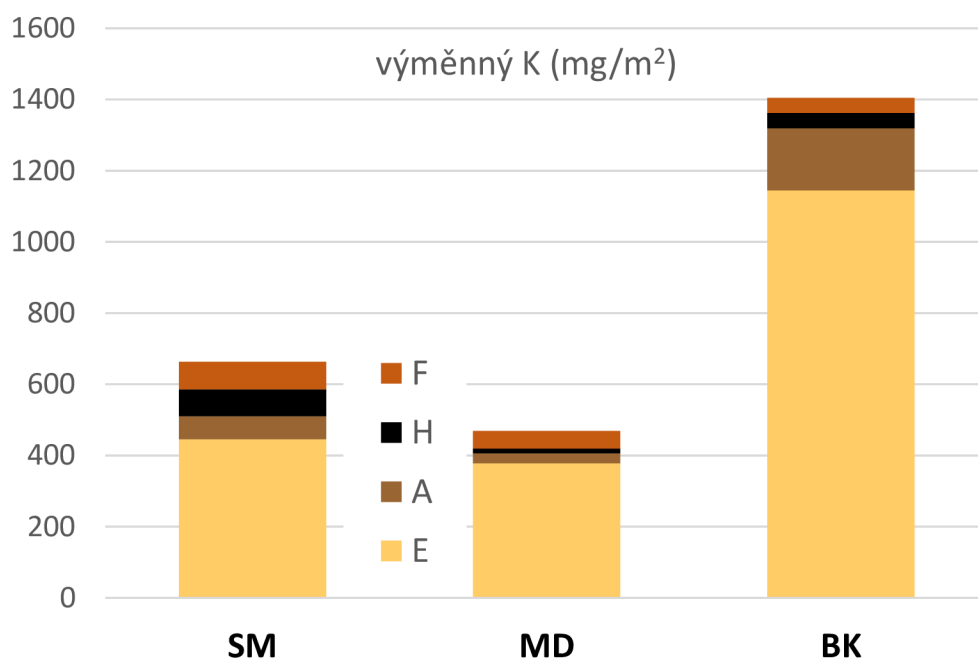
dvojnásobek zásob v horizontu F. Buk dominuje v A, kdy má až 2,6x víc hořčíku než jehličnany. U draslíku (Obr. 16) dřeviny mají stejné trendy jako u předchozích zásob. Smrk vykazuje nejvyšší zásoby v horizontu F a H. Modřín u zásob draslíku vykazuje nejnižší hodnoty a buk má nejvíce v A a E, kdy hodnoty jsou několikrát vyšší. Dřeviny u zásob uhlíku (Obr. 17) nevykazují žádné trendy. V horizontu F mají jehličnany až třikrát vyšší zásobu uhlíku. Smrk má v horizontu A dvakrát až skoro třikrát nižší množství uhlíku než buk a modřín. V celkových zásobách vápníku, hořčíku a draslíku do 30 cm dominuje porost buku. U vápníku má až dvakrát větší obsah než jehličnany a v zásobě draslíku dosahuje až 2-3x vyšší koncentrace. Smrk má nejvyšší zásobu uhlíku po sečtení všech horizontů o cca 20 %.



Obr. 14: Zásoby vápníku dle horizontů a dřevin



Obr. 15: Zásoby hořčíku dle horizontů a dřevin

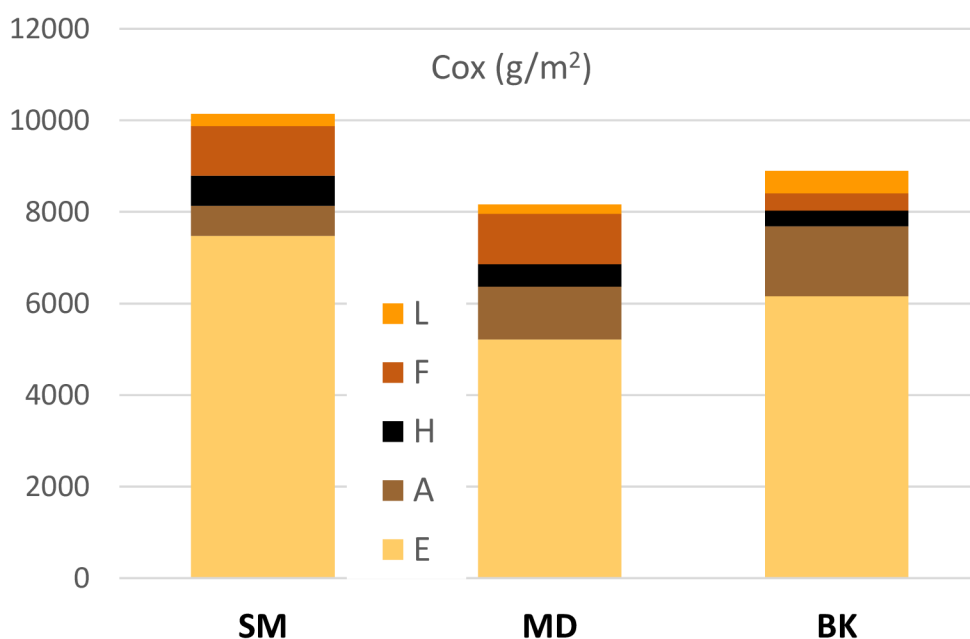


Obr. 16: Zásoby draslíku dle horizontů a dřevin

Tab. 11: Tabulka byla zhotovena pro zjištění vlivu dřevin a horizontů na zásoby živin. Je využita vícecestná analýza rozptylu, byla využita Scheffeho metoda a hladina významnosti je 95 %. Zásoby Ca, Mg a K jsou z n=4

	Zas. Ca		Zas. Mg		Zas. K	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Horizont	3,404	0,047	3,038	0,063	3,666	0,038
Dřevina	0,493	0,615	0,317	0,731	6,427	0,005
F	a		a		a	
H	b		a		a	
A	ab		a		a	
SM	a		a		a	
MD	a		a		b	
BK	a		a		a	

Tabulka 11 ukazuje výsledky dvoucestné analýzy rozptylu pro zásoby prvků v sorpčním komplexu, ze které stejně jako v případě koncentrací byly vyřazeny horizonty E, aby byla splněna podmínka normality dat. Zásoby vápníku se liší mezi jednotlivými horizonty, ale mezi porosty jednotlivých dřevin nebyl zjištěn rozdíl. Největší hodnoty jsou v horizontu F díky jehličnanům a v A díky buku, ale zároveň je horizont A hodně ponížen jehličnany, což je viditelné v Tab. 8. U zásob hořčíku nebyl nalezen vliv žádného z faktorů. Zásoba draslíku je ovlivněna jak jednotlivými dřevinami, tak i horizonty. Scheffeho test ale neukázal rozdílnost jednotlivých horizontů. Modřín má nižší zásobu výměnného draslíku než smrk a buk.



Obr. 17: Zásoba uhlíku dle horizontů a dřevin

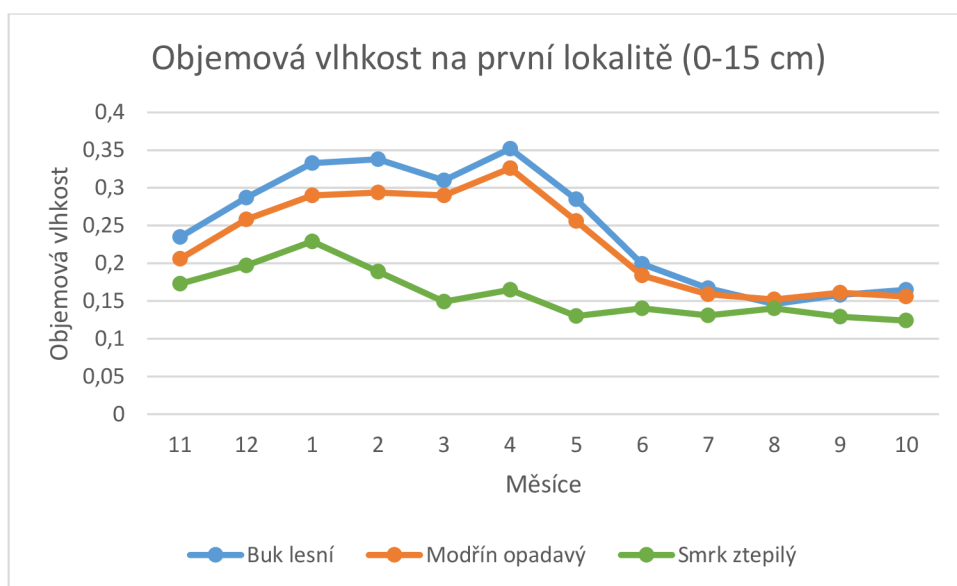
Tab. 12: Výsledky vícecestné analýzy rozptylu, byla využita Scheffeho metoda a hladina významnosti je 95 %. Zásoba uhlíku je vytvořena z n=8, kromě MD n=4.

	Zas. C	
	F	p-value
Horizont	11,412	0,000
Dřevina	1,601	0,209
L	c	
F	ab	
H	bc	
A	a	
SM	a	
MD	a	
BK	a	

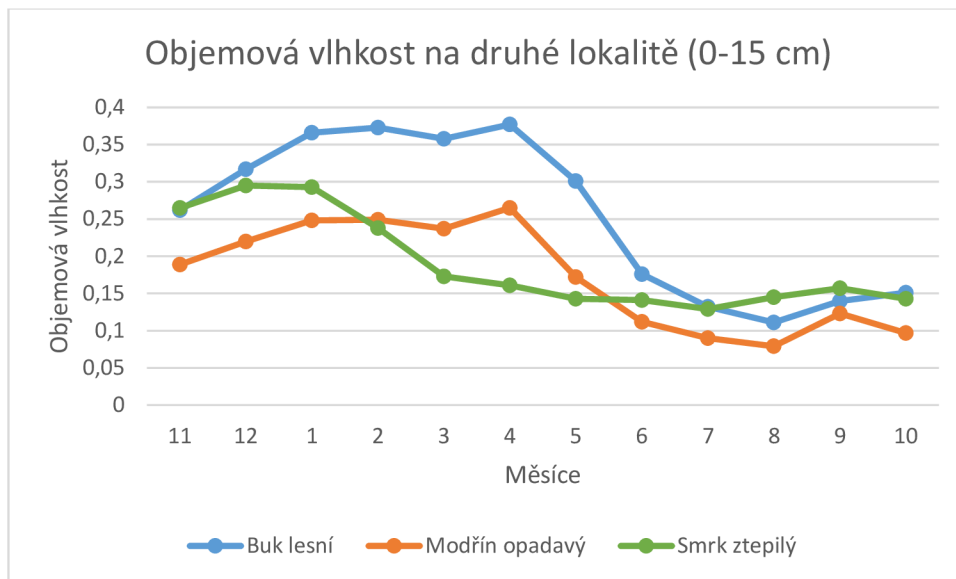
Zásoby uhlíku jsou ovlivněny jen jednotlivými horizonty (tab. 12). Nevyšší hodnoty dosahuje horizont A díky velkým zásobám uhlíku pod bukovými porosty. V horizontu F jsou zásoby uhlíku rovněž vysoké, a to především díky jehličnanům. Nejmenší zásoba uhlíku je v L horizontu. Zásoby uhlíku ve všech horizontech včetně horizontu E jsou viditelné na Obr. 17.

6 Diskuse

Lesní ekosystémy jsou spojeny s půdou jinak než ostatní ekosystémy. Stromy mají klíčový vliv na interakci biosféry s atmosférou. Ovlivňují koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, tok energie na povrchu půdy, hydrologický cyklus a biochemický cyklus. Vliv stromů na okolní prostředí je složitý a závisí na druhu stromů, hustotě lesa, habitus stromů a vnějších stresorech (Levia a kol., 2017). Schopnost stromů ovlivňovat propustnost půdy závisí struktury kořenů, zejména na jejich hloubce a rozložení, což ovlivňuje další vlastnosti půdy, jako je její pórovitost, obsah organické hmoty a biomasy (Chen a kol., 2013). Lesy se liší množstvím živin v opadu a rychlostí jeho rozkladu; například modřín, smrk a borovice mají opad s nízkým obsahem živin a jsou považovány za stromy s kyselým těžko rozložitelným opadem. Naopak opad listnatých stromů, jako jsou duby, buky a lípy, je bohatší na živiny, protože tyto stromy extrahují z hlubších vrstev půdy minerály, které pak transportují do listů a následně se z nich vytvoří opad bohatý na živiny (Vavříček & Kučera, 2017).



Obr. 18: Objemové vlhkosti z prvního stanoviště na zájmovém území Amálie z roku hydrologický rok 2022



Obr. 19: Objemové vlhkosti z druhého stanoviště na zájmovém území Amálie z roku hydrologický rok 2022

Grafy (Obr. 18, 19) vznikly z dat poskytnutých doktorem Lukášem Jačkou z FŽP, který se svým týmem má na lokalitě rozmístěné vlhkostní senzory. Z těchto grafů můžeme vidět hodnoty vlhkostí půdy pod zájmovými dřevinami v hloubce 0-15 cm za hydrologický rok 2022. Z obou grafů můžeme vidět, že pod smrkovými porosty je nižší vlhkost než pod modřínem a bukem, ale smrk má stabilnější vlhkost po celý rok. Buk a modřín mají stejné tvary křivek, tím tedy v půdě pod těmito dřevinami probíhaly stejné vlhkostní změny. Bukové porosty ale po mnoho měsíců měly vyšší objemovou vlhkost než porosty modřínů. Z těchto grafů můžeme tedy soudit, že vlhkostní poměry u buku a modřínu jsou podobné. Příčinou může být odlišnost v hustotě korun stromů v průběhu roku, kdy smrk jako neopadavá dřevina ji má trvale vysokou, zatímco u opadavých dřevin tato hustota a propustnost korun pro vodu v zimních obdobích značně klesá. O distribuci srážek korunami stromů pojednává Staelens a kol. Během vegetačního období ve střední Evropě dosahují srážky, které projdou korunami stromů v bukových porostech přibližně 65 %, stemflow 5 % a zbývajících 30 % tvoří intercepce (Staelens a kol., 2008). U smíšeného lesa s převahou buku a dubu dosahuje propad korunami 76,3 %, stemflow 2,6 % a intercepce 21,2 %. Množství vody, které se dostane korunou stromu do půdy bez zachycení či stemflow, se může lišit pro různé intenzity deště, to platí i pro stemflow. Studie z Belgie prokázala, že množství propadlých srážek korunou ve vegetačním období nepřesahuje 12 % a stemflow nepřesahuje 8 % u srážek do 5 mm (Staelens a kol., 2006). Jeden z cílů této práce bylo zjistit, zda odlišná distribuce vody dřevinami nepřímo ovlivňuje chemismus půdy. Původní předpoklad se opíral o základní mechanismus promývání

půd a jejich acidifikace. Tedy o to, že čím větší množství vody se dostane do půdního profilu a proteče jím směrem do hloubky, tím více je půda ochuzována o bazické složky a tedy okyselována (Pavlu a kol., 2021). Porosty smrku na této lokalitě zachytí značné množství srážek svými korunami a zde se i významná část pravděpodobně i odpaří a do půdy se vůbec nedostane. Proto je vlhkost půdy pod smrky nižší. Podle těchto grafů (Obr. 18, 19) by tedy chemismus půdy měl být podobně ovlivňován u porostů modřínu a buku. Ale z výsledků této práce vychází vyšší podobnost chemických vlastností půd pod smrkem a modřínem. Tím tedy můžeme říci, že odlišná distribuce vody u dřevin nemá na chemismus půdy takový vliv jako kvalitativní složení opadu dřeviny ovlivňující například pH půdy. V dlouhodobějším časovém horizontu a nově získaných datech by se mohla odlišná distribuce vody dřevinami více projevit na chemismu půdy. Je totiž třeba zohlednit i relativně nízké stáří studovaných porostů.

Nízké pH v lesních půdách má významný vliv na dostupnost živin v půdě. Půdní prostředí s nízkým pH má nižší mikrobiální aktivitu a tím je oslabena dekompozice opadu. Živiny se tak hůře uvolňují do půdního roztoku a akumulují se v humusovém horizontu. Taktéž se zhoršuje dostupnost některých živin, jako je fosfor, vápník, hořčík a draslík, což může mít negativní dopad na růst dřevin. Což je způsobeno vyšší rozpustností například hliníku a manganu, které pak mohou na sebe vázat zmíněné živiny a tím snížit jejich dostupnost pro dřeviny (Rengel, 2003). Acidifikace dále způsobuje uvolňování potenciálně toxických forem hliníku, které mohou omezit rozvoj kořenového systému. pH půdy je tedy klíčovým faktorem ovlivňujícím vstřebávání a dostupnost živin pro rostliny v lesních ekosystémech (Lundström a kol., 2000). Tyto faktory tedy mohou i vypovídat o výsledcích této diplomové práce, kdy pod bukovým porostem je vyšší pH a má vyšší zásoby živin v půdě. Z grafů (Obr. 11-13) je i viditelné, že pod jehličnany jsou větší množství hliníku a manganu než pod bukem.

Na zájmové lokalitě byly sledovány podmínky u smrku ztepilého, modřínu opadavého a buku lesního. Každá tato dřevina má jiné ekologické nároky. Smrk je v mládí přizpůsobený polostinnému prostředí, ale s věkem se stává světlomilnější dřevinou. Kvůli mělkému kořenovému systému má smrk vyšší nároky na dostupnost vody v horní vrstvě půdy. Co se týče půdních a geologických podmínek, preferuje kyselé stanoviště. Dřevina smrk významně ovlivňuje vlastnosti půdy, zejména tvorbou surového humusu. Při nedostatku vlhkosti se zesiluje tvorba surového humusu, což vede k ochuzení půdního prostředí a nedostatku vápníku. (Slavík a Bažant, 2016). Jsou zde zmíněné nároky smrku na vodu, a můžeme pozorovat z grafů (viz. Obr. 18 a 19), že vlhkost pod porosty je nízká, což je pro smrkové

porosty limitující. Při návštěvě zájmového území byl vidět špatný stav smrků, ať už z pohledu zdravotního, ale i růstového. Na svůj věk jsou porosty nízké a přeštíhlené, což může být způsobeno i pěstebními zásahy. Modřín je náročná dřevina na světlo, trpí na zástín. Modřínu nevyhovují vysychavé půdy a oblasti s nižšími srážkami. Preferuje hlubší a živnější půdy, ale je schopen i růst na suťových svazích, mělkých půdách s dostatkem vláhy. Dobře snáší teplotní extrémy (Slavík a Bažant, 2016). Podle ekologických nároků by ani pro modřín nebylo toto stanoviště zcela vhodné, přesto bylo zjevné při návštěvě porostů, že jsou modříny v dobrém stavu. Buk je dřevinou preferující stín. Má střední nároky na vláhu a nedokáže dobře přežít v extrémně suchých nebo přemokřených půdách. Nesnáší zvýšenou hladinu podzemní vody do blízkosti povrchu půdy. Vyhýbá se suchým pískům, těžkým nepropustným jílům, rašelinám a bažinám (Úradníček a Chmelař, 1998). Pro buk na tomto stanovišti by neměly být žádné limitující faktory, vzhledem k jeho náročnosti na půdní prostředí. Z celkového pohledu na lesní porosty by se na tomto stanovišti neměly vyskytovat smrky, ale monokultury dřevin jsou zde na Amálii i za účelem poznání a výzkumů.

Z výsledků práce můžeme usoudit, že zásoby živin mezi jednotlivými horizonty a jednotlivými dřevinami jsou rozdílné. V této práci byly sledovány tři živiny vápník, hořčík a draslík. Rozdíly mezi horizonty jsou viditelné (Tab. 10), kdy velkou roli hraje mocnost horizontu a ten je u každé dřeviny jiný. Zároveň zde bude hrát roli i opad ze dřevin, jelikož jehličnany mají opad hůře rozkladatelný a tím se živiny drží ve nejsvrchnějších vrstvách, naopak buk má lépe rozložitelný opad a látky se mohou snáze dostat do půdního prostředí. Po sečtení výsledků v každém horizontu získáme pohled na celkové zásoby prvků do 30 cm a z toho vyplývá, že je na tom nejlépe buk. Z toho tedy můžeme usoudit, že buk má pozitivní vliv na půdní prostředí, a to potvrzuje postavení buku jako ideální příměs do smrkových porostů (MZD-melioračně zpevňující dřevina). O tomto postavení buku vypovídá i zjištěné pH pod jednotlivými porosty. Pod jehličnatými dřevinami je oproti bukovým porostům kyselější půdní prostředí. S tím jsou spojeny nižší obsahy bazických kationtů v sorpčním komplexu a vyšší výměnná acidita (Obr. 11-13 Na grafech je dobře vidět větší množství hliníku na straně kyselých složek sorpčního komplexu u jehličnanů, což je dokumentováno i v řadě prací zabývajících se vlivem dřevin na distribuci Al v půdním prostředí (Pavlů a kol., 2018, Borůvka a kol., 2007). Tato data poukazují na negativní působení smrku a modřínu na půdní prostředí, ale v lesním hospodářství jsou to velice důležité dřeviny, hlavně smrk jakožto hlavní hospodářská dřevina. Tím tedy tato práce nepoukazuje na vynechání těchto dřevin z lesního

hospodářství, ale určitě je zapotřebí tvořit smíšené lesy, aby i půdní prostředí bylo v dobrém stavu a mohly na něm růst další generace kvalitních lesů.

Remeš a kol. se zabývali zpracováním potěžebních zbytků a jejich vlivem na chemické vlastnosti půdy u přirozených borů. Jejich výsledky ukázaly, že ponechání potěžebních zbytků za úpravy pálení nebo drcení má vliv na půdní prostředí. Výsledkem jsou vyšší obsahy bází a vyšší nasycenost sorpčního komplexu (Remeš a kol., 2015). Tento výsledek je možností do budoucna, jak zlepšit půdu pro budoucí generace stromů a zároveň udržet lesní půdu v dobrém stavu. Zároveň zmiňují, že obsahy důležitých prvků (N, P, K) jsou nejnižší v kmenu stromu a vyšší hodnoty obsahu jsou ve dřevě větví, v kůře, kořenech a asimilačních orgánech, tedy právě v potěžebních zbytcích (Remeš a kol., 2015). Z toho hlediska i pro dodání živin opět do půdy by bylo dobré ponechat potěžební zbytky na vytěžené lokalitě.

Lesní půdy se liší od zemědělsky využívaných půd svým způsobem koloběhu živin. V zemědělských půdách je koloběh živin silně ovlivněn lidským zásahem, který do půdy přináší živiny. Naopak lesní půdy jsou charakterizovány odlišným uzavřeným koloběhem živin, kde dřeviny obohacují půdu opadem a po odumření se i veškeré živiny poutané v jejich biomase vrací zpět do půdy. (Vavříček & Kučera, 2017). V hospodářských lesích se uzavřenost koloběhu může lišit podle způsobu hospodaření. Liší se holosečná, násečná, podrostní nebo výběrová metoda. Nejhorší pro koloběh živin bývá holosečná metoda, kdy se odstraní většina biomasy najednou, což mění mikroklima i podmínky pro půdu. Nejlepší metodou z pohledu koloběhu živin je výběrová a podrostní, protože umožňují postupné odtěžování dřevin a tvorbu víceetážových porostů.

Množství organického uhlíku v hlubších vrstvách půdního profilu je ovlivňováno několika vzájemně provázanými procesy. Kořeny hrají klíčovou roli při dodávání uhlíku a propojují půdu s atmosférou, zajišťují rovnoměrné rozložení zdrojů pro biotu a podporují transport vody, živin a plynů (Hinsinger a kol., 2009). Podle tohoto tvrzení bude velmi zásadní, jak má dřevina vyvinutý kořenový systém. Dřeviny ovlivňují ukládání uhlíku v ekosystémech různými způsoby. Jehličnaté stromy s mělkými kořeny mají tendenci hromadit půdní organickou hmotu v povrchových vrstvách, avšak méně v hlubších minerálních vrstvách ve srovnání s listnatými stromy. (Jandl a kol., 2007). Data v této práci se shodují s tímto tvrzením, kdy smrk má mělký kořenový systém a má o cca 20 % více zásob organického uhlíku do 30 cm půdy než modřín a buk, jež mají hlubší kořenové systémy.

Berger a kol. se zabývali koloběhem živin mezi lesem a půdním prostředím v čistých smrkových a bukových monokulturách a smíšených lesích na lokalitách na flyši a molase. Na flyšových podložích se nacházely půdní typy pseudoglej s humusovou formou mul (bukové a smíšené porosty) a přechod mezi formou mul a moder (monokultury smrku). V jejich experimentu jsou výsledky definovány v půdním profilu pro hloubku od 0 do 10 cm. V jejich výsledcích na flyši vychází zásoby vápníku pro smrk – 29,7 g/m², smíšený - 41,8 g/m², buk – 55,5 g/m². Zásoby hořčíku jsou pro smrk – 2,8 g/m², smíšené - 3,4 g/m², buk - 4,9 g/m² a zásoby draslíku jim vychází smrk – 12,9 g/m², smíšené – 11,8 g/m², buk – 18,9 g/m² (Berger a kol., 2009). Dle jejich výsledků je jednoznačné, že pod bukovým porostem se v půdě nachází větší zásoby makroživin než pod smrkovými monokulturami. I když jejich lokality jsou na jiném podloží a mají jiný půdní typ, tak výsledky ukazují to samé, co tato diplomová práce. Z toho tedy můžeme usoudit, že dřeviny mají velký vliv na utváření zásob živin v půdním prostředí.

7 Závěr

Výsledky práce ukázaly, že půdní reakce pod jehličnany (smrkem a modřínem) je kyselější než pod bukovým porostem. Tomu odpovídají i výsledky bazické saturace, která dosahuje vyšších hodnot pod porosty buku. Můžeme tedy zhodnotit, že se zde projevuje vliv dřevin na půdní prostředí konkrétně na pH poměr bazických a kyselých kationtů v sorpčním komplexu.

První hypotéza práce byla, že celková zásoba živin je pod porosty obdobná, liší se ale distribuce živin mezi jednotlivými půdními horizonty. Z výsledků je patrné, že se nejvyšší zásoby uhlíku (do hloubky 30 cm půdního profilu) nacházejí pod porosty smrku, ale statisticky průkazně se neliší distribuce zásob mezi jednotlivými horizonty (L, F, H a A). Zásoby výměnné formy prvků Ca, Mg a K do hloubky 30 cm jsou nejvyšší pod porosty buku. Statisticky průkazná je ovšem pouze nižší zásoba K pod porosty modřínu v horizontech F, H a A. I když je patrná větší akumulace živin v horizontech F u jehličnanů a v horizontech A a E u buku, nebyly tyto rozdíly statisticky prokázány především díky obecně vysoké variabilitě dat. Tím tedy nelze tuto hypotézu potvrdit.

V druhé hypotéze bylo řečeno, že porost ovlivňuje chemismus půdy přímo prostřednictvím chemických vlastností opadu a nepřímo prostřednictvím odlišné distribuce vody v půdních horizontech. Druh porostu ovlivňuje přímo chemismus půdy svým opadem, tuto část hypotézy můžeme potvrdit, jelikož výsledky u buku vykazují příznivější (vyšší) hodnoty půdní reakce a nasycenosti sorpčního komplexu bázemi než oba jehličnaté porosty. Nepřímý vliv odlišné distribuce vody z výsledků patrný nebyl. Různá distribuce vody pod dřevinami a její vliv na chemismus půdy není pravděpodobně tak intenzivní jako vliv chemického složení opadu a případně hloubky prokořenění, což může být způsobeno i relativně nízkým stářím porostů.

Celkově lze konstatovat, že druh dřeviny má významný vliv na chemické vlastnosti půdy a zásoby živin v lesních ekosystémech. Tyto poznatky jsou důležité pro správné řízení lesních ekosystémů s ohledem na udržitelnost a ochranu půdního prostředí. Další výzkum by mohl směřovat ke komplexnějšímu zkoumání interakcí mezi dřevinami, půdními vlastnostmi, distribucí vody a živinami s cílem optimalizovat management lesních ekosystémů.

8 Zdroje

- Bažant V., Slavík M., 2016: Dřevařská dendrologie I. Dřeviny nahosemenné—Gymnospermophytae. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 107 s
- Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G. R., Hill, J., Whiting, M. L., and Sommer, S., 2009: Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote sensing of environment* 113. S. 38-55.
- Berger. W. T., Inselsbacher E., Mutsch F., Pfeffer M., 2009: Nutrient cycling and soil leaching in eighteen pure and mixed stands of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management* 258, S 2578-2592
- Bernard-Reversat F., Bottinelli N., Jouquet P., Orange, D., Podwojewski P., Rouland-Lefèvre C., Tran Duc T., 2007: Influence of changes in land use and earthworm activities on carbon and nitrogen dynamics in a steep land ecosystem in Northern Vietnam. *Biology and Fertility of Soils* 44, S. 69-77
- Blatt H., Middleton G., Murray R., 1972: Origin of sedimentary rocks. Prentice-Hall, Incy Englewood Cliff, New Jersey, S. 217-254
- Borůvka, L., Mládková, L., Penížek, V., Drábek, O., Vašát, R. 2007: Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. *Geoderma* 140, S 374–382.
- Bradshaw A. 1997: Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecological Engineering* 8, S. 255-269
- Canadell J., Jackson B. R., Ehleringer B. J., Mooney A. H., Sala O. E., Schulze D. E., 1996: Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108, S 583-595
- Cools N., De Vos B., 2016: Manula on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests Patr X. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 115 s.
- Crockford R.H., Richardson D.P., 2000: Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14, S 2903–2920

- CVPK, ©2022: Chytrá krajina (online) [cit. 2024.02.24], dostupné z <<https://cvpk.czu.cz/cs/r-13920-chytra-krajina>>.
- Davidson E. A., Janssens I. A., 2006: Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature* 440, S 165-173
- eAGRI, ©2022: Klimatické regiony (online) [cit. 2024.02.24], dostupné z <<https://eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo-zemedelstvi/legislativa/tematicke-prehledy-pravnich-predpisu-mze/103408820.html>>.
- Erriquens F. G., Gigliotti G., Said-Pullicino D., 2007: Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource technology* 98, S. 1822-1831
- Fan J., McConkey B., Wang H., Janzen H., 2016: Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crop Res* 189, S 68-74
- Fernandez F. G., Lamb J. A., Kaiser D. E., 2014: Understanding nitrogen in soils. University of Minnesota Extension, (Revised), S. 1-5
- Germer S, Blume T., André F., Jonard F., Caignet I., Coenders-Gerrits M., 2012: Pan-European beech (*Fagus sylvatica*) stemflow data comparison. *Geophysical Research Abstracts* 14, EGU 2012-12761
- Gonzalez-Ollauri A., Stokes A., Mickovski B. S., 2020: A novel framework to study the effect of tree architectural traits on stemflow yield and its consequences for soil-water dynamics. *Journal of Hydrology* 585
- Gould J. I., Quinton N. J., Weigelt A., De Deyn B. G., Bardgett D. R., Seabloom E., 2016: Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. *Ecology Letters* 19, S 1140-1149
- Hemr O., Vichta T., Brychtová M., Kupec P., Žižlavská N., Tomášová G., Deutscher J., 2023: Stemflow infiltration hotspots near-tree stems along a soil depth gradient in a mixed oak–beech forest. *European Journal of Forest Research* 142, S 1385-1400
- Hinsinger P., Bengough G. A., Vetterlein D., Young M. I., 2009: Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil* 321, S 117-152

- Chen Y., Day S.D., Wick A.F., Strahm B.D., Wiseman P.E., Daniels W.L. 2009: Transport in preferential flow domains of the soil porous system: measurement, interpretation, modelling, and upscaling. *J Contam Hydrol* 104, S 38-44
- Chmelař J., Úradníček L., 1998: Dendrologie lesnická 2. část-Listnáče I. (Angiospemeae). Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 167 s.
- ISO 10390, 1994. Soil quality — Determination of pH. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jackson R. B., Lajtha K., Crow S. E., Hugelius G., Kramer M. G., Piñeiro G., 2017: The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48, S. 419-445
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson W. D., Minkinen K., Byrne A. K., 2007: How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma* 137, S 253-268
- Julich S., Kieselmeier J., Scheibler S., Petzold R., Schwärzel K., Feger K.H., 2021: Hydraulic properties of forest soils with stagnic conditions. *Forests* 12, S 1113
- Klimšová V., 2022: Chytrá krajina Amálie u Lán je čím dál chytřejší a původem i urozená (online) [cit. 2024.02.24], dostupné z <<https://zivauni.cz/chytra-krajina-amalie-u-lan-je-cim-dal-chytrejssi-a-puvodem-i-urozena/>>.
- Končel K., 2016: Charakteristika humusových forem na vybraných lokalitách ŠLP Křtiny, ML (online), dostupné <<https://theses.cz/id/4l3f4f/18178794>>.
- Kupec P., Deutscher J., Školoud L., 2019: Vodohospodářská účinnost zalesněných pahorkatinných mikropovodí s rozdílnou hlavní dřevinou v bezesrážkových periodách. *Zprávy Lesního výzkumu* 64, S 86-93
- Kuželková M., Jačka L., Kovář M., Hradílek V., Máca P., 2023: Tree trait-mediated differences in soil moisture regimes: a comparative study of beech, spruce, and larch in a drought-prone area of Central Europe. *European Journal of Forest Research* 143, S 319-332

- Levia D.F., Herwitz S.R. 2005: Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *CATENA* 64, 117-137
- Levia F. D., Carlyle-Moses D., Tanaka T., 2011: Forest hydrology and biochemistry. Springer Dordrecht, s 740, ISBN 978-94-007-1362-8
- Levia F. D., Hudson A. S., Llorens P., Nanko K., 2017: Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. *WIREs Water* 4. S 1-18
- Lundström U.S., Van Breemen N., Bain D., 2000: The podzolization process. A review. *Geoderma* 94, S 9–107.
- Matthewa J., 1992: The Ecology of Recently- Deglaciaded Terrain: A Geocological Approach zo Galcier Forelands and Primary Succession. *Oecologia Montana* 2, S. 49
- Nazir J. M., Li G., Nazir M. M., Zulfiqar F., Siddique H. M. K., Iqbal B., Du D., 2024: Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil and Tillage Research* 237, S 105959
- Němeček J., Rohošková M., Macků J., Vokoun J., Vavříček D., Novák P., 2008: Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. ČZU v Praze, Praha, 95 s.
- Novosadová K., Kadlec J., Řehořková Š., Matoušková M., Urban J., Pokorný R., Comparison of rainfall partitioning and estimation of the utilisation of available water in a monoculture beech forest and a mixed beech-oak-linden forest. *Water* 15
- Obioha E. E., 2008: Climate change, population drift and violent conflict over land resources in Northeastern Nigeria. *Journal of Human Ecology* 23, S 311-324
- Pánek T., Buzek L., 2002: Základy pedologie a pedogeografie. Ostravská univerzita, Ostrava, 149 s.
- Patric J.H., 1978: Harvesting Effects on Soil and Water in the Eastern Hardwood Forest. *Southern Journal of Applied Forestry* 2, S 66-73
- Pavlů L., 2019: Základy pedologie a ochrany půdy. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha Suchdol, 76 s.

- Pavlů, L., Borůvka, L., Drábek, O., Nikodem, A. 2021: Effect of natural and anthropogenic acidification on aluminium distribution in forest soils of two regions in the Czech Republic. *Journal of forestry research* 32, S 363-370
- Pavlů, L., Drábek, O., Stejskalová, Š., Tejnecký, V., Hradilová, M., Nikodem, A., Borůvka, L. 2018: Distribution of Aluminium fractions in acid forest soils: influence of vegetation changes. *iForest Biogeosciences and Forestry* 11, S 721–727
- Petránek J., 1963: Usazené horniny jejich složení, vznik a ložiska. *Československé akademie věd, Praha*, 327–364 s.
- Petránek J., 2016: *Encyklopedie geologie. Česká geologická služba, Brno*, s. 349 ISBN 978-80-7075-901-1
- Remeš J., Bílek L., Fulík M., 2015: Vliv zpracování těžebních zbytků a následné mechanické přípravy půdy na chemické vlastnosti půd přirozených borů. *Zprávy lesnického výzkumu* 60, S 138-146
- Rengel Z., 2003: *Handbook of soil acidity. Marcel Dekker Inc, New York*, S 496
- Richards R. D., Belcher N. R., Carrasco L. R., Edwards J. P., Fatichi S., Hamel P., Masoudi M., McDonnell J. M., Peleg N., Stanley C. M., Global variation in contributions to human well-being from urban vegetation ecosystem services. *One Earth* 5, S 522-533
- Rotter P., Purchart L. (eds.) 2022: *Ekologie lesa. Jak se les mění a funguje. Brno: Mendelova univerzita v Brně.*
- Sidle R. C., Noguchi S., Tsuboyama Y., Laursen K., 2001: A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. *Hydrological Processes* 15, S 1675-1692
- Siegert C.M., Levina D.F., 2014: Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology* 519, S 446-454
- Skjemstad, J.O., Baldock, J.A., 2007. Total and organic carbon. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton, S 225–237
- Smolíková L., 1982: *Pedologie I. Díl. Univerzita Karlova, Praha*, 123 s.

- Souza F.T. L., Hirmas R. D., Sullivan L. P., Reuman C. D., Kirk F. M., Li L., Ajami H., Wen H., Sarto V.M. M., Loecke D. T., Rudick K. A., Rice W. Ch., Billings A. S., 2023: Root distributions, precipitation, and soil structure converge to govern soil organic carbon depth distributions. *Geoderma* 437, S 1-19
- Staelens J., De Schrijver A., Verheyen K., Verhoest N.E.C. 2006: Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *J Hydrol* 330, S 651-662
- Staelens J., De Schrijver A., Verheyen K., Verhoest N.E.C. 2008: Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrol Process* 22, S 33-45
- Světlík J., Krejza J., Menšík L., Pokorný R., Mazal P., Kulhavý J., 2016: Sekvestrace uhlíku smrkovým porostem (*Picea Abies* (L.) KARST.) v oblasti Dražanské vrchoviny. *Zprávy lesnického výzkumu* 61, S 42-53
- Šantrůčková H., 2014: *Základy ekologie půdy*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 124 s.
- Šarapatka B., 2014: *Pedologie a ochrana půdy*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 232 s.
- Van Stan J. T., Allen S. T., 2020: What we know about stemflow's infiltration area. *Front for Glob Change* 3
- Vavříček D, Kučra A., 2017: *Základy lesnické půdoznalství a výživy lesních dřevin*. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy, s. 364 ISBN 978-80-7458-103-8
- Walker, L. R., Zarin, D. J., Fetcher, N., Myster, R. W. & Jhohnson, A. H., 1996: Ecosystem development and plant succession on landslides in the Caribbean. *Biotropica*, S. 566-76
- Wang CH., Liu S., Zhu Y., Smith R. A., Ning Y., Deng D., 2024: Aboveground carbon sequestration of *Cunninghamia lanceolata* forests: Magnitude and drivers. *Forest ecosystems* 11
- Yudina A., Kayakov Y., 2019: Saving the face of soil aggregates. *Global Change Biology* 25, S 3547-3577

- Zdražil V., Máca P., Hanel M., Jačka L., Hradilek V., Moravec V., Matula R., Strnad F., Vokoun M., Martínková M., Kovář M., Dvořák P., Sklenička P., 2021: Chytrá krajina II: Lesní krajina v lokalitě Amálie – I. etapa. Grantová služba Lesy ČR, Praha.