

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Studium transformace organické hmoty lesních půd
pomocí FTIR spektroskopie**

Diplomová práce

Bc. Tereza Nejedlá

Ochrana a využívání přírodních zdrojů

doc. Ing. Lenka Pavlů, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Studium transformace organické hmoty lesních půd pomocí FTIR spektroskopie" jsem vypracovala 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.4.2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Lence Pavlů, Ph.D. za vedení diplomové práce, podporu, trpělivost a cené rady, které mi byly poskytnuty v průběhu psaní. Další poděkování patří katedře pedologie a ochrany půd, díky které jsem mohla experiment zrealizovat.

Studium transformace organické hmoty lesních půd pomocí FTIR spektroskopie

Souhrn

Diplomová práce se skládá z teoretické a praktické části, jež se zabírají studiem organické hmoty lesních půd. Teoretická část se zprvu zabývá půdotvornými procesy, během kterých vzniká půdní organická hmota. Jelikož se práce věnuje lesním půdám a organické půdě pod porosty v lese, bylo důležitou částí popsat i všechny horizonty nadložního humusu. Dále je také zmíněn i obsah uhlíku v lesních půdách. Druhá větší kapitola vysvětluje principy infračervené spektroskopie, kde je detailněji popsána i metoda DRIFTS a její využití v praxi.

Praktická část analyzuje půdní vzorky, které byly odebrány z výsypky Arboretum Antonín nacházející se na Sokolovsku. Pomocí standardizovaných metod bylo změřeno pH suspenze půdy a demineralizované vody, následně i pH extraktů půdy s CaCl_2 . Také se stanovoval obsah organického uhlíku v konkrétních půdních horizontech jednotlivých porostů. Poslední hlavní analýzou byla spektroskopie FTIR, jejíž spektra nejsou sama o sobě kvantitativní, proto z nich bylo třeba získat kvantitativní hodnoty, a to spočtením několika indexů – index smáčivosti, aromaticity a dekompozice.

Hlavním cílem práce bylo porovnat základní chemické vlastnosti nadložních horizontů lesních půd pod porosty, které se liší kvalitativními vlastnostmi opadu, porovnat vlastnosti půdní organické hmoty zmíněných horizontů za pomoci FTIR spektroskopie a z toho následně vyhodnotit použitelnost FTIR spektroskopie pro tyto účely.

Výsledné hodnoty tedy prokázaly, že kvalita opadu hraje velkou roli ve vlastnostech půdy (pH) a půdní organické hmoty (smáčivost, aromaticita a půdní rozklad), proto lze vlastnosti půdní organické hmoty dokumentovat pomocí FTIR spektroskopie. Také bylo zjištěno, že organická hmota v hlubších horizontech obsahuje stabilnější a více aromatické látky. Rozdílnost mezi porosty různých dřevin se se vzrůstající hloubkou půdy vytrácí, čímž byly splněny stanovené cíle a potvrzeny všechny hypotézy.

Klíčová slova: půdní organická hmota, FTIR spektroskopie, nadložní horizonty

Study of forest soil organic matter transformation using FTIR spectroscopy

Summary

The thesis consists of a theoretical and practical part, which deals with the study of organic matter of forest soils. The theoretical part deals at first with soil-forming processes, during which soil organic matter is formed. As the work is devoted to forest soils and organic soils beneath the stands in the forest, it was an important part to list all the horizons of the above-ground humus as well. The carbon content of forest soils is also mentioned. The second major chapter presents infrared spectroscopy, in which DRIFTS and its use in practice are described in more detail.

The practical part analyses soil samples was taken from the Antonín dump located on Sokolovsko. Using standardised methods, soil pH in demineralised water were measured, followed by pH in CaCl₂ soil extract. The last main analysis was FTIR spectroscopy, the spectra are not in themselves quantitative, therefore it was necessary to computing quantitative values from them by adding several indices - an index of wettability, aromaticity and decomposition.

The main aim of the work was to compare the basic chemical properties of the soil horizons of the forest soils beneath the stands, which differ in the quality characteristics of the fall, to compare the soil organic matter properties of these horizons using FTIR spectroscopy and from this to evaluate FTIR spectroscopy usability for these purposes.

The results therefore showed that the quality of litter plays a major role in soil properties (pH) and soil organic matter (wettability, aromaticity and soil decomposition), therefore soil organic matter properties can be documented using FTIR spectroscopy. It was also found that organic matter in deeper horizons contains more stable and more aromatic substances. The difference between stands of different tree species disappeared with increasing soil depth, thus fulfilling the aims and confirming all hypotheses.

Keywords: soil organic matter, FTIR spectroscopy, soil surface

Obsah

1	Úvod	1
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Půdotvorné procesy	3
3.1.1	Půdotvorné faktory a podmínky	3
3.1.2	Stratigrafie půdního profilu	4
3.2	Půdní organická hmota	5
3.2.1	Horizonty nadložního humusu lesních půd	6
3.2.1.1	Obsah uhlíku a organické hmoty v lesních půdách	8
3.3	Infračervená spektroskopie	9
3.3.1	Typy vibrací	11
3.4	Infračervené spektrometry	11
3.4.1	Disperzní spektrometry	11
3.4.2	FTIR spektrometry	12
3.4.2.1	FTIR spektroskopie při studiu půdní organické hmoty	13
3.5	Techniky měření infračervených spekter	14
3.5.1	Plynný vzorek	15
3.5.2	Kapalný vzorek	15
3.5.3	Pevný vzorek	16
3.6	Reflexní techniky	17
3.6.1	Metoda zeslabené totální reflexe (ATR)	17
3.6.2	Metoda zrcadlového odrazu (Specular Reflection)	17
3.6.3	Metoda difuzní reflexe (DRIFTS)	18
3.6.4	Fotoakustická spektroskopie (PAS)	19
4	Metodika	20
4.1	Arboretum Antonín	20
4.2	Odběry vzorků	20
4.3	Analýza půdních vzorků	22
4.3.1	Měření pH	22
4.3.2	Stanovení obsahu organického uhlíku (Cox)	22
4.3.3	Spektroskopie FTIR	23
4.4	Zpracování výsledků	24
5	Výsledky	25
5.1	Měření pH	25
5.1.1	Měření pH v demineralizované vodě	25
5.1.2	Měření pH v roztoku chloridu vápenatého	26
5.2	Stanovení obsah organického uhlíku (Cox)	27

5.3	Spektroskopie FTIR.....	28
6	Diskuse	33
6.1	Půdní reakce	33
6.2	Obsah organického uhlíku	33
6.3	FTIR spektroskopie	34
7	Závěr	36
8	Literatura.....	37
9	Samostatné přílohy	I
9.1	Obrazová dokumentace studovaných lokalit.....	I
9.2	Tabulka naměřených hodnot	IV
9.3	Zhodnocení rozdílů mezi variantami půdních horizontů a porostů jednotlivých dřevin pomocí vícecestné analýzy rozptylu.....	V

1 Úvod

Jedním z významných krajinných prvků je povrchová těžba uhlí, představující velký zásah do krajiny, jehož následkem je přímé zničení stávajících ekosystémů. Za poslední desetiletí vznikla řada opatření, navrácením zasažené krajiny její přirozené funkce a ekologickou hodnotu. Metody jsou různé, za nejběžnější se však považují klasické biotechnické, nebo biologické rekultivace. Technické rekultivace zahrnují například úpravy sklonu svahů výsypky, úpravy povrchu, či meliorační opatření, biologické navazují na technické a bývají rozdělovány na zemědělské (osetí travní směsí) a lesní (výsadby stromů).

Po samotném založení nové výsypky lze stanovit její účel. Velmi aktuálním trendem je výzkum pedogeneze prováděný na rekultivovaných důlních lokalitách, ke kterému se hojně využívá výsypka Antonín nacházející se na Sokolovsku, neboť zde byly vysazeny různé druhy dřevin, díky čemuž lze zkoumat rozdílné efekty každého porostu.

K výzkumu pedogeneze patří v současnosti i trend využití metody infračervené spektroskopie, pomocí níž lze lehce získat hodnotné výsledky, a to bez složitých extrakčních a analytických metod.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Hlavním cílem práce je popsání přeměn organické hmoty v rámci nadložních horizontů lesních půd a jejich ovlivnění kvalitativními parametry vstupujícího opadu.

Mezi praktické cíle patří porovnání základních chemických vlastností nadložních horizontů lesních půd pod porosty lišícími se kvalitativními vlastnostmi opadu, dále také porovnání vlastností půdní organické hmoty těchto horizontů za pomoci FTIR spektroskopie a vyhodnocení vhodnosti FTIR spektroskopie pro tyto účely.

Díky splnění těchto cílů by mělo dojít k potvrzení, či vyvrácení následujících hypotéz:

- 1) kvalita opadu hraje klíčovou roli v transformačních procesech půdní organické hmoty a ty lze zdokumentovat za pomoci FTIR spektroskopie
- 2) organická hmota hlubších organických horizontů obsahuje stabilnější látky a rozdílnost mezi porosty různých dřevin se vytrácí.

3 Literární rešerše

3.1 Půdotvorné procesy

K pochopení vývoje půdy je potřeba znát půdotvorné procesy, jelikož se půda vyvíjí v důsledku působení abiotických a biotických faktorů. Jedná se o děje, mezi které kupříkladu patří procesy jako je zvětrávání, humifikace, eluviace, iluviace, oglejení, glejový proces a zasolování.

3.1.1 Půdotvorné faktory a podmínky

Půda je považována za přírodně historický útvar, který je tvořen hromaděním organické a minerální hmoty působením půdotvorných faktorů. K půdotvorným faktorům zařazujeme matečnou horninu, klima, organismy a podzemní vodu, mezi podmínky patří reliéf (terénu) a čas. Půdu však může silně ovlivňovat i člověk (Šarapatka, 2014).

Prvním půdotvorným faktorem je matečná hornina, která bývá rozdělována na tři hlavní typy: vyvřelá, tedy zchladlé magma, sedimentární neboli usazená forma horniny, a metamorfní, kdy jde buď o vyvřelou, nebo sedimentární horninu, která byla modifikována teplem a tlakem. Každá z těchto hornin má určité fyzikálně-chemické vlastnosti, a ty ovlivňují půdu při jejím vývoji. Z dlouhodobého hlediska působí na půdu klimatický faktor, kdy teplota a vlhkost urychlují chemické rozklady, či vyplavování, nebo ukládání složek v půdě. Kupříkladu v humidních oblastech dochází k snadnému promyvu půdy a v profilu zůstávají pouze odolné minerály, jako jsou např. oxidy železa. V důsledku těchto procesů bývají půdy méně úrodné, oproti oblastem aridním, ve kterých mohou být v půdě zadržovány vysoce rozpustné soli. Třetím, a velmi vlivným faktorem na tvorbu půdy, je aktivita půdních organismů. Obecně organismy žijící v půdě napomáhají přesunout organickou hmotu do větších hloubek a také tvořit kanálky, díky kterým je usnadněn pohyb vody, vzduchu a částic (Hillel, 2007).

V rámci větších i menších územních celků je dalším půdotvorným faktorem reliéf, který je viditelný i na velmi malé vzdálenosti, mezi něhož patří například měnící se hloubky hladiny podzemní vody, svažitosti způsobující odtok vody a odnos materiálu nebo jeho usazování, tvaru reliéfu atd. Svažitost je důležitým prvkem, neboť pokud je vysoká svažitost, dochází ke zrychlenému odtoku a odnosu zvětralého materiálu. S narůstající délkou svahu může být odtok vody a erozní jevy výraznější (Šimek a kol., 2019).

Posledním faktorem je čas. Tento faktor, v případě konstantního chování ostatních půdotvorných faktorů se může projevat ochuzováním či obohacením půdy o různé složky. Například na jednom půdotvorném substrátu (původně mohl být sprašový), se z černozemě vyvine šedozem, z šedozemě hnědozem, z které následně luvizem a zní pseudoglej. Dalším příkladem může být přeměna kyselé magmatické horniny, ze které se vyvine ranker, z něhož kambizemě rankerového typu, poté modální, dystrické, kryptopodzoly a ve výsledku podzol.

Půdy dle časového hlediska dělíme na půdy recentní vznikající v současných klimatických podmínkách holocénu (za posledních 10-12 tisíc let) a paleosoly, které vznikly v geologicky starších obdobích, jež se dále dělí na reliktní (nepřekryté mladšími sedimenty) a fosilní (pohřbené, překryté mladšími sedimenty) (Kučera & Vavříček, 2014).

3.1.2 Stratigrafie půdního profilu

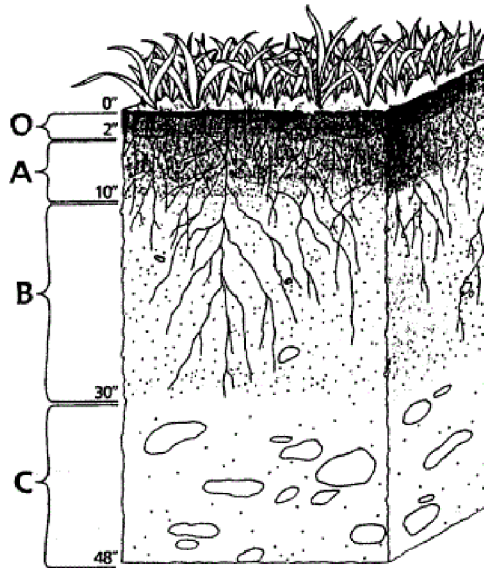
Každá půda nese znaky všech procesů, které při jejím vzniku probíhaly. Po výkopu, či řezem lze snadno pozorovat její vnitřní vrstvení, kde tyto vrstvy mají snadno viditelné charakteristické barvy, složení, strukturu a mocnost. Vrstvy jsou nazývány půdními horizonty a jejich vertikální uspořádání se nazývá půdní profil. Některé vlastnosti, jako je barva nebo tloušťka, lze stanovit v in-situ bez speciálních přístrojů.

Půdní horizont je definován jako vrstva materiálu, který je rovnoběžný s povrchem půdy a liší se s vrstvou nad a pod ním. Všechny půdy mají alespoň jeden horizont; obecně platí, že čím je půda starší, tím více horizontů bude obsahovat.

Pro označení půdních horizontů se používají velká písmena, a to O, A, E, B, C, a R. K detailnější identifikaci horizontů se podle potřeby dále dělí, a ne všechny horizonty jsou přítomny ve všech půdách. Posloupnost písmen se vztahuje k vertikálnímu uspořádání horizontů.

Stručný popis hlavních horizontů (viz obr. 1):

- a) O horizont – Vrstva rostlinného nebo živočišného opadu na povrchu půdy v různém rozkladovém stádiu. Nazývána jako vrstva opadu, či humusová vrstva, která může tvořit různě širokou tloušťku organické půdy. Podle stupně rozkladu lze jej rozdělit na Ol (nerozložený opad), Of (fermentační opad) a Oh (humusová vrstva).
- b) A horizont – Vrchní vrstva minerální půdy charakteristická převážně nahromaděním organických sloučenin, díky nimž je typicky tmavá nebo černá. V této vrstvě bychom našli nejvyšší půdní aktivitu a obsah humusu do 30 %. Podle složení a kvality humusu je k rozeznání horizont Am (melanický), Ae (eluviální), Ao (ochrický) a Aa (andický) aj.
- c) E horizont – Vztahuje se k eluviovanému horizontu, tudíž zde probíhá proces eluviace, a to má za následek vyluhování organického a/nebo minerálního obsahu. Po procesu je minerální horizont vybělený, složený převážně z křemičitanů. Patří sem horizonty Ev (plavohnědý ochuzený), Es (soloncový ochuzený), En (vybělený nodulární) horizont aj.
- d) B horizont – Minerální horizont, který byl změněn zvětráváním a ukládáním silikátových jílu, uhličitánů, železa, hliníku nebo organických sloučenin. Proto je horizont hnědé barvy a tmavší než horizont nad ním. V tomto horizontu může být nahromaděná organická hmota, proto se jedná o horizonty – humusiluviální (Bh), akumulace jílu - luvický (Bt), vysoké množství výměnného sodíku - natrický (Bn), oxidace železa - mramorovaný (Bm) aj.
- e) C horizont – Vrstvy nejsou změněny povětrnostními vlivy, ani jinými přeměnami. Horizont obsahuje velmi málo humusu, i přesto že tímto horizontem pronikají kořeny stromů. V důsledku změn ve struktuře nebo chemickému složení se horizont dělí na Cg (glejování), Cca (akumulace uhličitánu vápenatého a hořečnatého) nebo Cs/Csa (rozpustné soli) aj.
- f) R horizont – Tvrdé, neporušené skalní podloží, ve kterém mohou být přítomny malé trhliny vyplněné rozbitým materiálem a nejhloběji rostoucími kořeny aj. (Lukac & Godbold, 2011; Němeček a kol., 2004).



Obrázek 1 - Půdní profil (upraveno dle USDA, 2023)

3.2 Půdní organická hmota

Pro popsání půdy se dá použít koncept třífázového systému, který je složen z pevných látek, kapalin a plynu. Pevná fáze zde zastává přibližně 50 % podílu půdy, je složená z minerálních a organických složek. Minerální složky jsou tvořeny anorganickými sloučeninami, jež mají různou velikost, od malých koloidních částic až po velké úlomkovité horniny. Naproti tomu organické složky jsou složeny z živých organismů (rostlin, živočichů, hub, mikroorganismů, nebuněčných organismů atd.) a odumřelé organické hmoty v různých stádiích rozkladu. Kapalná fáze, o objemu 20-30 % půdy, zahrnuje půdní roztok, který obsahuje ionty, organické molekuly, soli a další chemické sloučeniny. Plynná fáze, jež je složena z plynů (kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého atd.) a vodní páry, představuje 20-30 %. Pórovitý prostor je klíčový pro dobrý růst rostlin, zejména jejich kořenů. Rostlina také potřebuje dostatek vody, která je následně vypařována z listů, výživné látky a pro úspěšnou respiraci i kyslík (Foth, 1990; Kučera & Vavříček, 2014).

I když anorganická složka je objemově podstatnou částí půdní hmoty, organická složka se považuje za důležitou komponentu půdního tělesa, která společně s anorganickou složkou tvoří pevnou půdní hmotu. Půdní organická hmota (SOM = soil organic matter) je chápána jako heterogenní směs neživého materiálu, rostlinného a živočišného původu, jež se může vyskytovat v různém stádiu rozkladu, či přeměn (Brady & Weil, 1999).

Před začátkem celého transformačního procesu se do půdy dostává biomasa pocházející z rostlin (kořeny, kořenové exudáty), ze stromů a keřů (listí, jehličí, větvičky), ale také ze zbytků trav a bylin, zbytků uměle pěstovaných rostlin. Menší zastoupení v půdní organické hmotě mají uhynulá zvířata, zvířecí výkaly a mrtvé mikroorganismy. Všechny tyto zbytky obsahují určité množství vody, minerální a organické složky. Voda, která je obsažená v rostlinných zbytcích tvoří 20-90 %, kdy procenta se odvíjejí od rostlinného druhu, orgánů, či stáří samotné rostliny.

Transformační procesy půdní organické hmoty lze rozdělit do třech fází. Počáteční fáze jsou fáze biochemické, ve kterých nedochází k žádným destrukcím buněk. Tyto procesy zahrnují hydrolýzu, oxidaci s rozkladem vysoce polymerních sloučenin (škrobu na cukry, proteiny na peptidy a aminokyseliny) a oxidaci aromatických sloučenin (kupříkladu fenolů). Druhá fáze je mechanická, kdy makro- a mezofauna promísí půdu s minerální částí půdy. Pro tyto procesy jsou důležité žížaly, roupice a členovci. Za poslední fázi je považována fáze mikrobiální, ve které je organická hmota rozkládána pomocí mikroorganismů, kdy velké molekuly se rozkládají na menší sloučeniny (Blum et al., 2020).

Rozklad půdních organických látek probíhá pomocí dvou procesů, exotermickou mineralizací a endotermickou humifikací. Výslednými produkty mineralizace jsou živiny dostupné ve formě kationtů a aniontů (NH_4^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} aj.), voda a CO_2 . Tyto minerální látky bývají následně využívány mikroorganismy a rostlinami jako živiny, popř. se z půdy vyplavují. V průběhu mineralizace se objevuje také proces imobilizace, při kterém dochází k vytváření nové biomasy, jež se zabudovává do těl organismů a do půdní organické hmoty.

U procesu humifikace jsou výslednými produkty humusové látky (humus). Proto, aby průběh humifikace byl optimální, je třeba střídání dvou fází, a to fáze aerobní (rozkladné) a anaerobní (syntetické). Dříve byly humusové látky chápány jako makromolekuly spojené pevně kovalentními vazbami, avšak v současnosti je již prokázáno, že jde o menší molekuly spojené do větších shluků vodíkovými můstky. Jsou ale i nadále označeny termínem humusové kyseliny, fulvokyseliny a humin (Šimek, 2021).

Humus se skládá z polyuronidů, aminokyselin, aromatických a alifatických sloučenin, ze kterých se tvoří směs organických sloučenin, jež se vyznačují vysokou molekulovou hmotností. Humusový substrát je obvykle tmavě hnědý, může i v malých koncentracích změnit vzhled a odstín půdy. Vykazuje určitou afinitu k půdním částicím, proto je někdy označován jako „půdní lepidlo“ (Lukac & Godbold, 2011).

Humusové látky zahrnují huminové kyseliny, fulvokyseliny a huminy. Huminové kyseliny mají šedé zbarvení a jsou charakteristické tím, že se dobře rozpouštějí ve zředěných zásadách, avšak při okyselení alkalického extraktu se vysrážejí. Celkově obsahují 3,6-4,8 % dusíku, to v aminové, amoniakální a N heterocyklické formě, a jsou považovány za nejvalitnější složku humusu. Fulvinové kyseliny bývají světle žlutohnědé a rozpouštějí se jak v kyselinách, tak i v zásadách. Oproti huminovým kyselinám se vyznačují větším počtem bočních i lineárních řetězců, obsahují 1,2-4,1 % dusíku a jsou charakteristické pro kyselé půdy. Huminy vykazují černou barvu a neextrahovali bychom je z půdy ani kyselinou či zásadou. Mají vysoký stupeň kondenzace a polymerace, nehydrolyzují a obsahují 20-30 % veškerého dusíku v půdě. Dá se i přesto říct, že všechny tyto tři skupiny jsou strukturálně podobné, jelikož obsahují celulózu, lignin, hemi-celulózu, bílkoviny, tuky atd., avšak se liší v několika aspektech, kupříkladu v molekulové hmotnosti, rozpustnosti a charakteristické barvě po jejich izolaci (Khan & Schnitzer, 1978; Richter, 2004; Stevenson, 1994).

3.2.1 Horizonty nadložního humusu lesních půd

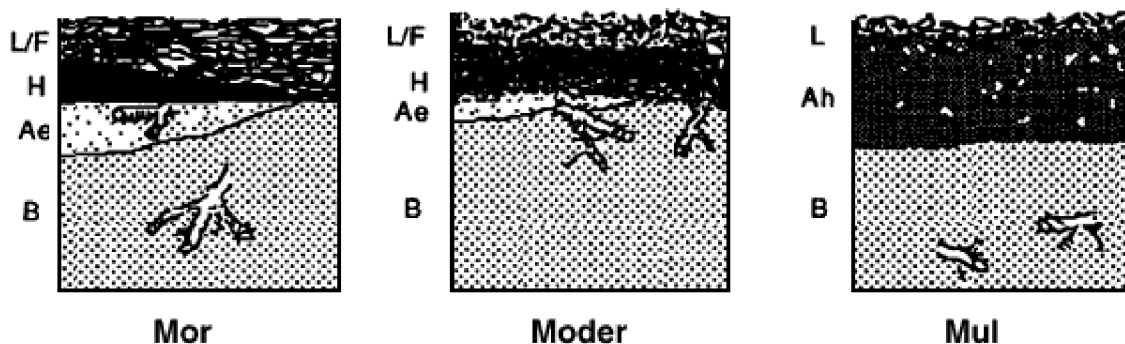
K popsání obsahu a forem organických látek v půdním profilu byla vypracována celá řada různých klasifikací, avšak povětšinou se rozdělují na mor, moder a mul.

Za mor, neboli surový humus, je považována taková forma humusu vznikající za nepříznivých podmínek pro rozklad a transformaci organické hmoty. Mocnost tohoto horizontu dosahuje 4-10 cm, stratigrafie je zde L-F-H; L neboli hrabanka (nerozložené, či málo rozložené zbytky opadu, bez příměsí), F neboli drť (směs polorozložených částic, materiál se už nedá identifikovat, obsahuje houbové hyfy a zbytky kořínků) a H neboli měl (amorfní materiál tvořen humusem, oddělen od povrchu minerální půdy).

Mor bychom našli hlavně na minerálně chudých půdách v chladném a vlhkém klimatu, obzvláště pod jehličnatými porosty s kyselým jehličím, či pod vegetací produkující kyselý opad (borůvka, brusinka, vřes). Plísně a houby se podílejí na rozkladných procesech a ze zooedafonu se zde vyskytují převážně roztoči a chvostokoci.

Moder tvoří přechodnou formu mezi morem a mullem. Uplatňují se v tomto horizontu houby, plísně, bakterie, výjimečně také aktinobakterie, žížaly ovšem chybí nebo jsou jen ojediněle zastoupeny. Moder se vyskytuje většinou v listnatých porostech a v příznivějších podmínkách. Jeho profilová stratigrafie je L-F-H s mocností opadu 2-3 cm, kde dominuje horizont L a přechod z horizontu H do horizontu A je plynulý, tudíž na rozdíl od moru nedokážeme oddělit vrstvu drtě a hrabanky.

V mulu se rychle zpracovávají organické zbytky, ze kterých vzniká humifikovaná hmota, končící po zapracování v minerální vrstvě půdy. Stratigrafie je tedy L-F s mocností do 1 cm, kde se H horizont netvoří. Vyskytuje se převážně na teplých a přiměřeně vlhkých stanovištích s dostatkem živin, což odpovídá smíšeným a listnatým porostům. Typickým prostředím jsou černozemě a aluviální půdy (černice a fluvizem) s neutrálním pH. Kyselé prostředí není pro mul ideální, ovšem možné. Během rozkladu opadu se objevují houby, tzv. bílé hniloby. Na tvorbě mulu v mírném pásu se významně podílejí žížaly, za to v tropech a subtropích termity. Díky těmto živočichům se materiál dostává i do horizontu A, ve kterém je soustředována veškerá část organické hmoty, proto bývá tmavé až černé barvy s mocností více než 10 cm (Sáňka a kol., 2018; Šimek a kol., 2021; Vokoun a kol., 2002).



Obrázek 2 - Mor, moder a mull (Lavender et al., 1990)

3.2.1.1 Obsah uhlíku a organické hmoty v lesních půdách

Lesy jsou považovány za velké zásobníky uhlíku, jež pokrývají 4,1 biliónu hektarů zemského povrchu. Uhlík je do biomasy rostlin a do půdy ukládán, čímž celkově je v lesních ekosystémech uloženo až 47 % veškerého uhlíku, který se nachází na souši. Lesní ekosystémy obsahují celkové množství uhlíku 1240 Pg, z čehož 536 Pg obsahuje biomasa a 704 Pg půda (Abdullahi et al., 2018; Sedjo & Sohngen, 2012).

V lesních půdách, stejně jako v minerálních půdách, jsou zásoby půdního organického uhlíku určovány dle několika faktorů, mezi něž patří samotná půda (materiál, forma humusu, hloubka), klima (teplota, srážky) a les (druh dřeviny, množství a kvalita opadu) (De Vos et al., 2015). Povrchový opad je hlavním vstupujícím materiálem, díky němuž se do půdy dostává velké množství uhlíku. Nejen povrchový opad patří mezi uhlíkové zdroje vstupující do půdy, ale také tlející dřevo, mechové povlaky, či produkce podzemního kořenového opadu a kořenových exsudátů (Jandl et al., 2007; Mayer et al. 2020).

Předchozí odstavce poukazyval, že i druh dřeviny silně ovlivňuje vstup uhlíku do půdy. Jehličnaté stromy s mělkými kořeny mohou mít tendenci akumulovat půdní organickou hmotu méně ve srovnání s listnatými stromy. V tabulce (tab. 1) lze vidět, že při obdobném objemu biomasy listnaté dřeviny akumulují více uhlíku než jehličnaté dřeviny (De Vries et al., 2003). Studie Pretzsch (2005) zaznamenala, že produkce biomasy je několikanásobně vyšší u smíšeného porostu než u monokultur.

Tabulka 1 - Hustota dřeva evropských druhů stromů a medián C v evropských lesích (upraveno dle De Vries et al., 2003)

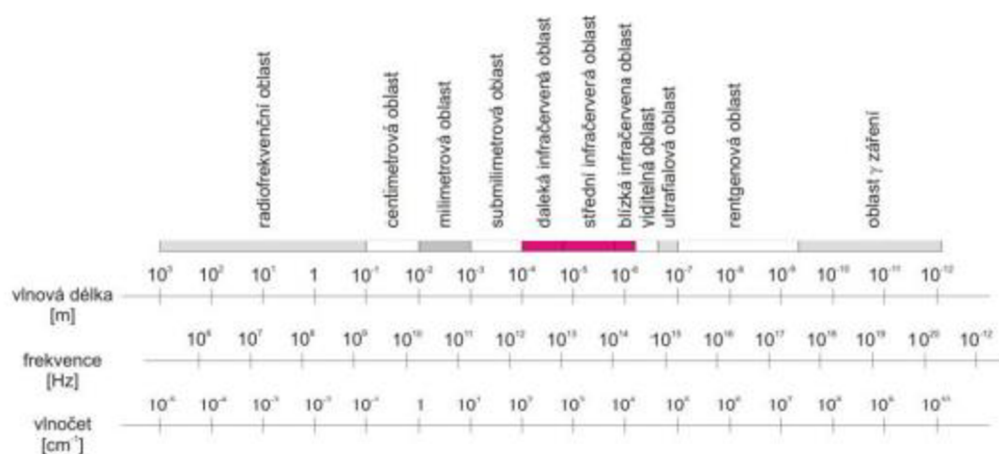
Druh	Hustota [kg/m ³]	C v porostu [t/ha]	C v půdě [t/ha]	ΣC [t/ha]
Borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	490	60	62	122
Smrk ztepilý (<i>Picea abies</i> L.)	430	74	140	214
Jedle bělokorá (<i>Abies alba</i> Mill.)	410	100	128	228
Buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	680	119	147	266
Dub letní (<i>Quercus</i> sp. L.)	660	83	102	185

Sice studie Vanguelova et al. (2013) prokázala, že v zalesněných organických půdách se může ukládat téměř čtyřikrát více uhlíku než v půdách minerálních, ale čím dál tím více se zásobárna uhlíku redukuje. Zapříčiňují to buďto lidské činnosti (přeměna lesů na zemědělskou půdu a městské oblasti), nebo přírodní činnosti (škudci, bouře, požáry) (Erb, 2004; Johnson et al., 2004; Knohl et al., 2002; Percy et al, 2002).

3.3 Infračervená spektroskopie

Infračervená spektroskopie je analytická metoda využívaná v organické a anorganické chemii, díky ní dokážeme identifikovat látky ve směsi a získat informaci o molekulární struktuře látky. K zaznamenávání tohoto jevu používáme přístroj nazývaný se spektrometr, jehož výstupem je infračervené spektrum, z kterého můžeme získat informace o složení a struktuře látky (Stuart, 2004). Metoda je popisována také jako nedestruktivní metoda, u které nedochází k poškození zkoumaného vzorku během jeho analýzy. Následné získané hodnoty vibračních energií jsou spojeny s pevností chemických vazeb, molekulovou geometrií a hmotnostmi jader. Jedná se o experimentální techniku, která je vedle kvantitativní a kvalitativní analýzy je důležitou součástí při výzkumu molekulové dynamiky, chemických vlastností molekul, vlivu prostředí a mnoha dalších oblastí. Podstatou spektroskopie je interakce mikročástic (molekul), přesněji interakce infračerveného záření se studovanou hmotou. Pokud je foton pohlcen studovanou hmotou, dá se hovořit o absorpční infračervené spektroskopii, avšak v případě, kdy dojde k vyzáření fotonu, mluvíme o emisní infračervené spektroskopii.

Infračervené záření, také IR z anglického infrared, se pohybuje v rozsahu vlnových délek 12 500 až 20 cm^{-1} a vlnových délek 800 nm až 0,5 mm, navazuje na jedné straně na viditelné záření, na druhé zas na záření mikrovlnné. IR může dělit podle vlnových délek záření na dalekou (FIR, far infrared), střední (MIR, middle infrared) a blízkou (NIR, near infrared) oblast (obr. 3). Nejdůležitější oblastí pro identifikaci a určování chemické struktury je oblast střední infračervená ($4\ 000\text{--}200\text{ cm}^{-1}$) (Kania, 2007).



Obrázek 3 - Elektromagnetické spektrum (Kania, 2007)

Obvyklou situací je, že se molekula nachází v rovnovážném stavu $n = 0$. Proto aby došlo k přechodu elektronu na vyšší energetickou hladinu musí dojít k pohlcení určitého množství energie, v případě nedostatečného množství energie není způsobena excitace elektronu, ale objeví se pouze vibrační pohyby.

V průběhu jevu se jednotlivé atomy v molekule pohybují, avšak bez jakýchkoli translakací. Každý z těchto atomů má 3 stupně volnosti zastupující translační pohyby, jež popisují pohyb celé molekuly určitým směrem. Vyznačují se v kartézských souřadnicích – osy x, y a z. Rotační pohyby kolem os představují další tři stupně. Číslo $3n-6$ popisuje tzv. vibrační stupně

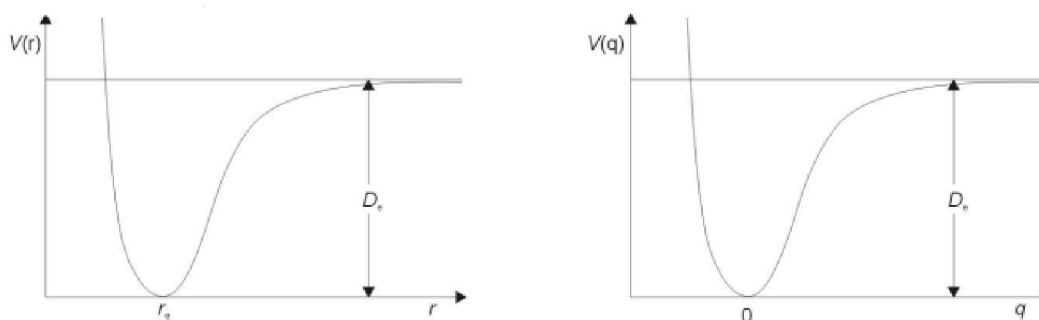
volnosti neboli vibračními pohyby molekuly. Pakliže jde o molekulu dvouatomovou je zde jediný vibrační stupeň volnosti, a ten se týká natahování vazby mezi oběma atomy (Derrick et al., 1999; Griffiths & de Haseth, 2007; Smith, 1999).

Pro zjednodušení se takový pohyb dá popsat jednoduchou rovnicí, kde r značí okamžitou (proměnnou), r_e rovnovážnou (konstantu, molekulový geometrický parametr) délku vazby a q vibrační souřadnici (Kania, 2007).

$$q = r - r_e$$

Rovnice 1 – Rovnice popisující natahování vazby (Kania, 2007)

U polyatomových molekul je vibrační souřadnice lineární kombinace výchylek jednotlivých atomů, díky kterým lze vyjádřit energii spojenou s vibračním pohybem. Existují dva energetické příspěvky související s celkovou vibrační energií molekuly, a to kinetická energie, která je spjata s pohybem atomů a energie potenciální popisující stlačování a natahování vazby. V případě vykonání vibračního pohybu molekuly, dochází k přenášení energie mezi formou kinetickou a potenciální, což odpovídá tomu, jak se potenciální energie dokáže změnit v závislosti na velikosti vibrační souřadnice q . Vyjádření závislosti můžeme vyzobrazit pomocí tzv. křivky potenciální energie (obr. 4).

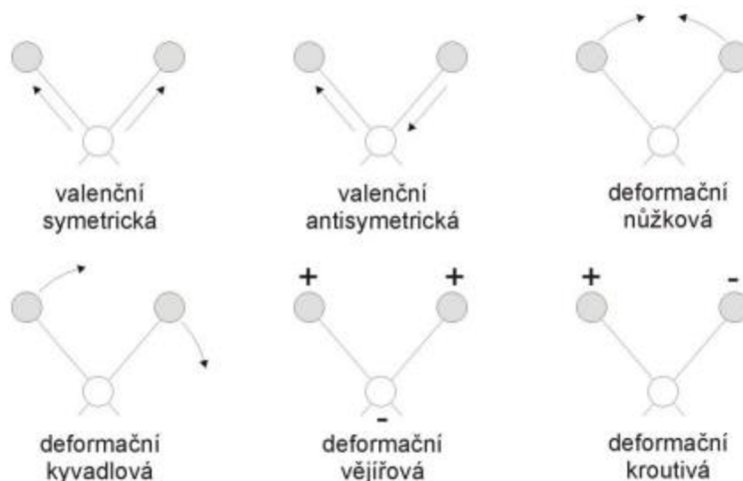


Obrázek 4 - Vibrační potenciální energie V jako funkce (a) délky vazby (b) vibrační souřadnice (Kania, 2007)

Z vibrační potenciálové křivky můžeme vyčíst, že kinetická energie elektronů spolu s příspěvkem elektrostatické energie nabitých částic v molekule se zvládá měnit podmíněně na mezijaderné vzdálenosti r . Její tvar popisuje proces, u kterého při malých mezijaderných vzdálenostech molekulová energie roste kvůli silné elektrostatické energii mezi nabitými částicemi, pokud ale jsou velké vzdálenosti mezi částicemi, dochází k roztržení vazby (Kania, 2007).

3.3.1 Typy vibrací

Při hodnocení vibrující molekuly podle klasické fyziky je samotná vibrace popsána jako změna délek či úhlu vazeb. Pokud dojde ke změnám během vibrace, můžeme mluvit o valenční vibraci, jež se dělí na vibraci symetrickou a antisymetrickou. V případě určitých změn úhlů se objevují deformace, které se dají rozdělit na rovinné a mimorovinné. Mezi rovinné vibrace (obr. 5) patří nůžkové a kyvadlové, mezi mimorovinné vějířovité a kroutivé (Kania, 2007).



Obrázek 5 - Znárodnění některých vibračních pohybů molekuly z pohledu klasické fyziky (Kania, 2007)

3.4 Infračervené spektrometry

Odrazových technik je v infračervené spektroskopii nespočet, vždy se podle typu vzorku určí daná technika. Existuje několik typů spektrometrů, ale mezi nejznámější patří dva, a to disperzní a nedisperzní. Od první poloviny 19. století se používaly spektrometry disperzní, avšak před několika desetiletími je nahradily spektrometry s jiným způsobem stanovení infračerveného spektra, jedná se převážně o infračervené spektrometry s Fouierovou transformací tzv. FT-IR spektrometry (Stuart, 2004).

3.4.1 Disperzní spektrometry

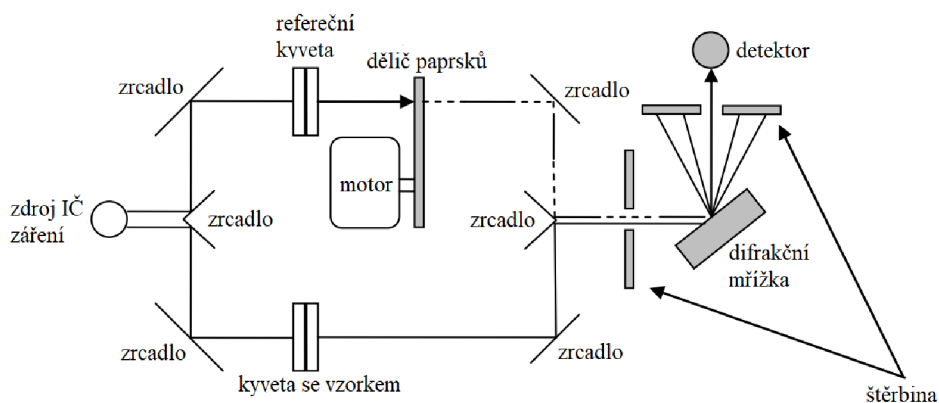
Disperzní spektrometry se skládají ze zdroje záření, monochromátoru a detektoru. Fungují na principu vyzařování infračerveného záření z odporového drátu, který je navinut na keramickém tělese a za pomoci několika zrcadel se infračervené záření rozdělí do dvou paprsků (obr. 6) (Kania, 2007). Vzorkem, který je umístěný v kyvetě prochází první paprsek, ten druhý je využit jako referenční. Oba paprsky jdou do monochromátoru, kde dochází k rozkladu záření na spojité spektrum frekvencí infračerveného záření.

Základním prvkem monochromátoru je otáčející se kotouč, přes něhož procházejí střídavě paprsky. Dále jdou přes kolimační zrcadla a vstupní štěrbinu, až na pomalu se otáčející difrakční mřížku, kdy tato mřížka je schopna rozložit paprsek světla na vybrané vlnočety záření.

Následně detektor snímá poměr intenzity referenčního záření a záření procházející vzorkem – tímto zjišťujeme, které frekvence byly absorbované (Pavia et al., 2009).

Zdrojem pro IČ záření je využíván tzv. global, což se jedná o tyčinku vyrobenou z karbidu křemíku, nebo Nernstovu tyčinku, která je z oxidů zirkonu a yttria. Aby bezproblémově došlo k propouštění IČ záření, musí být veškerá optika zhotovena z halogenidů alkalických kovů kupříkladu z NaCl, KBr, LiF, nebo AgCl. Pokud by se vybrala skleněná optika, IČ záření by bylo plně absorbováno.

S použitím termočlánků se provádí detekce IČ záření. Příkladným a velmi citlivým detektorem je tzv. Golayova cela. Jedná se o komůrku, jež je naplněná zředěným plynem. Stěny jsou tvořeny membránou s připevněným zrcátkem. Ve chvíli dopadnutí IČ paprsku se zvýší teplota plynu a vystoupá i jeho tlak. Důsledkem jevu je vyboulení membrány se zrcátkem a odklon paprsku dopadajícího na zrcátko, změna je registrovaná pomocí fotobuňky (Taraba, 2008).



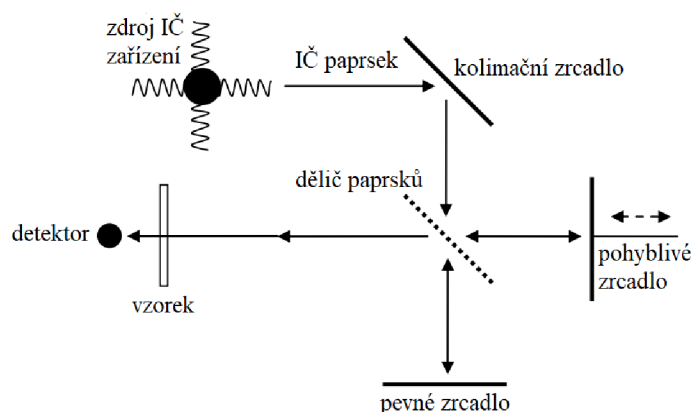
Obrázek 6 - Schéma disperzního spektrometru (upraveno dle Pavia et al., 2009)

3.4.2 FTIR spektrometry

Rozdíl mezi disperzními spektrometry a FTIR spektrometry je způsob sledování frekvencí, kdy u disperzních spektrometrů se sleduje každá frekvence zvlášť, zatímco FTIR spektrometry sledují všechny frekvence najednou (Mentlík a kol., 2008).

FTIR spektrometr pracuje pomocí Michelsonova interferometru, který se skládá ze čtyř ramen. Na prvním rameni se nachází zdroj IZ a kolimační zrcadlo, jehož funkcí je, aby paprsky byly dále rovnoběžné. Zatímco druhé rameno má na sobě upevněno pevné zrcadlo, na třetím je zrcadlo pohyblivé, jehož pohyb je znázorněn na obr. 7. Na posledním čtvrtém rameni je detektor a měřený vzorek. Tzv. dělič je považován za hlavní část interferometru.

Svazek IČ záření dopadá pod úhlem 45° na dělič paprsků s padesáti procentní propustností, což způsobí rozdělení paprsků na dva, přičemž jeden z paprsků projde děličem na pevné zrcadlo a druhý je pohyblivým zrcadlem odražen. Může zde vzniknout dráhový rozdíl mezi paprsky v závislosti na poloze zrcadla. V momentě, kdy se paprsky odrazí od těchto zrcadel, vracejí se zpět na dělič paprsků a tím dojde k opětovné rekombinaci (Larkin, 2011; Smith, 2011).



Obrázek 7 - Schéma Michelsonova interferometru (upraveno dle Smith, 2011)

3.4.2.1 FTIR spektroskopie při studiu půdní organické hmoty

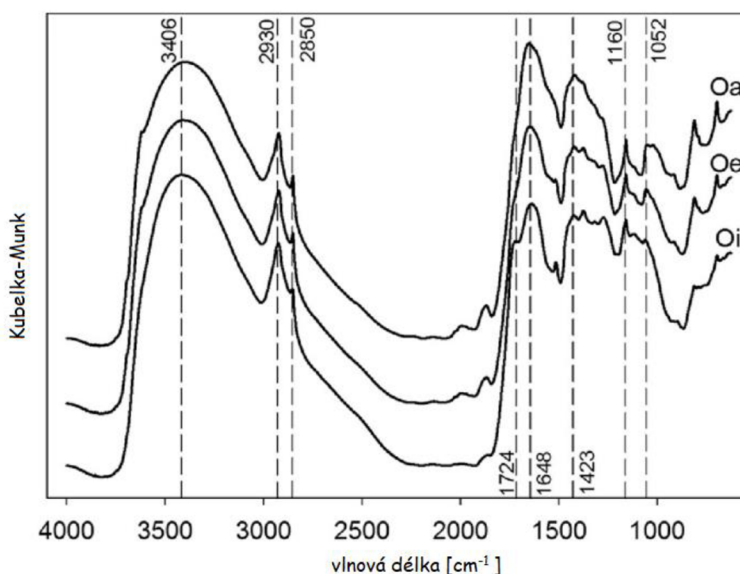
Vhodnou měřicí technikou pro sledování rozkladných procesů půdní organické hmoty je využití infračervené spektroskopie, a to přesněji metody difuzní reflexe (DRIFTS) a metody zeslabené totální reflexe (ATR). Princip obou metod bude v kapitolách 3.6.1. a 3.6.3. podrobně popsán. Obě techniky jsou podle studie Tinti et al. (2015) považovány za užitečné nástroje pro analýzu velkého počtu půdních vzorků, proto jsou brány za jedny z nejslibnějších analytických technik pro rozvoj pedologického výzkumu. Dokáží totiž poskytnout spektrální vzorce umožňující přesnou předpověď kvantitativních parametrů (např. celkový uhlík, celkový dusík, poměr C/N, obsah ligninu, rozpuštěný uhlík, karboxyl-C, aromatického-C, O-alkyl-C a alkyl-C).

Existuje nespočet studií, v nichž se FTIR spektroskopie využila jako analytická metoda při analýze půdních vzorků. Například během studie Haberhauera (1998) byla aplikována FTIR, a to na lesních půdních profilech ze tří různých lokalit. Jednalo se o půdní vzorky z Irska a Austrálie, tudíž ze dvou různých klimatických oblastí. Při studii Matamala et al. (2017) byla použita také FTIR spektroskopie, dokonce konkrétně DRIFTS metoda, která byla využita i v této diplomové práci při analýze půdních vzorků. Díky DRIFTS metodě se ukázalo, že rozdíly ve vegetačním pokryvu ovlivnily finální spektrum, i když v menší míře než koncentrace uhlíku. Spektrální vlastnosti byly odlišné u půd tundry od vlastností půd z lesních a křovinných lokalit. Bylo i viditelně zřetelné rozdíly ve spektrálních vlastnostech organických půdních horizontů mezi kyselými a nekyselými typy tundry a mezi stále zelenými a smíšenými lesy. Ve všech typech horizontů byly nalezeny i důkazy o rozkladu půdní organické hmoty.

Z experimentálních studií provedených v České republice je například studie Thai et al. (2022) v níž byla také využita metoda DRIFTS, dokonce se stejným měřicím spektrometrem, na kterém probíhala analýza půdních vzorků odebraných pro tuto práci (viz kapitola 4.3.3.). Ve studii Thai et al. byly vybrány pozemky mulčované slámou, kůrou a štěpkou. Zjistily se patrné rozdíly ve spektrech půd a spektrech půdních agregátů, obzvláště u pásma silikátů lokalizovaných v jílové frakci půdy. Proto dle výsledků lze usoudit, že agregáty obsahují vyšší množství jílu ve srovnání s půdou. Dále bylo dokázáno, že půdy pod štěpkou dřeva a kůry měly vyšší obsah organického uhlíku než půda pod slámou a půda na kontrolním pozemku. Dále že půdy

s kůrou a dřevní štěpkou měly vyšší index smáčivosti než půdy se slámou a kontrolním vzorkem, a také index aromaticity vykazoval významný rozdíl.

Následný graf (obr. 8) vyzobrazuje spektrum techniky DRIFTS s jednotlivými píky, které označují každé pásmo. Rozpětí 3400-3300 cm^{-1} je pásmo O-H a N-H skupiny, 3070-3050 cm^{-1} C-H na aromatických uhlovodících, 3000-2800 cm^{-1} pásmo C-H na alifatických uhlovodících (CH₂ nebo CH₃ skupin), 2680-2580 cm^{-1} OH- karboxylových kyselin, 1725-1720 cm^{-1} pásmo C=O kyselin a ketonů, 1660-1630 cm^{-1} pásmo C=O amidů I, chinonů, H- vázané na konjugované ketony, 1540 cm^{-1} amidy II, 1512 cm^{-1} C=C aromatických uhlovodíků, 1460-1450 cm^{-1} C-H alifatických uhlovodíků (asymetrických), 1420 cm^{-1} C-O a O-H fenolů a alkoholů, 1280-1200 cm^{-1} C-O a OH z kyselin, C-O pásmo z aryl etherů, 1125 cm^{-1} alkoholy a polysacharidy (Mühlhanslová & Pavlů, 2018).



Obrázek 8 - Spektrum difúzní reflektanční infračervené spektroskopie (DRIFTS) tří půdních organických horizontů (upraveno dle Matamala et al., 2017)

3.5 Techniky měření infračervených spekter

Infračervené spektrum látek je měřeno měřit ve všech možných stavech, a to ve stavu plynném, kapalném nebo pevném. K měření jsou využity kyvety z různých materiálů, musí být však vhodné pro dobrou propustnost infračerveného záření. Mezi nejběžnější typ kyvet patří kyvety s NaCl a KBr, neboť jsou propustné pro širokou škálu infračerveného spektra. Avšak nejsou vhodné pro svou rozpustnost ve vodě, alkoholu, kyselinách a dalších polárních látkách, proto se začaly vyrábět i jiné typy kyvet z materiálů jako je ZnSe nebo KRS-5 (jedná se o směsný krystal jodidu a bromidu thallného). Chlorid stříbrný je naopak výhodný pro roztoky kyselá a vodnaté. Pro měření dlouhovlnných oblastí bývá používáno nejčastěji bromidu, či jodidu cesného.

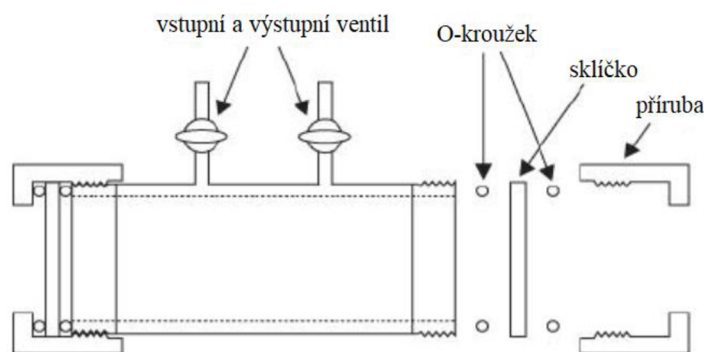
IČ spektra lze také měřit ještě jinými materiály, ale ty už propuštějí záření v úzké oblasti spektra. Týká se to polyethylenu, infrasilu (křemeného skla), CaF₂ aj. (Němec, 2008).

3.5.1 Plynný vzorek

Kdybychom chtěli měřit infračervené spektrum plynného vzorku, použila by se kyveta (obr. 9), která se skládá z trubice o průměru cca 4 cm a obvykle je vyrobena z Pyrex skla a má sklička na obou koncích. Plyn se do kyvety dostává pomocí vstupního ventilu, který je připevněn ke kyvetě. Díky tomu se dá tlak par vzorku řídit, aby se mohla získat vhodná intenzita pro absorpci.

Absorbance závisí nejen na jejím parciálním tlaku, ale na tlaku celkovém. Sice 70 hPa nebo méně je tlak parciální, při kterém nespočet plynů v kyvetě poskytuje ucházející se spektra, pro praxi je však důležité udržovat tlak konstantní přidáním neabsorbujícího plynu, jako je například dusík.

Pro změření spektra ze vzorku je třeba plynný vzorek zředit, a to velkým množstvím inertního plynu (argon, krypton, neon atd.). Dále se nanese na desku, která je udržována při nízké teplotě. Protože interakce mezi izolovanou molekulou v matici a okolními atomy inertního plynu jsou zanedbatelně malé, infračervené spektrum vyzobrazí „čisté“ vibrační spektrum izolovaných molekul (Tasumi, 2014).



Obrázek 9 - Schéma plynové kyvety (upraveno dle Tumio, 2014)

3.5.2 Kapalný vzorek

Když je zkoumajícím se vzorkem nětěkavá kapalina, je nejjednodušším způsobem vytvořit tenký kapalný film, ve kterém se rozmáčkne několik kapek kapaliny mezi dvě bromidodraselná, či jakákoli jiná „infračerveně“ průhledná sklička.

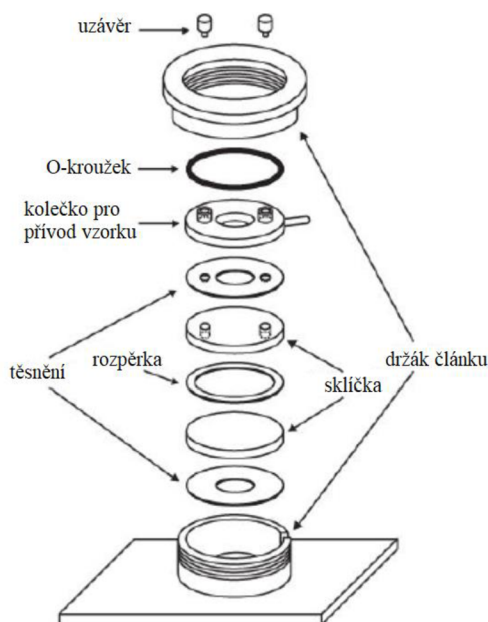
Specifická kyveta na kapalné vzorky se využívá v případě, že potřebujeme zjistit kvantitu. Součástí kyvety jsou dvě paralelní sklička, rozpěrka mezi oběma skličky, těsnění a kovový držák. Rozpěrka slouží k určení tloušťky vrstvy kapalného vzorku v otvoru a bývá vyrobena z telonu, polyethylenu aj.

Kapalné kyvety existují dvojího typu, a to demontovaná a utěsněná. Demontovaná kyveta je schématicky znázorněna na obr. 10. Tento typ kyvety je pro měření viskózních kapalin a barevných vzorků, které mohou obarvit vzorek a je dostupnější než ostatní typy. Výhodou je funkce, při které délku kyvety lze měnit výběrem vhodné rozpěrky.

Posléze se do kyvety vstříkne vzorek kapaliny pomocí injekční stříkačky. V případě že byt' je jen malá část otvoru obsazena vzduchem, má to nežádoucí vliv na výsledné spektrum.

Po změření se použitím tlaku vzduchu dostane kapalina pryč z kyvety, vnitřek se omyje vhodným rozpouštědlem a vysuší se proudem plynného dusíku, jelikož celá kyveta pro další měření by měla být zcela bez kapaliny (bez žádné kapky).

Kromě zmíněných dvou typů existuje ještě jeden typ, který je zvláště užitečný pro měření koncentrační závislosti intenzity absorpce rozpuštěné látky v roztoku v širokém koncentračním rozsahu, což se provádí pouze v oblasti vlnočtu, kde rozpouštědlo nemá až tak silné absorpční pásmo (Tasumi, 2014).



Obrázek 10 - Schéma demontovaného kyvety (upraveno dle Tumio, 2014)

3.5.3 Pevný vzorek

Pevné vzorky často bývají měřeny ve formě prášku. Jelikož ale prášek silně rozptyluje spektrum, proto se v praxi vzorek disperguje v médiu, aby se rozptylování potlačilo. Nejčastěji se používá KBr (=bromid draselný) a kapalný parafín.

Bromid draselný se vyznačuje určitou plasticitou, díky čemuž je možno vytvořit průhlednou tabletu. Nejdříve se rozemele malé množství (přibližně 1-3 mg) vzorku na jemný prášek, do směsi se poté přidá 300 mg jemného prášku bromidu draselného. Až prášek začne vykazovat homogenní tvar, začnou se tvarovat na průhledné tablety, je třeba mít k celému procesu vysoký tlak a vakuum. Průhlednost tablet závisí hned na několika faktorech: na stupni promísení vzorku a KBr, velikosti částic smíchaného prášku, absorbované vlhkosti atd.

Další užitečnou technikou pro měření infračervených spekter z práškového vzorku je metoda Nujol, kdy se malé množství tekutého parafínu nakape na jemně namletý vzorek asi o hmotnosti 10 mg, celá směs se dobře promíchá, dokud nevznikne pastovitá struktura. Směs se poté rozetře mezi dvěma deskami jakéhokoli infračerveného transparentního materiálu.

Třetí metoda technika je odrazová, která používá metodu difuzního odrazu, metodu zeslabeného úplného odrazu (ATR), či metodu infračervené mikroskopie. Vyvětleno v další kapitole – Kapitola 3.6 (Tasumi, 2014).

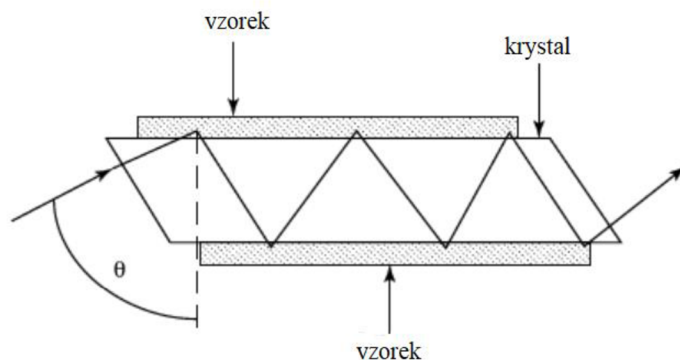
3.6 Reflexní techniky

3.6.1 Metoda zeslabené totální reflexe (ATR)

Tento typ spektrometrie využívá jevu úplného vnitřního odrazu. Na začátku paprsek záření vstupuje do krystalu, ve kterém dojde k úplnému odrazu. Během chvíle paprsek proniká až za odrazný povrch, v momentě kdy je materiál v těsném kontaktu s odrazným povrchem, paprsek začíná ztrácet energii, tím pádem materiál absorbuje záření. Výsledné zeslabené záření se měří a zakresluje pomocí funkce vlnové délky (obr. 11).

Krystaly, které se používají v ATR člancích jsou vyrobeny z materiálů, které se málo rozpouštějí ve vodě a disponují velmi vysokým indexem lomu. K takovým materiálům patří selenid zinečnatý, germanium a jodid thalia.

ATR metody umožňují zkoumat jak kapalné vzorky, tak i pevné. Výhodou ATR metody je možnost nastavení průtokové buňky zahrnující vstup a výstup do zařízení. Tímto se umožní kontinuální tok roztoků přes krystal a to umožňuje sledování případných spektrálních změn v čase (Stuart, 2004).



Obrázek 11 - ATR spektrometr (upraveno dle Stuart, 2004)

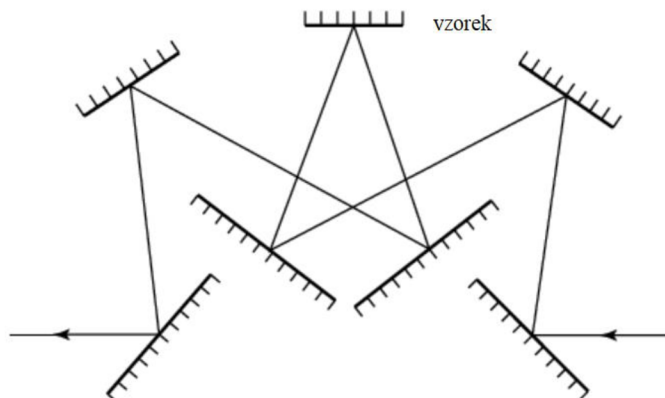
Metodu infračervené mikroskopie a ATR metoda jsou obdobné techniky, avšak mikroskopie vytváří intenzivnější spektra v důsledku vícenásobných odrazů. Oproti hranolům, které se využívají v ATR technikách, v mikroskopii se využívají speciálně tvarované krystaly, díky kterým může dojít k mnoho vnitřním odrazům, obvykle jich je 25 a více (Stuart, 2004).

3.6.2 Metoda zrcadlového odrazu (Specular Reflection)

Technika spekulární reflektance spočívá v odrazovosti dopadajícího záření od reflexní podložky, na které je vzorek umístěn (obr. 12). Odrazení záření nastává ve chvíli, kdy se úhel odraženého světla rovná úhlu dopadu. Kolik světla se odrazí závisí na úhlu dopadu, indexu lomu, drsnosti povrchu a absorpčních vlastnostech vzorku. Většina materiálů má odrazivost velmi nízkou (okolo 5-10 %), avšak v oblastech se silnou absorpcí je odražená intenzita větší, klidně až pod úhlem 85° . Proto existují dvě techniky měření, a to spekulárně reflexní a reflexně-absorpční.

Při první technice jsou využívány povrchy jako gumy, polymerní vrstvy, keramika, či polovodiče. Abychom mohli získat spektrum, je třeba spekulárně-reflexní záznam aplikovat i Kramersovu-Kronigovu transformaci. Druhou technikou je technika používající tenké filmy na

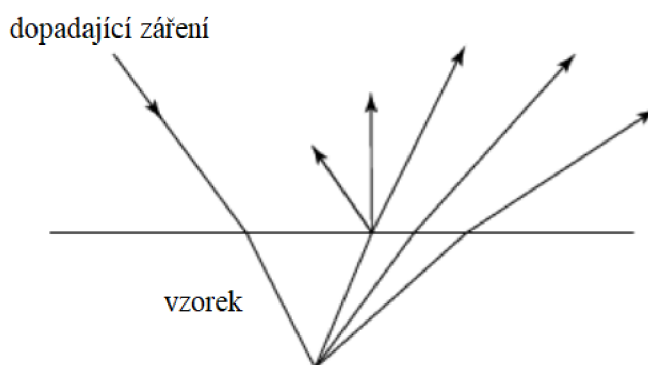
zrcadlicích plochách, záření poté projde povrchovým filmem a odrazí se od zrcadlicí se podložky. Získáváme tím reflexně-absorpční spektrum. Většina materiálů má nízkou odrazivost (5-10 %), pokud však chceme ovlivnit větší odraz, použijeme tzv. grazing úhel (až 85°). Tato technika běžně používá pro kapalně vzorky (Němec, 2008; Stuart, 2004).



Obrázek 12 - Spekulární reflektance (upraveno dle Stuart, 2004)

3.6.3 Metoda difuzní reflexe (DRIFTS)

Jedná se o metodu, která k běžnému použití využívá práškový vzorek, který v některých případech může být smíchán s práškem KBr, ovšem v experimentální části této práce s bromidem draselným smíchán nebyl. Při samotné technice se záření odráží do prášku, část záření se zcela odrazí a druhá část vniká do vzorku, ze kterého poté znovu vystupuje. Difuzní světlo se poté může sbírat přímo z materiálu ve vzorkovací nádobce nebo alternativně z materiálu pomocí abrazivní vzorkovací podložky (obr. 13). Tato metoda je užitečná pro vzorkování prášků nebo vláken (Němec, 2008; Stuart, 2004).



Obrázek 13 – DRIFTS spektrometr (upraveno dle Stuart, 2004)

Transmisní metoda a metoda DRIFTS mají různá spektra, hlavní rozdíl je v intenzitách, obzvlášť u méně intenzivních pásů. Pomocí Kubel-Munk rovnici lze vyjádřit propojení mezi koncentrací vzorku a intenzitou rozptýleného záření.

Kubelka-Munk rovnice:

$$f(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{k}{s}$$

Rovnice 2 - Kubelka-Munk rovnice (Němec, 2008)

R je absolutní reflektance vrstvy v nekonečné hloubce (až 3 mm)

k je molární absorpční koeficient

s je rozptylový koeficient, který závisí na velikosti částic a na naplnění vzorkovacího kelímku

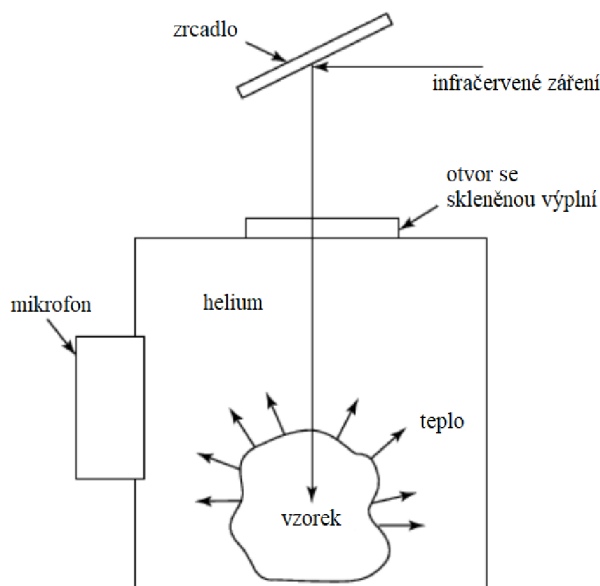
Tato metoda je v praxi nejběžněji používána, protože její využití má hned několik výhod:

- minimální příprava vzorku
- vysoká citlivost
- schopnost analyzovat téměř neodrazivé materiály, neprůhledné a slabě absorbující
- schopnost analyzovat nepravidelné povrchy či povlaky – např. polymerní povlaky (Němec, 2008).

3.6.4 Fotoakustická spektroskopie (PAS)

Fotoakustická spektroskopie je technika, která je schopna měření v rozsahu mikronů až po několik molekulárních monovrstev. Pomocí této metody lze měřit vzorky všech skupenství, jak pevného, tak kapalného, či plynného. Velmi užitečná je pro vysoce absorbující vzorky.

Celý proces začíná, kdy světlo s modulovanou intenzitou je absorbováno povrchem vzorku, který je umístěn v akusticky izolované komoře, jež je naplněn inertním plynem (např. heliem) (obr. 14). Během měření tepla vytvořeného ze vzorku lze získat spektrum, neboť vzorek absorbuje fotony záření mající energii, která odpovídá vibracím molekul, následně se energie uvolňuje, a to ve formě tepla, což způsobuje kolísání teplot. Díky mikrofonu můžeme detekovat výsledné změny tlaku, jež jsou převedeny na elektrické signály (Stuart, 2004).



Obrázek 14 - PAS spektrometr (upraveno dle Stuart, 2004)

4 Metodika

Pro studium transformace organické hmoty byla vybrána výsypka po těžbě hnědého uhlí s cíleně založenými maloplošnými výsadbami širokého spektra dřevin, kde je potlačena variabilita klimatických podmínek i půdotvorného substrátu.

4.1 Arboretum Antonín

Vzorky k analýze byly odebrány z lokalit nacházejících se v Arboretu Antonín, které bylo založeno roku 1969-1974 na výsypce starého hnědouhelného lomu Antonín pro rekultivační účely (Egeria, 2021). Dále zde můžeme nalézt i porosty, jež jsou navrženy k hospodářským činnostem, k rekonstrukci, či ke studiu usměrněných sukcesí.

Arboretum se nachází v Karlovarském kraji jihozápadně od města Sokolov, kde průměrná roční teplota odpovídá 7,3 °C. Odběr vzorků však proběhl v červnu za polojasného počasí, tudíž dle ČHMÚ se průměrná teplota pro danou lokalitu pohybovala okolo 15 °C.

Celková plocha výsypky činí 165 ha s nejvyšší nadmořskou výškou 443,8 m. n. m., zajímavým faktem je, že převýšení vzhledem k okolní krajině je výrazné a představuje až 48 m. Na severozápadě nedochází k odvodu srážkových vod, proto zde vzniklo několik menších vodních ploch a mokřadů. V současnosti jsou ale zabahněné nebo bez vody. Jediným zdrojem půdní závlahy jsou atmosferické srážky, které pro Karlovarský kraj odpovídají 327-658 mm za rok. Průměrné srážky pro Sokolov jsou 611 mm za rok, kdy v červenci spadne nejvíce srážek a nejméně v březnu. Průměrná délka vegetačního období trvá 220-227 dnů.

V důsledku počátečního stádia vývoje půd lze předpokládat, že pod porosty lesních dřevin se nacházejí typická organická hmota pro lesní ekosystémy (Dimitrovský a kol. 2016, Podrázský et al. 2016).

Lokalita se může pyšnit s širokým sortimentem dřevin a keřů, můžeme zde nalézt 220 druhů, poddruhů, ekotypů a fenotypů a přes 30 druhů introdukovaných dřevin. Za poslední léta byly v arboretu lesnické zásahy minimální, pouze zřídka se provedla asanační opatření, díky čemuž se do současné doby mohla plocha vyvíjet spontánně.

Arboretum Antonín bylo založeno, aby mohla vzniknout modelová zkušební plocha, kde se vysadily určité dřeviny, které následně budou taktéž vysázeny i na Mostecku a Chomutovsku. Aby se tato skladba dřevin mohla monitorovat a srovnávat s dřevinami v atypických podmínkách, zůstala hustota výsadeb stejná (Podrázský a kol., 2019).

4.2 Odběry vzorků

Pro experimentální část práce byly půdní vzorky získány z 12 lokalit, v první polovině června roku 2021. Celkem byly vybrány porosty 6 druhů dřevin (viz Tabulka 2), v nichž byly odebrány ze dvou míst směsné půdní vzorky.

Tabulka 2 - Seznam šesti vybraných druhů (vlastní dokumentace)

Číslo ¹	Zkratka	Český název	Latinský název	Odebrané horizonty
1	SM	smrk ztepilý	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	L, F, H a A
2	DB	dub letní	<i>Quercus robur</i> L.	L, F, H a A
3	BK	buk lesní	<i>Fagus sylvatica</i> L.	L, F, H a A
4	DG	douglaska ti-solistá	<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb.	L, F, H a A
5	HB	habr obecný	<i>Carpinus betulus</i> L.	L, H a A
6	LP	lípa srdčitá	<i>Tilia cordata</i> Mill.	L a A

U každé dřeviny byly odebrány dva vzorky ze čtyř horizontů – L, F, H a A, avšak u habru obecného a lípy srdčité nebylo možné některé horizonty odebrat, jelikož zcela chyběly důsledkem rychlého rozkladu organické hmoty.



Obrázek 15 - Výskyt jednotlivých dřevin (vlastní dokumentace)

¹ číslo odpovídající druhům dřevin zakreslené v mapě

4.3 Analýza půdních vzorků

Odebrané vzorky byly zcela vysušeny, následně rozdrceny, nebo prosyety. Zatímco vzorky z horizontů L byly rozemlety pomocí mlýnku, vzorky z horizontů F, H a A byly prosátý přes 2 mm síto. Pomocí analytických metod bylo změřeno pH, stanoven obsah organického uhlíku ve vzorcích (Cox) a díky spektroskopii FTIR se zhodnotilo a porovnálo složení půdní organické hmoty, především její změny v průběhu transformačních procesů.

4.3.1 Měření pH

Při prvním měření byl využit inoLab Lavel 1 pH metr a skleněná elektroda. Půdní reakce pH byla měřena poprvé v suspenzi půdy a demineralizované vody v objemovém poměru 1:5 (ISO 10390:2005), což odpovídalo 5ml vzorku a 25 ml vody. Podruhé suspenze půdy a extrační roztoku chloridu vápenatého za stejného poměru. Roztok CaCl_2 byl připraven z 1,47 g dihydrátu chloridu vápenatého, který byl rozpuštěn ve 100 ml vody, poté přelit do odměrné baňky 1000 ml a po vytemperování se doplnil po rysku. V obou případech byly suspenze před změřením pH protřepávány 1h, poté byly výsledky hodnoceny dle Tabulky 3.

Tabulka 3 - Hodnotící kritéria pro $\text{pH}[\text{H}_2\text{O}]$ a $\text{pH}[\text{CaCl}_2]$ (Rejšek, 1999)

pH [H_2O]	pH [CaCl_2]	půdní reakce
< 3,5	< 3,0	velmi silně kyselá
3,5-4,4	3,0-4,0	silně kyselá
4,5-5,5	4,1-5,0	středně kyselá
5,6-6,5	5,1-6,0	mírně kyselá
6,6-7,2	6,1-7,0	neutrální
> 7,2	> 7,0	mírně alkalická

4.3.2 Stanovení obsahu organického uhlíku (Cox)

Obsah organického uhlíku byl stanoven dle stanardizované metody, během které byl uhlík zoxidován kyslíkem dvojchromanu draselného (Valla a kol., 2002). U většiny vzorků horizontu A byla navážka 0,1 g, která se smíchala s 10 ml chromsírové směsi. Některým vzorkům musel být poměr upraven na 0,05 g a 20 ml, z důvodu velmi vysokého obsahu uhlíku. Následně se směsi vložily do sušárny o teplotě 125 °C po dobu 45 minut. Po uplynutí doby nutné pro kompletní oxidaci se nechaly vzorky zchadit, opatrně se zředily demineralizovanou vodou a změřilo se množství organického uhlíku titrováním Mohrovou solí pomocí galvanometru. Titrace probíhala do trvalé výhylky galvanometru. Výsledná spotřeba Mohrovy soli byla přepočtena na koncentraci uhlíku v suchém půdním vzorku v procentech. V žádné ze studií zabývající se stanovením organického uhlíku v lesní půdní organické hmotě nebyla stanovena hodnotící kritéria. V tabulce (tab. 4) je možno vidět, že zemědělské půdy mívají až 10 krát méně organického uhlíku než je tomu u mnou sledovaných svrchních organických horizontů lesních půd (viz tab. 6).

Tabulka 4 - Hodnoticí stupnice pro stanovení množství organického uhlíku v zemědělských půdách (Valla a kol., 2002)

Cox (%)	označení obsahu
< 0,6	velmi nízký
0,6-1,1	nízký
1,1-1,7	střední
1,7-2,9	vysoký
> 2,9	velmi vysoký

4.3.3 Spektroskopie FTIR

Ke sledování transformačních procesů u vzorků byl využit FT-IR spektrofotometr Nicolet iS10 (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) s nástavcem pro duřizní reflexi (obr.16). Před samotným měřením se daly vzorky do třecí misky a byly důkladně rozmělněny na analytickou jemnost (obr.17). Nejprve bylo změřeno spektrum zlatého zrcátka jako pozadí, poté se do „lžičky“ vložilo určité množství vzorku. Důležité bylo, aby povrch vzorku byl zarovnaný. U každého vzorku bylo využito 64 skenů při vlnočtech 200-4 000 cm^{-1} s rozlišením 4 cm^{-1} . Celý proces byl ovládan přes počítač prostřednictvím softwaru OMNIC, díky kterému bylo umožněno následné zpracování infračervených spekter.



Obrázek 16 - FT-IR spektrofotometr Nicolet iS10 (Pavlů, 2023)



Obrázek 17 - Analytická směs (Pavlů, 2023)

Během zpracování veškerých spekter byly zjištěny výšky piků v jednotlivých spektrálních pásmech, jež odpovídají jejich reflektanci přepočtené na Kubelka-Munkovy jednotky. Jelikož ale spektra nejsou sama o sobě kvantitativní, je třeba z nich získat kvantitativní hodnoty, které získáme ze vzájemných poměrů jednotlivých pásem, tedy pomocí výpočtů indexů. Indexy byly vybrány tři, a to index smáčivosti, aromaticity a dekompozice.

Index smáčivosti dává do poměru reflektanci pásma alifatických uhlovodíků ($\pm 2990 \text{ cm}^{-1}$), které se jeví jako hydrofobní (A), a pásma C=O kyselin, ketonů ($\pm 1720 \text{ cm}^{-1}$) a pásma C=O amidů I, chinonů ($\pm 1620 \text{ cm}^{-1}$) jako složky hydrofilní (B) (Ellerbrock et al. 2005). Výpočtem indexu zjistíme, které horizonty mají větší smáčivost, a které jsou naopak vodoopudivější. V horizontech s vyšší indexovou hodnotou se bude nacházet méně hydrofilních složek, tudíž se tyto horizonty budou jevit vodoopudivěji a budou vykazovat menší smáčivost. Tento index lze vypočítat dle vztahu:

$$PWI = A/B$$

Další index, který byl využit je index aromaticity, který se propočítává podle odrazivosti pásma alifatických uhlovodíků, a to v rozmezí $3\ 000\text{--}2\ 800 \text{ cm}^{-1}$ (AL) a pásma aromatických uhlovodíků (AR) v okolo 1520 cm^{-1} . Jedná se o nejkonzervativnější kritérium pro identifikaci aromátů a kondenzovaných aromátů v půdní organické hmotě. Hodnota indexu říká, že čím je hodnota nižší, tím je i vyšší relativní obsah aromatických součástí vůči alifatickým (Koch & Dittmar, 2006).

$$iAR = AL/(AL + AR)$$

Posledním zvoleným indexem byl index dekompozice, jež se vypočítává poměrem intenzit pásma C=O amidů I, chinonů v přibližném okolo 1620 cm^{-1} (A) a pásma alkoholů a polysacharidů v rozmezí okolo 1100 cm^{-1} (B). Tento index popisuje rozkladné procesy půdní organické hmoty. Z výsledných hodnot indexu lze vyčíst, ve kterých případech se organická hmota snadněji rozkládá a kdy pomaleji. Čím je hodnota indexu vyšší, tím je rozkladný proces výraznější a rychlejší (Sahrawat, 2000).

$$iDEC = A/B$$

4.4 Zpracování výsledků

Výsledky byly zpracovány za pomoci programu Microsoft Office Excel 2016, statistického programu STATISTICA 12 a programu pro zpracování IR spekter OMNIC 9. Pro hodnocení rozdílů mezi jednotlivými porosty a horizonty byla využita vícecestná analýza rozptylu.

5 Výsledky

Všechny tři analýzy vzorků probíhaly podle standardizovaných laboratorních metod, které jsou detailněji popsány v předešlých kapitolách. Po změření všech odebraných vzorků se zpracovaly výsledky, které vyšly následovně.

5.1 Měření pH

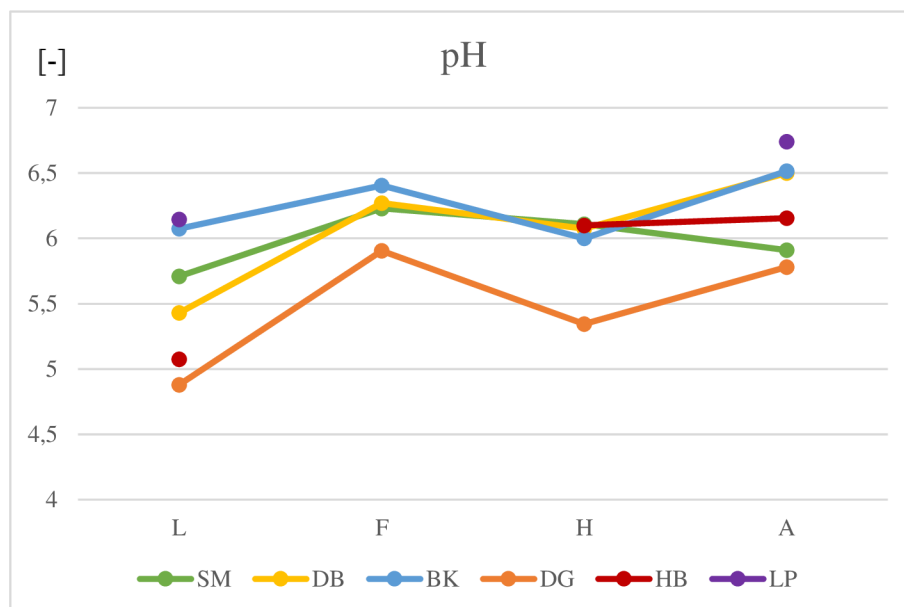
5.1.1 Měření pH v demineralizované vodě

Jako první byla změřena aktivní půdní reakce jako pH v suspenzi půdy a demineralizované vody. U smrku ztepilého bylo hodnoceno pH všech čtyřech horizontů, jež vyšly po změření jako mírně kyselé. Obdobné hodnocení platí i pro dub letní, u kterého až na horizont L, vyšly horizonty jako mírně kyselé. Horizont L oproti ostatním byl změřen jako středně kyselý. Buk lesní měl horizonty všechny horizonty mírně kyselé. Zajímavé výsledky ovšem vyšly u douglasky tisolisté, kde horizonty L a H byly vyhodnoceny jako středně kyselé a horizonty F a A vyšly jako mírně kyselé. Všechny horizonty u habru obecného se jeví jako mírně kyselé, zatímco lípa srdčitá má horizont L mírně kyselý a horizont A mírně alkalický.

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty pH vzorků extrahovaných demineralizovanou vodou

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	5,71 ± 0,050	5,43 ± 0,010	6,08 ± 0,075	4,88 ± 0,030	5,08 ± 0,235	6,15 ± 0,115
F	6,23 ± 0,260	6,27 ± 0,040	6,41 ± 0,135	5,91 ± 0,125	-	-
H	6,11 ± 0,030	6,08 ± 0,055	6,00 ± 0,050	5,35 ± 0,295	6,10 ± 0,350	-
A	5,91 ± 0,390	6,50 ± 0,510	6,52 ± 0,255	5,78 ± 0,870	6,16 ± 0,135	6,74 ± 0,040

Dále se nachází graf (obr. 17), ve kterém jsou vyznačeny všechny vybrané dřeviny, jejich jednotlivé horizonty a naměřené pH. Z grafu se dá lehce vyčíst, že dřevina, u které bylo naměřeno nejkyselejší půdní prostředí je douglaska tisolistá (průkaznost tohoto tvrzení bylo potvrzeno i ve vícecestné analýze v příloze 3), Naopak naměřené hodnoty u lípy srdčité se nejvíce přibližují neutrálním hodnotám. Také lze vidět, že u téměř všech horizontů jsou horizonty L a H kyselejší, než horizonty F a A. Výjimkou je však smrk, u něhož byl horizont A mírně kyselejší než horizont F a H. Analýzou rozptylu (viz příloha 3) byly potvrzeny průkazně nejnižší hodnoty pH v horizontech L. U buku a lípy naměřená nejvyšší hodnota pH, následně smrk a dub, nejnižší pH hodnota se naměřila u habru a douglasky.



Obrázek 17 - pH vzorků v extraktu demineralizovanou vodou

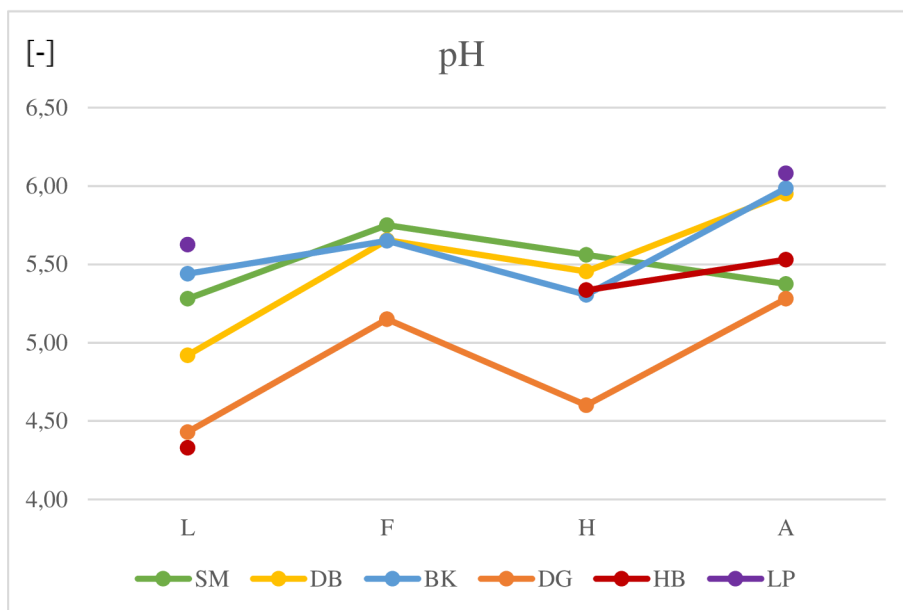
5.1.2 Měření pH v roztoku chloridu vápenatého

Výsledky měření pH v extraktu CaCl_2 byly zhodnoceny dle Tabulky 3, ve které se nacházejí kritéria pro pH vzorky extrahované chloridem vápenatým. Dle tabulky se vzorky z porostu smrku jeví ve všech horizontech jako mírně kyselé. Až na horizont L jsou ostatní horizonty u dubu mírně kyselé, L horizont vyšel středně kyselý. Stejně vyšly i půdní vzorky buku a douglasky jako v předchozím případě u extraktů demineralizovanou vodou. U buku všechny horizonty byly změřeny jako mírně kyselé, u douglasky horizont L a H středně kyselé a horizont F a A mírně kyselé. U habru znovu horizont L byl vyhodnocen jako středně kyselý, H a A mírně kyselé, a lípy L horizont vyšel mírně kyselý a A horizont se blíží neutralitní hodnotě.

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pH vzorků extrahovaných chloridem vápenatým

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	$5,28 \pm 0,080$	$4,92 \pm 0,080$	$5,44 \pm 0,030$	$4,43 \pm 0,030$	$4,33 \pm 0,170$	$5,63 \pm 0,075$
F	$5,75 \pm 0,120$	$5,66 \pm 0,055$	$5,65 \pm 0,080$	$5,15 \pm 0,170$	-	-
H	$5,56 \pm 0,010$	$5,46 \pm 0,005$	$5,31 \pm 0,025$	$4,60 \pm 0,340$	$5,34 \pm 0,225$	-
A	$5,38 \pm 0,325$	$5,95 \pm 0,490$	$5,99 \pm 0,245$	$5,28 \pm 0,870$	$5,53 \pm 0,230$	$6,08 \pm 0,060$

Následující graf (obr. 18) představuje velmi podobné vyhodnocení jako graf předchozí (obr. 17). Můžeme však zaznamenat, že v tomto grafu nejnižší naměřená hodnota byla u habru horizont L oproti grafu předchozímu, ve kterém nejkyselejším horizontem byl L horizont douglasky. Druhý viditelný rozdíl je u hodnot buku, které byly změřeny jako kyselejší než smrky, u předchozího grafu byl kyselejší smrk. Ostatní výsledky vyšly velmi podobně, u prostředí pod porostem douglasky je opět kyselost největší. Horizonty L a H jsou taktéž u všech dřevin kyselejší, než horizonty F a A, a také lípa se ze všech dřevin nejvíce blíží neutralním hodnotám. Analýzou rozptylu (viz příloha 3) byly potvrzeno, že opět jsou nejnižší hodnoty pH v horizontech L. U ostatních porostů byly zjištěny hodnoty pH u smrku, dubu, buku a lípy jako nejvyšší, poté opět douglaska a habr.



Obrázek 18 - pH vzorků v extraktu chloridu vápenatého

5.2 Stanovení obsah organického uhlíku (Cox)

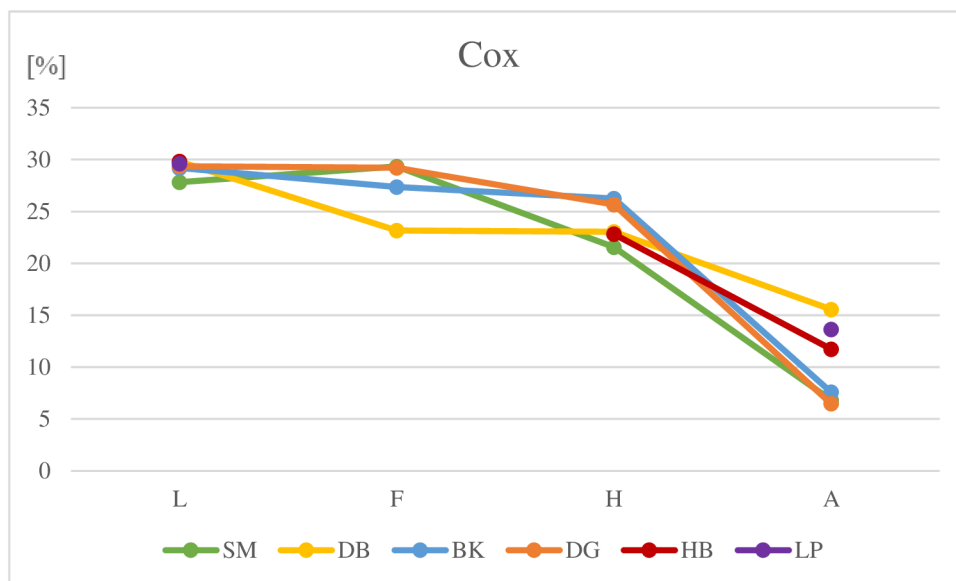
Další analýzou, která byla provedena, bylo stanovení procentuálního obsahu organického uhlíku v jednotlivých horizontech. Výsledky sice nemohly být vyhodnoceny podle žádných kritérií (více viz kapitola 4.3.2.), ale i přesto lze v tabulce (tab. 6) vidět, že průměrné procentuální zastoupení organického uhlíku v horizontech L různých typů porostů bylo vypočteno na 29,27 %, v horizontech F na 27,27 %, v horizontech H na 23,87 a v horizontech A na 10,31 %.

Tabulka 6 - Procentuální zastoupení organického uhlíku v půdních vzorcích

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	27,81 ± 0,257	29,81 ± 0,200	29,20 ± 0,610	29,36 ± 1,045	29,84 ± 1,117	29,61 ± 1,489
F	29,35 ± 4,419	23,16 ± 3,372	27,35 ± 0,410	29,22 ± 0,006	-	-
H	21,55 ± 2,938	23,04 ± 2,632	26,26 ± 1,991	25,68 ± 0,693	22,82 ± 4,377	-
A	6,83 ± 0,002	15,57 ± 8,805	7,59 ± 1,400	6,48 ± 0,254	11,74 ± 1,306	13,65 ± 0,130

V grafu (obr. 19) lze jasně vidět, že nejvýraznější obsah uhlíku je ve svrchních horizontech. Horizonty L všech porostů vyšly s velmi vysokým obsahem uhlíku až na smrk, kde obsah vyšel patrně slabší. V horizontech F bylo stále velké zastoupení uhlíku, největší zastoupení bylo naměřeno u smrku a douglasky, nejméně u dubu. V horizontu H se smrk propadl a bylo u něj naměřeno nejméně uhlíku ze všech, nejvíce bylo změřeno u buku. Horizont A zaznamenal největší rozdíly mezi všemi porosty, kdy dub měl zastoupení uhlíku největší, následně lípa, poté habr. U posledních třech horizontů vyšly výsledky velmi podobně, avšak s nejslabším obsahem uhlíku byla naměřena douglaska. Následující graf (obr. 19) vyznačuje jasný jev, a to, jak již bylo zmíněno, že v horizontu L je větší obsah uhlíku než v horizontu A, což potvrdila i analýza rozptylu (viz příloha 3). Z ní také lze vyčíst, že výrazné rozdíly mezi jednotlivými porosty nejsou, ale mezi horizonty ano, kdy nejvyšší hodnota byla stanovena u horizontů L, u ostatních

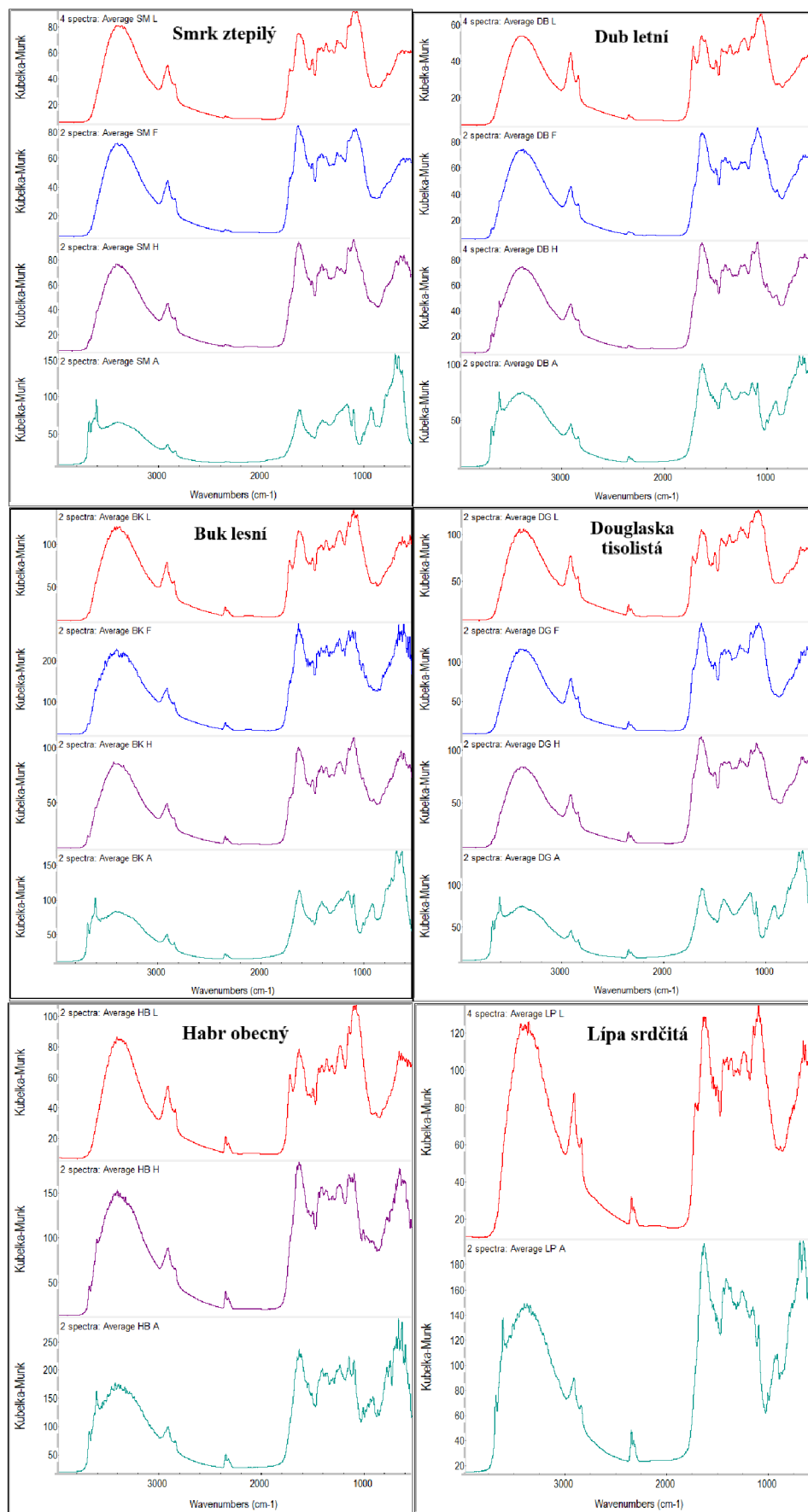
horizontů se hodnoty postupně snižovaly, čímž opět bylo potvrzeno, že v horních horizontech se nachází nejvíce půdního organického uhlíku.



Obrázek 19 - Procentuální zastoupení organického uhlíku v půdních vzorcích

5.3 Spektroskopie FTIR

Všechny vzorky byly změřeny a pomocí softwaru OMNIC se získala spektra, která se následně dala popsat a navzájem mezi horizonty i porosty porovnat. Na následující stránce se nachází DRIFTS spektra všech horizontů (obr. 20). Lze vidět, že největší zastoupení alifatických uhlovodíků je ve svrchních horizontech L, v hlubších horizontech alifatické uhlovodíky mizí, to platí pro všechny porosty. Zajímavým aspektem je, že horizont L lípy vykazoval nejsilnější pík alifatických uhlovodíků ($\pm 2990 \text{ cm}^{-1}$). U pásma C=O kyseliny a ketonů jsou ve svrchních horizontech píky silně vzrůstající, horizont F buku značí nejvyšší vzrůst okolo $\pm 1720 \text{ cm}^{-1}$. Pásma C=O amidů I a chinonů ($\pm 1620 \text{ cm}^{-1}$) jsou prvním výrazným píkem na pravé straně spektra, kde nejvyšší pík značí horizont F buku. Co se týče aromatických uhlovodíků ($\pm 1520 \text{ cm}^{-1}$), ty nejsou na první pohled zaznamenány. Viditelnější jsou ve svrchnějších horizontech, u horizontu A nebývá rozpoznán. Za druhý nejvýraznější pík je považováno pásmo alkoholů a polysacharidů ($\pm 1100 \text{ cm}^{-1}$). Tato pásma se liší u každého porostu, povětšinou však svrchní horizonty mají zastoupení větší než horizonty hlubší.

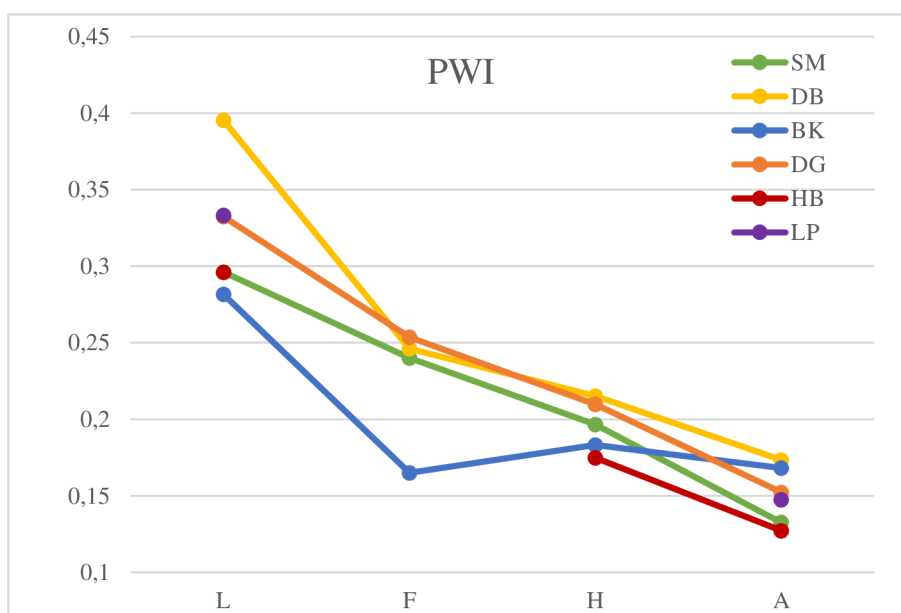


Obrázek 20 - DRIFTS spektra všech odebraných horizontů

Díky vypočtení indexu smáčivosti (PWI) se zjistilo, že méně smáčivé jsou svrchnější horizonty. Pokud bychom však porovnávali porosty mezi sebou, lehce se dá z grafu (obr. 21) vyčíst, že horizont L dubu vykazuje nejmenší smáčivou vlastnost a největší smáčivost projevují téměř všechny horizonty buku. Zajímavým jevem u buku je menší smáčivost horizontu H a A, než je tomu u horizontu F. Ostatní porosty jeví podobnou smáčivost, a ta se s hloubkou zvyšuje, tím se tedy v nejhlubších horizontech rozdíly ve smáčivosti vytrácí. Z analýzy rozptylu (viz příloha 3) jednoduše vyčíst, že v porovnání mezi jednotlivými horizonty nejméně smáčivé vyšly L horizonty a nejvíce A horizonty.

Tabulka 7 – Index smáčivosti (PWI)

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	0,296 ± 0,0092	0,395 ± 0,0162	0,282 ± 0,0135	0,332 ± 0,0039	0,296 ± 0,0048	0,333 ± 0,0058
F	0,240 ± 0,0071	0,216 ± 0,0300	0,165 ± 0,0205	0,254 ± 0,0257	-	-
H	0,197 ± 0,0207	0,198 ± 0,0173	0,183 ± 0,0183	0,210 ± 0,0003	0,175 ± 0,0199	-
A	0,132 ± 0,0004	0,173 ± 0,0046	0,168 ± 0,0073	0,152 ± 0,0169	0,127 ± 0,0054	0,147 ± 0,0088

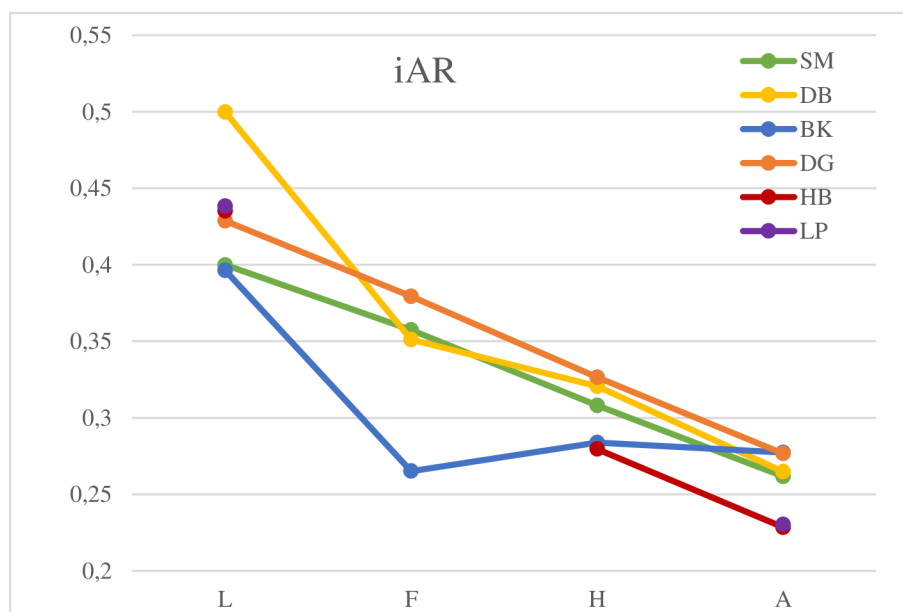


Obrázek 21 - PWI

Stejně jako u předchozího grafu jsou u indexu aromaticity největší odlišnosti v horních horizontech, ve spodním horizontu A se opět rozdílnost vytrácí. V grafu (obr. 22) můžeme vidět, že horizont L dubu vykazuje nejmenší aromaticitu oproti ostatním porostům. U buku se projevilo stejný jev jako u indexu smáčivosti, to že horizont F má největší zastoupení aromatických součástí organické hmoty v porovnání s ostatními porosty. Druhý totožný jev se projevilo u buku, kdy horizont F má větší zastoupení aromatických sloučenin oproti horizontu H a A. Ze všech dřevin se aromatické komplexy nejvíce vyskytují v horizontech A u habru a lípy. Analýza rozptylu (viz příloha 3) vyhodnotila téměř shodné značení jako tomu bylo u indexu smáčivosti, což znamená, že největší zastoupení aromatických sloučenin je v horizontech A.

Tabulka 8 – Index aromaticity (iAR)

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	0,400 ± 0,0144	0,500 ± 0,0066	0,396 ± 0,0172	0,429 ± 0,0004	0,435 ± 0,0072	0,438 ± 0,0034
F	0,357 ± 0,0019	0,320 ± 0,0308	0,265 ± 0,0204	0,379 ± 0,0202	-	-
H	0,308 ± 0,0004	0,301 ± 0,0192	0,284 ± 0,0188	0,326 ± 0,0052	0,280 ± 0,0329	-
A	0,262 ± 0,0078	0,265 ± 0,0204	0,277 ± 0,0106	0,277 ± 0,0349	0,229 ± 0,0031	0,230 ± 0,0142

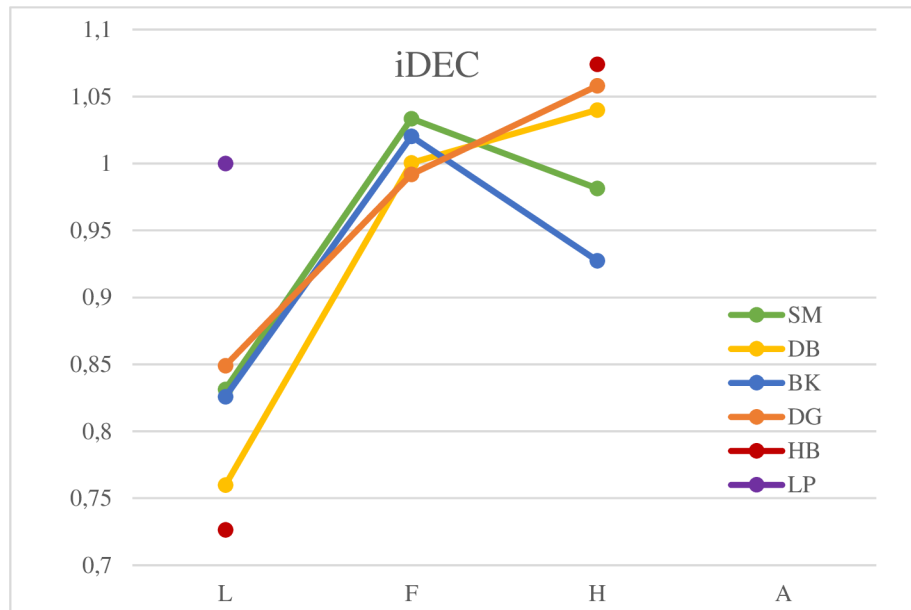


Obrázek 22 - Index aromaticity

Z grafu (obr. 23) je zjevné, že k nejméně rozložená je logicky půdní organická hmota v horizontu L. Pozoruhodným výsledkem je, že v horizontu L u lípy byl rozklad organické hmoty na úrovni jako u ostatních porostů až v horizontu F. Tudíž můžeme tvrdit, že se půdní organická hmota pod lípou nejrychleji rozkládá, což už je potvrzeno v Tabulce 2, ve které vidíme, že u lípy byly odebrány pouze vzorky ze dvou horizontů, a to L a A. Dobré rozkladné procesy má i habr. Kromě zmíněných dvou porostů v horizontu F douglaska podléhá dekompozici nejhůře a smrk nejlépe, dále také smrk a buk mají největší dekompozici v horizontu F, zatímco u ostatních dřevin je nejvýraznější až v horizontu H. V analýze rozptylu (viz příloha 3) je jednoznačně vidět, že nejnižší hodnoty byly vyznačeny v L horizontech. Jelikož horizonty L jsou složeny převážně z opadu porostů, je logické, že se jedná o horizonty s nejhorsími rozkladnými procesy půdní organické hmoty oproti dvěma zmíněným.

Tabulka 9 – Index dekompozice (iDEC)

vzorek	SM	DB	BK	DG	HB	LP
L	0,831 ± 0,0236	0,760 ± 0,0213	0,826 ± 0,0379	0,849 ± 0,0038	0,727 ± 0,0013	1,000 ± 0,0144
F	1,034 ± 0,0233	1,144 ± 0,1439	1,020 ± 0,0393	0,992 ± 0,0485	-	-
H	0,981 ± 0,0849	1,161 ± 0,1206	0,927 ± 0,1012	1,058 ± 0,1209	1,074 ± 0,1205	-



Obrázek 23 - Index dekompozice

6 Diskuse

Práce se zaměřovala na studium půdní organické hmoty nacházející se pod porosty, které byly cíleně vysazené na výsypce Antonín, v místě které byl do 70. let 20. století hnědouhelný lom. Pomocí třech měřících metod se provedly tyto analýzy – analýza půdní reakce, analýza obsahu organického uhlíku a v neposlední řadě i FTIR spektroskopie, za pomoci které se mohly stanovit tři klíčové indexy, a to indexy smáčivosti, aromaticity a dekompozice.

6.1 Půdní reakce

Výsledky prokázaly, že nejkyselější půdní horizonty jsou nejsvrchnější L horizonty. Jedná o hrabanku, ve které se nachází málo rozložených zbytků opadu. Horizonty F vyšly o něco zásaditější, jelikož se jedná o směs polorozložených částí s obsahem houbových hyf a zbytků kořínků. Opět u horizontů H došlo k větší aciditě, neboť se jedná o amorfní materiál, který je oddělený od povrchu minerální půdy. Stejnou aciditu u organických horizontů prokázala i studie Akbar et al. (2010), kdy horizont L se jevil jako kyselější než horizonty F, H a A. Každá dřevina vykazovala obdobný úkaz v daných horizontech, ovšem už dřívější studie prokázaly, že každý porost má jiné pH. Například studie Finzi et al. (1998) uvádí, že procesy, které se podílejí na změnách pH a výměně kationtů mezi druhy jsou; 1) mezidruhové rozdíly v produkci organických kyselin z rozkládajícího se opadu, 2) rozdíly příjmu kationtů a alokací do zásob biomasy a 3) změny v obsahu minerálů v původním materiálu. Už v roce 1966 byla zaznamenána vyšší produkce organických kyselin a nižší pH půdy v lokalitách, ve kterých se vyskytovaly druhy, jejichž opad byl relativně odolný vůči procesu rozkladu (Konova, 1966).

Také bylo zjištěno, že půdní organická hmota pod douglaskou je nejkyselější, tento výsledek vyšel v obou případech, jak extraktu demineralizovanou vodou, tak i extraktu chloridu vápenatého.

6.2 Obsah organického uhlíku

Po provedení analytického změření obsahu organického uhlíku byly získány hodnoty, které nám ukázaly, že největší zastoupení organického uhlíku v půdě je v horizontech L, tedy hrabance. Během stanovení obsahu organického uhlíku v jednotlivých porostech bylo zjištěno, že neexistují výrazné rozdíly mezi porosty, avšak mezi horizonty se už určité rozdíly objevily. Nejvyšší hodnota byla stanovena u horizontů L, u ostatních horizontů se postupně hodnoty snižovaly, čímž se potvrdilo, že v horních horizontech se nachází nejvíce půdního organického uhlíku. Horizonty L měly procentuální zastoupení uhlíku v rozmezí 27-29 %, zatímco horizonty A pouhých 6-15 %. Ve studii Gholizadeh et al. (2021) byly také odebrány vzorky půdy z jednotlivých vrstev, a to z organických horizontů L, F, H a horizontu minerálního A. Horizont A byl, na rozdíl od mých odebraných vzorků, ještě rozdělen na horizont A₁ (s mocností 2-10 cm) a A₂ (podpovrchový minerální horizont (obvykle do 40 cm)).

Průměrná koncentrace půdního organického uhlíku v horizontech L se pohybovala okolo 42,91 % a v horizontech F a H byly koncentrace nižší (38,67 % a 26,79 %). Nejnižší naměřené koncentrace však byly v horizontu A, kde se průměrná hodnota vykazovala 6,49 %. Srovnatelné výsledky vyšly ve studii Gholizadeh et al. (2023), ve které rovněž byly vzorky odebrány z pěti

horizontů, kde horizont L vykázal průměrnou koncentraci půdního organického uhlíku 43,08 %, v horizontu F a H koncentrace byla opět nižší (39,46 % a 28,80 %) a v horizontu A byla dále znatelně nižší se 4,31 %. Studie Kramer et al. (2017) odůvodňuje pokles půdního organického uhlíku směrem do hloubky postupně rostoucím mikrobiálním rozkladem.

Důvodem naměření vyššího podílu půdního organického uhlíku v jiných studiích oproti mým výsledkům mohlo spočívat v odebrání velkého počtu odebraných vzorků, nebo tím, že mé vzorky byly odebrány pouze z výsypky, kde se původně nacházel hnědouhlený lom. I přesto se ve studii Gholizadeh et al. (2023) prokázalo, že střední koncentrace půdního organického uhlíku v českých lesích je vyšší s průměrem 23,54 %, kdy s hloubkou klesá, což souhlasí i s výsledky mé práce.

6.3 FTIR spektroskopie

Spektra všech porostů na první pohled vyšly obdobně, avšak po důkladnějším vyhodnocení se objevily některé zajímavé jevy. Zprvu si lze u všech porostů všimnout pásma alifatických uhlovodíků, jež jsou vyzobrazena okolo 2990 cm^{-1} . Nejvýraznější píky jsou zaznamenány u všech porostů u horizontů L. Tento stejný jev byl zjištěn i ve studii Thai et al. (2021), ve které byly pásma alifatických uhlovodíků lesních půd dobře identifikována v porovnání s ornou půdou a půdou trvalého travního porostu. Také se ukázalo, že s větší hloubkou alifatické uhlovodíky mizí. Dále se v mých výsledných hodnotách projeví vysoké píky okolo 1620 cm^{-1} ve hlubších horizontech, kdy nejvyšší pik byl zaznamenán u horizontů A. Opačný úkaz byl změřen u pásma okolo 1100 cm^{-1} , kdy se největší píky naměřily v nejsvrchnějších horizontech. S větší hloubkou se identifikace pásma alkoholů a polysacharidů vytrácí. Zmíněná studie opět potvrzuje výsledné hodnoty, které se projeví u lesních půd. Zajímavostí je, že tento pás se projevil jako nejnižší oproti travnatým porostům a ornou půdou.

Na základě indexu smáčivosti bylo vyhodnoceno, že nejméně jsou smáčivé svrchní horizonty, jedná se o hrabanku, která špatně drží vodu, naproti tomu horizonty H a A vykazují dobrou smáčivost. Čím se jde více do hloubky, tím jsou horizonty smáčivější, v důsledku čehož se i u horizontu H a A vytrácejí rozdíly mezi porosty. Výsledky studie Thai et al. (2023) ukázaly, že index smáčivosti statisticky klesal s větší hloubkou. Tím se potvrdilo, že organické horizonty (F a H horizonty) měly nižší smáčivost než horizonty minerální (A a B horizonty). V mých výsledcích nejvyšší naměřená hodnota indexu smáčivosti byla u dubu, níže u douglasky a lípy, následně smrku a nejniž naměřenou hodnotu, tudíž s největší smáčivou vlastností vyšel buk a habr. Porozuhodným výsledkem byl projev habru, který prokázal největší smáčivost oproti ostatním porostům. Vysoká smáčivost je v důsledku hustého prokořenění habru v půdním profilu, výrazně se díky tomu zvyšuje infiltrační schopnosti půdy pod porostem. Oproti tomu charakteristickým rhizologickým znakem dubu je řidší soustava kratších horizontálních kořenů s hlavním silným křulovým kořenem, čímž může být způsobeno, že se horizonty dubu projeví jako nejméně smáčivé (Čermák & Ondráček, 2009).

Nejvyšší hodnoty indexu aromaticity byly vyhodnoceny u dubu v horizontu L, čímž bylo potvrzeno, že se v horizontu nachází nejméně aromatických sloučenin. Naopak buk se projevil jako porost s nejvýraznější aromaticitou, což potvrdil kupříkladu horizont F, který vykazoval větší aromaticitu než u ostatních porostů horizont H. Lze také vyzdvihnout aromatické slouče-

niny vyskytující se v horizontech A u habru a lípy, kde se sloučeniny vyskytují nejvíce v porovnání s ostatními porosty. Výsledky indexu aromaticity vyšly téměř shodně s výsledky u indexu smáčivosti. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u douglasky, následně u dubu, poté u smrku a lípy, u habru a nejnižší hodnota u buku, kde opět se prokázalo u buku, že má největší zastoupení aromatických látek. Porovnání mezi horizonty vyšlo taktéž shodně jako u indexu smáčivosti. Studie Thai et al. (2023), po vyhodnocení výsledků, také uvádí, že index aromaticity výrazně klesal s rostoucí hloubkou půdního profilu. To znamená, že obsah aromatických sloučenin s hloubkou roste.

Podle indexu dekompozice byla vyhodnocena nejmenší úroveň rozkladu půdní organické hmoty v horizontech L. Nejrychlejší rozkladné procesy půdní hmoty se projeví u lípy, ale také i u habru, což opět potvrzuje již zmíněnou absenci horizontů F a H. Podle Dimitrovského (1999) je habr obecný dřevinou s velmi aktivním půdotvorným účinkem a lípa srdčitá je popisována jako dřevina s aktivním půdotvorným účinkem. Z ostatních porostů horizonty douglasky podléhají nejméně dekompozici, roli v tom může hrát kyselé prostředí pod samotným porostem. Studie Haberhauser et al. (1998) prokázala, že vytrácení absorpčních píků přibližně okolo 1100 cm^{-1} popisuje rozkladné procesy lesních zbytků. Stejně výsledky se v určitých letech ukázaly i ve studii Thai et al. (2023). Hodnoty indexu dekompozice nevykázaly při porovnání jednotlivých porostů žádný významný statistický rozdíl, ovšem při porovnávání jednotlivých horizontů vyšly hodnoty vyšší u horizontů F a H, zatímco u horizontů L nižší.

7 Závěr

- Cílem předložené práce bylo popsat přeměny organické hmoty nadložních horizontů lesních půdy, porovnat základní chemické a fyzikální vlastnosti horizontů lesních půd pod porosty, které se mezi sebou liší kvalitativními vlastnostmi opadu. Dále porovnat vlastnosti půdní organické hmoty zmíněných horizontů za pomoci FTIR spektroskopie, a následně z výsledných hodnot zhodnotit, zda je FTIR spektroskopie vhodná pro pedologický výzkum.
- Stanovené hypotézy byly dvě: první, zda kvalita opadu hraje klíčovou roli v transformačních procesech půdní organické hmoty, které lze následně zdokumentovat pomocí FTIR spektroskopie, a druhá zda organická hmota hlubších organických horizontů obsahuje stabilnější látky a rozdílnost mezi porosty různých dřevin se vytrácí.
- Výsledky prokázaly, že pH půdní organické hmoty je u buku a lípy zásaditější v porovnání se smrkem nebo dubem. Nejnižší pH půdní organické hmoty bylo zjištěno u harbru a douglasky. Dále bylo potvrzeno, že půdy pod porosty různých dřevin obsahují obdobné množství organického uhlíku. Ovšem při porovnání horizontů všech porostů mezi sebou bylo dokázáno, že svrchnější horizonty obsahují více organického uhlíku než je tomu u horizontů spodních. Po provedení FTIR spektroskopie a vypočtením indexu smáčivosti se prokázala největší smáčivost u buku a harbru, nejnižší u dubu, či douglasky. Výsledné hodnoty indexu aromaticity vyšly téměř shodně s výsledky indexu smáčivosti. Největší zastoupení aromatických komplexů je u buku, či harbru, nejméně jich bylo zjištěno u dubu a douglasky. Výsledné hodnoty neprokázaly žádnou významnou rozdílnost v rozkladných procesech mezi jednotlivými porosty, ovšem po porovnání jednotlivých horizontů se objevily hodnoty vyšší u horizontů F a H, zatímco u horizontů L nižší. Důvodem nízkého rozkladu hmoty u horizontů L je, že se v této vrstvě jedná o čerstvý opad.
- Po popisu a zpracování výsledků je tedy zjevné, že kvalita opadu hraje velkou roli ve vlastnostech půdy (pH) a půdní organické hmoty (aromaticita, smáčivost). Vlastnosti půdní organické hmoty tedy lze dokumentovat pomocí FTIR spektroskopie. Dále bylo zjištěno, že organická hmota v hlubších horizontech obsahuje stabilnější a více aromatické látky. Rozdílnost mezi porosty různých dřevin se se vzrůstající hloubkou půdy vytrácí, čímž byly splněny stanovené cíle a potvrzeny všechny hypotézy.

8 Literatura

- Abdullahi, A. C., Siwar, C., Shaharudin, M. I., Anizan, I. 2018. Carbon Sequestration in Soils: The Opportunities and Challenges. In: Carbon Capture, Utilization and Sequestration (pp. 3–15). InTech.
- Akbar, M.H., Ahmed, O.H., Jamaluddin, A.S., Nik, N.M., Abdul-Hamid, H., Jusop, S., Hassan, 590 A., Yusof, K.H., Abdu, A., 2010. Differences in soil physical and chemical properties of 591 rehabilitated and secondary forests. *Am. J. Appl. Sci.* 7, 1200–1209.
- Blum, W., Schad, P. and Nortcliff, S. 2020. Essentials of Soil Science: Soil Formation, Functions, use and Classification (World Reference Base, WRB). *Stuttgart: Schweizerbart Textbooks, May 26 Ebook Central*. ISBN 9783443010904; 9783443011291.
- Brady N. C., Weil R. R. 1999. The nature and properties of soil. Prentice-Hall, Inc., *Upper Saddle River*. 881p.
- Čermák, P., Ondráček, V. 2009. Stanovištní a fyziologické vlastnosti dřeva využívaných při zalesňování výsypek severočeské hnědouhelné pánve. *Metodika. VÚMOP Praha*.
- Derrick, Michele R., Stuhlik, Dusan; Landry, James M. 1999. Infrared Spectroscopy in Conservation Science. Los Angeles : *The Getty Conservation Institute*, 235 s. ISBN 0-89236-469-6.
- De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E., Carnicelli, S. 2015. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. *Geoderma*, 251, 33-46.
- Dimitrovský, K. 1999. Zemědělské lesnické a hydrické rekultivace území ovlivněných báňskou činností. *ÚZPI, Metodiky pro zemědělskou praxi č.14*.
- Dimitrovský, K., Kunt, M., Vacek, O. 2016. Geneze antropogenních substrátů na výsypkách jako základ pro vytvoření lesnické rekultivační typologie. *Zpravodaj Hnědé uhlí*, 2016 (1): 39 - 51.
- Egeria. 2021. Arboretum Antonín. CZECH-BAVARIAN GEOPARK. *CZECH-BAVARIAN GEOPARK*. [online]. [cit. 15.11.2021] Dostupné z: <http://www.geopark.cz/arboretum-antonin>
- Ellerbrock, R. H., Gerke, H. H., Bachmann, J., Goebel, M. O. 2005. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 57-66.
- Erb, K. H. 2004. Land use–related changes in aboveground carbon stocks of Austria’s terrestrial ecosystems. *ecosystems*, 7(5), 563-572.
- Finzi, A. C., Canham, C. D., & Van Breemen, N. 1998. Canopy tree–soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. *Ecological applications*, 8(2), 447-454.
- Foth, H. 1990. Fundamentals of soil science. 8. vyd. New York: Wiley, 360 s. ISBN 04-715-2279-1.

- Gholizadeh, A., Rossel, R. A. V., Saberioon, M., Borůvka, L., Kratina, J., Pavlů, L. 2021. National-scale spectroscopic assessment of soil organic carbon in forests of the Czech Republic. *Geoderma*, 385, 114832.
- Gholizadeh, A., Saberioon, M., Pouladi, N., Ben-Dor, E. 2023. Quantification and depth distribution analysis of carbon to nitrogen ratio in forest soils using reflectance spectroscopy. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 112-124.
- Griffiths, Peter. R., de Haseth, James A. 2007. Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2nd ed. Hoboken: Wiley, ISBN 978-0-471-19404-0.
- Haberhauer, G., Rafferty, B., Strebl, F., Gerzabek, M. H. 1998. Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy. *Geoderma*, 83(3-4), 331-342.
- Hillel, D. 2007. *Soil in the environment: crucible of terrestrial life*. Elsevier.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkien, K., Byrne, K. A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma*, 137(3-4), 253-268.
- Johnson, D. W., Susfalk, R. B., Caldwell, T. G., Murphy, J. D., Miller, W. W., Walker, R. F. 2004. Fire effects on carbon and nitrogen budgets in forests. *Biogeochemical Investigations of Terrestrial, Freshwater, and Wetland Ecosystems across the Globe*, 263-275.
- Kania, P. 2007. Infračervená spektrometrie. *PRAHA: VŠCHT PRAHA* [cit. 25.1.2022]. Dostupné z: [https://www. vscht. cz/files/uzel/0005766/Infra% C4% 8Derven% C3% A1+ spektrometrie. pdf](https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf).
- Khan, S., Schnitzer, M. 1978. Developments in Soil Science 8: SOIL ORGANIC MATTER. First edition. New York: Elsevier science publishing company inc., 1978.
- Knohl, A., Kolle, O., Minayeva, T. Y., Milyukova, I. M., Vygodskaya, N. N., Foken, T., Schulze, E. D. 2002. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology*, 8(3), 231-246.
- Koch, B. P., Dittmar, T. 2006. From mass to structure: An aromaticity index for high-resolution mass data of natural organic matter. *Rapid communications in mass spectrometry*, 20(5), 926-932.
- Konova, M. 1966. Soil organic matter: its nature, its role in soil formation, and soil fertility. Pergamon, New York, New York, USA.
- Kramer, M. G., Lajtha, K., Aufdenkampe, A. K. 2017. Depth trends of soil organic matter C: N and ¹⁵N natural abundance controlled by association with minerals. *Biogeochemistry*, 136, 237-248.
- Larkin, Peter. 2011. Infrared and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation. 1st Edition. San Diego : Elsevier, 230 s. ISBN 978-0-12- 386984-5.
- Lukac, M., Godbold L. D. 2011. *Soil Ecology in Northern Forests : A Belowground View of a Changing World*, Cambridge University Press
- Matamala, R., Calderón, F. J., Jastrow, J. D., Fan, Z., Hofmann, S. M., Michaelson, G. J.,

- Mishra, U., Ping, C. L. 2017. Influence of site and soil properties on the DRIFT spectra of northern cold-region soils. *Geoderma*, 305, 80-91.
- Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J. A., Vanguelova, E. I., Vesterdal, L. 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 466, 118127.
- Mentlík, Václav, a kol. 2008. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha : BEN-technická literatura, 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- Němec, I. 2008. Instrumentace infračervené spektroskopie. *Praha: Karlova univerzita v Praze*. [cit. 3.12.2022] Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/~agnemec/Instrumentace%20IR.pdf>
- Němeček, J., Vokoun, J., Smejkal, J., Macků, J., Kozák, J., Němeček, K., Borůvka, L. 2004. Taxonomický klasifikační systém půd ČR. Taxonomický klasifikační systém půd ČR [online]. [cit. 9.2.2023] Dostupné z: <https://klasifikace.pedologie.czu.cz/>
- Pavia, Donald L., Lampman, Gary M., Kriz, George S. 2009. Introduction to Spectroscopy. Fourth Edition. Belmont : Cengage Learning, 727 s. ISBN 978-0-495-11478-9.
- Pavlů, L., Mühlhansellová, M. 2018. Differences in humic acids structure of various soil types studied by DRIFT spectroscopy. *Soil and Water Research*, 13(1), 29-35.
- Pavlů, L. Nicolet iS10 (Thermo Scientific, USA) | Katedra pedologie a ochrany půd. Stránky kateder a útvarů ČZU [online]. Copyright © 2023 [cit. 20.02.2023]. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kpop/pristrojove-vybaveni-katedry/nicolet-is10-thermo-scientific-usa?editmode=0>
- Percy, K. E., Awmack, C. S., Lindroth, R. L., Kubiske, M. E., Kopper, B. J., Isebrands, J. G., Pregitzer, K. S., Hendrey, G. R., Dickson, R. E., Zak, D. R., Oksanen, E., Sober, J., Harrington, R., Karnosky, D. F. 2002. Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO₂ and O₃. *Nature*, 420(6914), 403-407.
- Podrázský, V., Fulín, M., Prknová, H., Beran, F., Třešník, M. 2016. Changes of agricultural land characteristics as a result of afforestation using introduced tree species. *Journal of Forest Science*, 62 (2): 72-79.
- Podrázský, V., Vacek, O., Kunt, M., Dimitrovský, K., Vacek, S., Vacek, Z., Remeš, J., Pulkrab K. 2019. Využití multifunkčního potenciálu rekultivačního lesnického arboreta Antonín – Sokolov. Závěrečná zpráva projektu GS LČR č. 13/2016. Praha: ČZU.
- Rejšek, K. Lesnická pedologie. Učební texty. Brno: nakladatelství MZLU, 1999, ISBN 80-7157-352-3.
- Richter, R. 2004. Humifikované organické látky. *Ústav agrochemie a výživy rostlin, MZLU*. Brno. [cit. 10.1.2023] Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vy-ziva-rostlin/html/agrochemie_pudy/ol_humifikovane.htm

- Rojík, P., Řehoř, M., 2013. Rekultivační substráty Sokolovska. *Zpravodaj Hnědé uhlí*, 4/2013, pp. 19-25.
- Sahrawat, K. Á. 2000. Elemental composition of the rice plant as affected by iron toxicity under field conditions. *Communications in soil science and plant analysis*, 31(17-18), 2819-2827.
- Sáňka, M., Vácha, R., Poláková, Š., Fiala, P. 2018. Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Praha. Ministerstvo životního prostředí, 2018. ISBN isbn978-80-7212-627-9.
- Sedjo, R., Sohngen, B. 2012. Carbon Sequestration in Forests and Soils. *Annual Review of Resource Economics*, 4(1), 127–144
- Smith, Brian C. 1999. *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. Boca Raton: CRC Press, ISBN 0-8493-2463-7.
- Smith, Brian C. 2011. *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. Second Edition. Boca Raton : CRC Press, 207 s. ISBN 978-1-4200-6930-3.
- Stevenson, F. J. 1994. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.
- Stuart, Barbara H. 2004. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. 1st Edition. Chippingham : John Wiley and Sons, 242 s. ISBN 978-0-470-85428- 0.
- Šimek, M. 2019. *Živá půda*. Praha: Academia. ISBN 987-80-200-2976-8
- Šimek, M., Hynšt, J., Malý, S. 2021. *Živá půda 9. Cyklus uhlíku a půdní organická hmota*, Praha. Nakladatelství Academia, *Živa* 14, str. 174. ISSN 0044-4812
- Taraba, B. 2008. *Struktura pevných látek*. Ostrava: *Ostravská univerzita v Ostravě. Editace elektronické verze: Lenka Sedlaříková*. [cit. 29.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Boleslav_Taraba/publication/47087820_Chemicka_struktura_pevne_faze/links/54ae1b300cf24aca1c6f7441.pdf
- Tasumi, M., 2014. *Introduction to Experimental Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Practical Methods*. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, Nov 17 Ebook Central. ISBN 9780470665671; 9781118703564
- Thai, S., Davidek, T., Pavlů, L. 2022. Causes clarification of the soil aggregates stability on mulched soil. *Soil and Water Research*, 17(2), 91-99.
- Thai, S., Pavlů, L., Tejnecký, V., Chovancová, S., Hin, L., Thet, B., Němeček, K., Drábek, O. 2023. Temporal Changes in Soil Chemical Compositions in Acidified Forest Soils. Available at SSRN 4169421.
- Tinti, A., Tugnoli, V., Bonora, S., & Francioso, O. (2015). Recent applications of vibrational mid-Infrared (IR) spectroscopy for studying soil components: a review. *Journal of Central European Agriculture*, 16(1), 0-0.
- USDA. 2023. A Soil Profile. Natural Resources Conservation Service. Home. [cit. 10.2.2023]

Dostupné z: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/a-soil-profile>

- Valla, M. a kol. 2002. *Pedologické praktikum*. 2. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, ISBN isbn:978-80-213-0914-2.
- Vavříček, D., Kučera, A. 2014. Lesnická pedologie pro posluchače LDF Mendelu v Brně. *Ústav geologie a pedologie*, 176.
- Vokoun, J. a kol. 2002. Příručka pro průzkum lesních půd. Taxonomický klasifikační systém půd ČR (Jan Němeček a kol.) v lesnické praxi. *Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandyš nad Labem*, 43 s.
- Wei, X., Shao, M., Gale, W., & Li, L. (2014). Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific reports*, 4(1), 1-6.

9 Samostatné přílohy

9.1 Obrazová dokumentace studovaných lokalit



Smrk ztepilý



Dub letní



Buk lesní



Douglaska tisolistá



Habr obecný



Lípa srdčitá

9.2 Tabulka naměřených hodnot

	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	Cox%	PWI	iAR	iDEC
SM A1	6,30	5,70	6,83	0,13	0,25	
SM A2	5,52	5,05	6,83	0,13	0,27	
DB A1	7,01	6,44	6,76	0,18	0,29	
DB A2	5,99	5,46	24,37	0,17	0,24	
BK A1	6,26	5,74	8,99	0,16	0,27	
BK A2	6,77	6,23	6,19	0,18	0,29	
DG A1	4,93	4,41	6,22	0,17	0,31	
DG A2	6,63	6,15	6,73	0,14	0,24	
HB A1	6,02	5,30	10,43	0,12	0,23	
HB A2	6,29	5,76	13,04	0,13	0,23	
LP A1	6,78	6,14	13,52	0,14	0,22	
LP A2	6,70	6,02	13,78	0,16	0,24	
SM F1	6,49	5,87	24,93	0,25	0,36	1,01
SM F2	5,97	5,63	33,77	0,23	0,36	1,06
DB F1	6,31	5,71	19,79	0,19	0,29	1,29
DB F2	6,23	5,60	26,54	0,25	0,35	1,00
BK F1	6,54	5,73	26,94	0,19	0,30	0,98
BK F2	6,27	5,57	27,76	0,14	0,23	1,06
DG F1	6,03	5,32	29,21	0,23	0,36	1,04
DG F2	5,78	4,98	29,23	0,28	0,40	0,94
SM H1	6,14	5,57	18,62	0,18	0,31	1,07
SM H2	6,08	5,55	24,49	0,22	0,31	0,90
DB H1	6,13	5,46	20,41	0,18	0,28	1,28
DB H2	6,02	5,45	25,68	0,22	0,32	1,04
BK H1	6,05	5,28	24,27	0,20	0,30	0,83
BK H2	5,95	5,33	28,25	0,16	0,27	1,03
DG H1	5,05	4,26	26,37	0,21	0,32	0,94
DG H2	5,64	4,94	24,99	0,21	0,33	1,18
HB H1	6,45	5,56	18,44	0,19	0,31	0,95
HB H2	5,75	5,11	27,20	0,15	0,25	1,19
SM L1	5,76	5,20	27,56	0,29	0,39	0,86
SM L2	5,66	5,36	28,07	0,31	0,41	0,81
DB L1	5,42	4,84	30,02	0,41	0,51	0,74
DB L2	5,44	5,00	29,61	0,38	0,49	0,78
BK L1	6,15	5,41	28,59	0,30	0,41	0,86
BK L2	6,00	5,47	29,81	0,27	0,38	0,79
DG L1	4,91	4,46	28,32	0,34	0,43	0,85
DG L2	4,85	4,40	30,41	0,33	0,43	0,85
HB L1	5,31	4,50	28,73	0,30	0,43	0,73
HB L2	4,84	4,16	30,96	0,29	0,44	0,73
LP L1	6,03	5,55	28,12	0,33	0,43	1,01
LP L2	6,26	5,70	31,10	0,34	0,44	0,99

9.3 Zhodnocení rozdílů mezi variantami půdních horizontů a porostů jednotlivých dřevin pomocí vícecestné analýzy rozptylu

Fisher LSD; alfa = 0,05; červeně jsou hodnoty F, dokumentující průkazný vliv daného třídícího kritéria na distribuci hodnot dané veličiny

	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	Cox	PWI	iAR	iDEC
	F průkaznost	F průkaznost	F průkaznost	F průkaznost	F průkaznost	F průkaznost
porost	5,95 ***	6,09 ***	0,38	3,51 *	2,34	1,70
horizont	9,52 ***	8,05 ***	53,66 ***	79,79 ***	59,55 ***	15,87 ***
SM	ab	a	a	bc	abc	a
DB	ab	a	a	a	ab	a
BK	a	a	a	c	c	a
DG	c	b	a	ab	a	a
HB	bc	b	a	c	bc	a
LP	a	a	a	ab	abc	a
L	c	c	a	a	a	b
F	ab	ab	ab	b	b	a
H	b	bc	b	b	b	a
A	ab	ab	c	c	c	