

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Hodnocení obsahů a zásob vybraných prvků
v lesních půdách České republiky**

Diplomová práce

Bc. Šárka Sokolářová

Rozvoj venkovského prostoru

prof. Dr. Ing. Luboš Borůvka

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Hodnocení obsahů a zásob vybraných prvků v lesních půdách České republiky" 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 13.4.2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Dr. Ing. Luboši Borůvkovi za odborné vedení práce a cenné rady. Poděkování patří také mé rodině a přátelům za podporu po celou dobu psaní diplomové práce i celého navazujícího magisterského studia.

Hodnocení obsahů a zásob vybraných prvků v lesních půdách České republiky

Souhrn

Cílem této diplomové práce bylo na základě literatury a hodnocení výsledků analýz půdních vlastností popsat zásobu prvků v půdách České republiky a konkrétněji pak pro oblast Jizerských hor. Práce je rozdělena na literární rešerši, metodickou část a část výsledků a diskusi.

V literární rešerši jsou nejprve popsány vlastnosti lesních půd, kterou lze rozdělit na organické horizonty a minerální horizonty. Dále jsou popsány zásoby prvků v lesních půdách, konkrétně se jedná o uhlík, vápník, hořčík, draslík a fosfor. Nakonec byl popsán vliv stanovištních podmínek na zásoby zmíněných prvků v lesních půdách. Ze stanovištních podmínek byl zjištěn především vliv nadmořské výšky nebo druhu porostu – listnatý, jehličnatý, tak i smíšený.

Metodická část práce popisuje nejprve přírodní podmínky České republiky a poté konkrétněji také oblasti Jizerských hor, které jsou důležité pro pochopení variability v zásobách prvků na různých stanovištích. Dále byly popsány metodiky odběrů a vyhodnocení vzorků všech institucí, které se podílely na výzkumu v rámci projektu „Vývoj a verifikace prostorových modelů vlastností lesních půd v České republice“, který probíhal mezi lety 2019 a 2021, přičemž sběr dat probíhal mezi lety 2000 a 2020 po celém území České republiky. Instituce podílející se na zmíněném projektu byly Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Česká zemědělská univerzita v Praze, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy a Masarykova univerzita v Brně, s využitím výsledků Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů a Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského. Pro doplnění byly uvedeny metodiky tvorby map, které byly použity pro vyhodnocení výsledků v této práci. Metodická část práce zahrnuje také metodiku statistického vyhodnocení dat pro potvrzení stanovených hypotéz a hodnotící kritéria koncentrací a zásob prvků, která byla využita pro vyhodnocení obsahů a zásob prvků v lesních půdách.

Výsledky byly popsány prostřednictvím grafů a tabulek a s využitím poznatků získaných v literární rešerši byly dále vyhodnoceny pro posouzení pravdivosti stanovených hypotéz. Výsledky byly dále doplněny mapami rozložení zásob jednotlivých prvků v rámci České republiky.

V části diskuse byly výsledky porovnány s dalšími studii, zabývajícími se podobnou tematikou, které sloužily pro podpoření správnosti vyhodnocení hypotéz. Byl zaznamenán nízký obsah přístupného fosforu v minerálním horizontu lesních půd. Zásoby prvků v minerální vrstvě půd byly vyšší spíše v půdách listnatých lesů v porovnání s jehličnatými. Vyšší zásoby prvků byly zaznamenány v minerálních horizontech než v horizontech organických, přičemž se zásoba v minerálních horizontech s nadmořskou výškou snižovala.

Klíčová slova: lesní půdy, půdní organický uhlík, živiny, stanoviště

Evaluation of content and stocks of selected elements in forest soils of the Czech Republic

Summary

The aim of this thesis was to describe the supply of elements in the soils of the Czech Republic and more specifically for the area of the Jizera Mountains, based on the literature and evaluation of analysis results of soil properties. The thesis consists of a literature review, a methodological part and a part of the results and discussion.

The literature review first describes the properties of forest soils, which can be divided into organic horizons and mineral horizons. The stocks of elements in forest soils are also described, namely carbon, calcium, magnesium, potassium and phosphorus. At the end of this part, the effect of stand conditions on the stocks of the mentioned elements in forest soils was described. In the case of stand conditions, the effect of altitude or the type of vegetation – deciduous, coniferous, and mixed – was mainly found.

The methodological part of the thesis first describes the natural conditions of the Czech Republic and then, more specifically, of the Jizera Mountains, which are important for understanding the variation in element stocks on different stands. Furthermore, the sampling and evaluation methodologies of all institutions that participated in the research as part of the project "Development and verification of spatial models of forest soil properties in the Czech Republic", which took place between 2019 and 2021, while data collection took place between 2000 and 2020 all over the Czech Republic, were described. The institutions involved in the mentioned project were the Forestry and Game Management Research Institute, the Czech University of Life Sciences Prague, Research Institute for Soil and Water Conservation and the Masaryk University Brno, using the results of the Forest Management Institute and the Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture. For addition, the map creation methodologies were presented. These methodologies were used to evaluate the results in this thesis. The methodological part of the thesis also includes the methodology of statistical evaluation of data to confirm established hypotheses and evaluation criteria of content and stocks of elements, which were used to evaluate the content and stocks of elements in forest soils.

The results were described through graphs and tables. Using the knowledge obtained in the literature review, they were further evaluated to assess the veracity of the established hypotheses. The results were further supplemented with maps of the distribution of stocks of selected elements within the Czech Republic.

In the discussion, the results were compared to other studies dealing with similar topics. The studies helped to support the correctness of the evaluation of the hypotheses. A low content of available phosphorus in the mineral horizon of forest soils was recorded. The stocks of elements in the mineral layer of the soil were higher in the soils of deciduous forests compared to coniferous ones. Higher stocks of elements were recorded in the mineral horizons than in the organic ones, with the stock in the mineral horizons decreasing with elevation.

Keywords: forest soils, soil organic carbon, nutrients, habitat

Obsah

1	Úvod	1
2	Vědecké hypotézy a cíle práce	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Půda	3
3.1.1	Lesní půda	3
3.1.1.1	Nadložní organický horizont	5
3.1.1.2	Minerální půdní horizonty	6
3.2	Zásoby prvků v lesních půdách	6
3.2.1	Zásoby uhlíku	7
3.2.2	Zásoby živin	11
3.2.2.1	Vápník	11
3.2.2.2	Hořčík	13
3.2.2.3	Draslík	14
3.2.2.4	Fosfor	14
3.3	Vliv stanovištních podmínek na obsahy a zásoby prvků v půdě	15
3.3.1	Vliv druhu porostu	16
3.3.1.1	Listnaté lesy	17
3.3.1.2	Jehličnaté lesy	17
3.3.1.3	Smíšené lesy	19
3.3.2	Vliv nadmořské výšky	19
4	Materiál a metody	21
4.1	Charakteristika České republiky	21
4.2	Charakteristika Jizerských hor	21
4.3	Odběr vzorků a metodika analýz	24
4.3.1	ÚKZÚZ	24
4.3.2	VÚLHM	24
4.3.2.1	Plošný monitoring zdravotního stavu lesa	25
4.3.2.2	Intenzivní monitoring lesních ekosystémů	25
4.3.3	ÚHÚL	26
4.4	Metodika zpracování dat	26
4.5	Hodnotící kritéria koncentrací a zásob prvků	27
5	Výsledky	29
5.1	Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách České republiky a jednotlivých oblastí	29
5.1.1	Uhlík	29
5.1.2	Živiny	34

5.2	Vliv stanovištních podmínek na zásoby prvků v lesních půdách	39
5.2.1	Vliv lesních vegetačních stupňů	39
5.2.2	Vliv druhu porostu	43
5.3	Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách Jizerských hor	46
5.4	Srovnání obsahů a zásob prvků v Jizerských horách s hodnotami celé České republiky	47
6	Diskuse	52
6.1	Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách České republiky.....	52
6.1.1	Uhlík	52
6.1.2	Živiny.....	52
6.2	Vliv stanovištních podmínek na koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách	54
6.2.1	Vliv nadmořské výšky a lesních vegetačních stupňů	55
6.2.2	Vliv druhu porostu	55
6.3	Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách Jizerských hor	57
6.4	Srovnání obsahů a zásob prvků v Jizerských horách s hodnotami celé České republiky	57
6.5	Možné důsledky nepříznivého stavu lesních půd	58
7	Závěr	60
8	Literatura.....	61
9	Seznam obrázků	68
10	Seznam tabulek	70
11	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	71

1 Úvod

Půdu, jako neobnovitelný přírodní zdroj, je potřeba chránit před všemi formami degradace, jako je eroze, kontaminace, úbytek organické hmoty, acidifikace nebo zasolení. Nedostatečný obsah prvků a živin v půdě lze zařadit také jako jednu z forem degradace. Při nedostatečném obsahu živin nemůže půda plnit své základní funkce – produkční ani mimoprodukční. Produkční funkce půdy představuje především zajištění obživy obyvatelstva prostřednictvím zemědělství, nebo jako zdroj surovin. Mezi mimoprodukční funkce půdy se řadí tvorba prostředí pro život organismů, rozklad různých škodlivých látek, infiltrace vody nebo transportní funkce. Další mimoprodukční funkcí půdy je například kulturní funkce, která představuje jakýsi historický deník vývoje půdního horizontu a klimatu v čase. Lesní půdy plní obdobné funkce jako půdy zemědělské, ovšem v lesích lze navíc očekávat díky stromovému porostu vhodnější protierozní podmínky, vyšší biodiverzitu rostlin i organismů či klimatickou stabilitu ekosystému.

Produkcí a zdravotní stav lesů ovlivňuje mnoho proměnných, mimo jiné například kvalita půdy. Kvalitu půdy lze pozorovat na úrovni chemické, fyzikální nebo biologické. Mezi hodnocení chemických vlastností půd patří stanovení obsahů a zásob živin v půdě, které je důležitým krokem k zajištění správné výživy lesních porostů. Obsah prvků a živin v půdách, ať už lesních nebo i zemědělských, hraje velmi významnou roli ve vývoji rostlin a dalších oblastech. K nejdůležitějším prvkům v lesních půdách z hlediska výživného stavu lesních porostů patří kromě uhlíku také makroprvky jako vápník, hořčík, draslík nebo fosfor. Při nedostatku některého z těchto prvků v půdě může docházet k postupné degradaci půdy a s ní spojeným poškozením rostlin. Poškození rostlin a zastavení jejich růstu dále může mít za následek ekonomické ztráty, ale i ztráty v oblasti ekologické a společenské. Zdrojem těchto základních makroprvků prvků je nejčastěji matečná hornina nebo atmosférická depozice. V případě lesních porostů lze často pozorovat poměrně uzavřený koloběh těchto prvků, kdy prostřednictvím listového opadu se zpět do půdy dostávají živiny, které jsou dřevinami využívány k dalšímu růstu. Sklizní a těžbou je uzavřený koloběh zásob makroprvků narušován a může tak docházet k nedostatku živin v lesních půdách. Zásoba a potřeba živin se liší mezi různými typy lesních porostů, v různých nadmořských výškách a na různých lokalitách.

Cílem předkládané diplomové práce je posoudit úroveň obsahu a zásob zmíněných makroprvků a také zhodnotit vliv různých faktorů na tyto zásoby prvků v lesních půdách České republiky a na vybraném území Jizerských hor.

2 Vědecké hypotézy a cíle práce

Hypotézy:

- Většina lesních půd vykazuje nízký obsah přístupného hořčíku a fosforu.
- Zásoby živin v půdách pod listnatými lesy jsou vyšší než v půdách pod jehličnatými porosty.
- V lesních půdách vyšších poloh je vyšší zásoba organického uhlíku a živin uložena v nadložních organických horizontech, zatímco v půdách nižších poloh je vyšší zásoba v minerálních půdních horizontech.
- V Jizerských horách se vyskytuje větší zásoba organického uhlíku a živin na jednotku plochy ve srovnání se středními hodnotami celé České republiky.

Cíle práce:

- Zhodnotit celkovou úroveň obsahu a zásoby organického uhlíku a přístupných a celkových živin v lesních půdách České republiky a ve vybraném území Jizerských hor.
- Posoudit vliv hlavních faktorů ovlivňujících obsahy a zásoby organického uhlíku a živin v lesních půdách (nadmořská výška, druh porostu aj.).
- Zhodnotit rozložení obsahu uhlíku a živin v půdním profilu, zejména mezi nadložními organickými a minerálními horizonty, na různých typech lesních stanovišť.

3 Literární rešerše

3.1 Půda

Půda je jedním ze základních výrobních faktorů, je neobnovitelným zdrojem, o který je třeba náležitě pečovat. Úrodnost půdy je důležitým faktorem produkční funkce půdy. Vlivem zemědělského hospodaření a dalších antropogenních faktorů je půda degradována a nenávratně ztrácena. Půda ovšem poskytuje také mimoprodukční funkce, jako zadržování vody, transformace živin, rozklad biomasy, hygienická funkce, ekologická funkce a další.

Půda vzniká působením půdotvorných faktorů (matečná hornina, podnebí, podzemní voda, biologické a antropogenní faktory), dále hrají roli také půdotvorné podmínky (čas a reliéf okolí). Matečná hornina (půdotvorný substrát) určuje základní vlastnosti následně vytvořených půd. Půdotvorné substráty lze rozdělit do tří kategorií – vyvřelé, usazené a přeměněné horniny. Mezi vyvřelé řadíme například žulu, mezi usazené pak štěrky, písky, jíly, ale také vápenec nebo břidlice. Dalším půdotvorným substrátem mohou být také antropogenně vzniklé substráty.

Půda může být zemědělská, lesní a ostatní, například urbánní. Zemědělská půda často podléhá nebezpečí eroze, tedy odnosu malých částeczek půdy ze stanoviště a tím postupné ztrátě půdy, což snižuje její úrodnost a produkční i mimoprodukční schopnost. Eroze může být vodní nebo větrná. Před nebezpečím eroze je nutné půdu chránit. Dalším ohrožením půdy je degradace, která zahrnuje například zástavbu, zhutnění nebo kontaminaci různými látkami a acidifikaci. Kontaminace představuje zvýšení koncentrace rizikových prvků nebo cizorodých organických látek v půdě. Kontaminace půd může být nejčastěji způsobena antropogenní činností (průmysl, hnojiva, havárie), zvýšený obsah rizikových prvků ale může být způsoben například také podložím.

3.1.1 Lesní půda

Lesní půda je půda pod stromovým porostem. Kvalita lesních půd je výrazně ovlivněna druhovým složením porostu na stanovišti. Lesní půdy se vyznačují několika rozdílnostmi oproti půdám zemědělským. Například jsou lesní půdy mnohem méně hospodářsky využívány a jsou méně antropogenně ovlivňovány než zemědělské půdy. Nicméně také lesy jsou člověkem v různé míře obhospodařovány a jejich využívání hraje v koloběhu živin velmi důležitou roli. Doba mezi výsadbou lesů a jejich těžbou je několik desetiletí, lesnictví je tedy v tomto ohledu považováno za udržitelnější než zemědělství. Koloběh živin v lesních půdách je poměrně uzavřený, protože odumřelá biomasa a biomasa ve formě listového opadu je často ponechána na stanovišti a není odklizená, jako je tomu na zemědělských půdách (Pykalová 2021). Ovšem intenzivním lesním hospodařením, které zahrnuje právě těžbu dřeva s odvozem biomasy ze stanoviště, je tento uzavřený koloběh narušen. Rovnováhu živin v lesním ekosystému také narušuje znečištění ovzduší (Šrámek et al. 2009). Pro zachování rovnováhy ekosystému je těžba dřeva kompenzována zvětráváním minerálních půdních částic a atmosférickou depozicí, která ovšem není ve většině případů pozitivní pro vitalitu lesních porostů (Šrámek et al. 2009).

Výsadba lesů může být vhodným opatřením k ochraně půd především ve svažitéch oblastech, kde je vyšší riziko eroze půdy, nebo na jiným způsobem znevýhodněných

lokality, kde je nevhodné pěstovat zemědělské plodiny, například z důvodu nízké úrodnosti půdy, kde by zemědělská produkce byla nerentabilní. Eroze půdy, jakožto nenávratná ztráta půdní hmoty, je rizikový faktor a je nutné jí tak věnovat zvýšenou pozornost. Lesní porost představuje pro erozně ohroženou půdu vhodné podmínky díky své hluboké stabilizaci kořenovým systémem a častým výskytem nižšího bylinného patra ve spodních etážích, které představují výrazný půdní kryt. Z hlediska výživy půdy jsou významné jak stromy, tak i křovinná či bylinná vegetace, které společně poskytují velké množství organického materiálu k rozkladu (Hruška & Cienciala 2001).

Obsah a zásoby prvků v lesních půdách jsou závislé na mnoha faktorech, jako je typ lesního porostu, hloubka půdy, pH, biologická aktivita v půdě, či hloubka kořenů stromů (Cramer et al. 2016). Podle Lal (2005) závisí obsah prvků také na zeměpisné šířce, expozici, svažitosti či intenzitě a množství srážek. Ostrowska et al. (2010) udává jako další faktor například také stáří lesního porostu. Obecně je pro lesní půdy typický nízký obsah živin.

Především druhové složení lesních porostů tedy významným způsobem ovlivňuje složení prvků v půdách pod těmito porosty. Druhové složení porostů ale také ovlivňuje další významné faktory, jako je mikroklima porostu, nebo vlastnosti lesních půd (Šrámek & Fadrhonsová 2018), proto je důležité nezanedbávat druhové složení lesních porostů a snažit se o optimální druhové zastoupení v daných oblastech. Změna druhového složení může přinést nežádoucí změny v životaschopnosti lesů. Vhodným druhovým složením může být využití smíšených porostů (nejčastěji bývá uváděna směs smrku ztepilého a buku lesního), oproti využití monokultur jednoho druhu, které bývají náchylnější k napadení škůdci a chorobami, případně i k větrným kalamitám.

Lesní půdy na území České republiky jsou většinou přirozeně kyselé, protože vznikly na kyselém podloží (Šantrůčková et al. 2019). Ovšem kyselost lesních půd je podpořena hospodařením, především hojným vysazováním monokultur smrku, které půdu okyselují. V minulosti docházelo ve velké míře ke změně druhové skladby lesů ve prospěch smrku ztepilého. Dalším důvodem změn pH lesních půd, tedy jejich okyselování, je kyselá depozice způsobená zejména antropogenními zdroji, jako jsou emise oxidu siřičitého a oxidů dusíku, které se do půd dostávají prostřednictvím kyselých dešťů (Novotný et al. 2018; Šantrůčková et al. 2019). Emise oxidu siřičitého (SO₂) i oxidů dusíku (NO_x) se ovšem v posledních letech snižují. Stále lze ale považovat emise SO₂ za jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících zdravotní stav lesů v České republice (Vacek et al. 2015). Další látkou, která ovlivňuje zdravotní stav lesů v České republice, je ozon (Šrámek et al. 2007; Vacek et al. 2015). Dle některých zdrojů lze ozon považovat za vůbec nejzávažnější látku, která v současné době znečišťuje ovzduší. Většina hor v České republice trpěla koncem 20. století poškozením oxidy dusíku a ozonem, což mělo za následek rozsáhlé kácení poškozených stromů. Podle Vacka et al. (2015) způsobují současné klimatické podmínky a znečištění ovzduší zhoršení zdravotního stavu stromů (defoliace, snížení radiálního přírůstku) a ve většině případů dále až odumírání lesních porostů. K defoliaci, tedy ztrátě listové plochy, dochází v důsledku nepříznivých podmínek. Na radiálním přírůstku lze pozorovat klimatické podmínky v jednotlivých letech. Snížení přírůstku v daném roce je následkem výraznějšího znečištění ovzduší, období výraznějšího sucha či nízkých teplot. Ovlivnění znečištěním lze dobře pozorovat také na letokruzích stromů, kdy ve stresových obdobích jsou přírůstky menší. Pokud asimilační orgány stromů trpí nedostatkem základních prvků (Ca, Mg, K, P), způsobeným kyselou

depozicí a acidifikací půd, může docházet ke zhoršení schopnosti stromů přijímat živiny (Šrámek et al. 2009). Omezení příjmu živin může nastat také v souvislosti se znečištěním vzduchu nebo v důsledku zvýšeného výskytu ozonu a oxidu siřičitého, které poškozují voskovou vrstvu jehlic stromů.

Při výrazném zvýšení objemu odumřelé biomasy dochází k její mineralizaci a nitrifikaci, ovšem při nedostatečné možnosti mineralizace může docházet následkem toho k okyselování půdy a nadměrným ztrátám živin, především hořčíku, vápníku a draslíku (Huber et al. 2004).

3.1.1.1 Nadložní organický horizont

Nadložní vrstva organické hmoty zaujímá pouze nepatrný podíl na celém půdním prostředí, podle Šrámka a Fadrhonsové (2018) zaujímá pouze 1-12 % z celého půdního prostředí. Nadložní organická vrstva má ovšem zásadní vliv na mnoho půdních vlastností, jak fyzikálních, tak chemických, tak i těch biologických. Kvalita a množství materiálu v nadložním organickém horizontu určuje úroveň produkce a stability lesních porostů (Sáňka et al. 2018). Humusová vrstva je ovlivněna především mocností listového opadu a jeho kvalitou. Organická hmota se do nadložního organického horizontu dostává přímo z rozkládaného opadu (Borůvka et al. 2005b). Rychlost rozkladu opadu závisí na jeho druhu. Jehličnatý opad se rozkládá pomaleji než opad listnatý. Organická vrstva půdy obsahuje kromě listového opadu a dalších zbytků nadzemních částí rostlin i odumřelé mikroorganismy. Dle Kučery a Adolta (2019) v českých lesích převládá opad jehličnatý (41 %), poté listnatý (31,7 %) a zbytek zaujímají traviny a mechy, případně další složky.

Nadložní organické horizonty jsou výrazně náchylnější ke kyselé depozici i citlivější na vápnění a disponuje vyšší prostorovou variabilitou než minerální horizont (Borůvka et al. 2005b). Dále je nadložní organický horizont významně ovlivňován také lesním hospodařením.

Podle Olsson et al. (2009) je tloušťka organického horizontu nižší na suchých stanovištích. Ovšem koncentrace uhlíku v organickém horizontu se s vlhkostí nemění.

McDonnell et al. (1997) ve své studii vyhodnotili, že listový opad nacházející se mimo město, na venkově, má tendence k rychlejšímu rozkladu než opad rozkládající se poblíž měst. Díky rychlejšímu rozkladu je opad na venkově kvalitnější. Podle Groffman et al. (1995) obsahuje městský opad více pasivního uhlíku a má potenciál ukládat více uhlíku než lesní půdy na venkově. Nadložní organický horizont a jeho složení jsou významné z hlediska úrodnosti půdy (Augusto et al. 2002).

Šrámek a Fadrhonsová (2018) uvádějí, že větší zásoba opadu se vyskytuje v monokulturních porostech smrku, naproti tomu menší je zásoba v půdách bukových porostů.

Organický horizont můžeme rozdělit na tři části, značené L, F a H (Zádorová & Penížek 2020). Horizont L je horizont opadanky, který tvoří čerstvě spadený materiál. Horizont fermentační (F) a horizont humifikační (H) zahrnují již částečně rozložený organický materiál.

Humus lze rozdělit do několika forem – mull, moder a mor (Tomášek 2003). Mull je forma humusu, která se vyskytuje především v teplejších podmínkách, kde dochází k rychlé přeměně organického materiálu a jsou zde vhodné hydrologické poměry, vzniká tak kvalitní humus. Forma moder vzniká na stanovištích s méně vhodnými podmínkami, kde

je nižší teplota a méně živin. Nejméně vhodná forma humusu je mor, jinak nazývaný také surový humus, který vzniká při nevhodných podmínkách pro rozklad organického materiálu. Mor se tvoří především ve vysokých nadmořských výškách s nízkou teplotou a nízkou biologickou aktivitou.

Humusová vrstva lesních půd hraje významnou roli ve výživě lesů, protože obsahuje největší množství živin (Šrámek et al. 2013).

3.1.1.2 Minerální půdní horizonty

Minerální horizonty se zpravidla nacházejí pod nadložním organickým horizontem. Minerální horizonty jsou méně ovlivňovány atmosférickým prostředím, které zahrnuje například kyselou depozici než nadložní organický horizont (Borůvka et al. 2007). Minerální horizonty jsou více ovlivněny spíše půdotvornými procesy, případně geologickým podložím (Borůvka et al. 2005b). V minerálním půdním horizontu se vyskytují prvky a sloučeniny různých prvků (oxidy, uhličitany, sírany, fosforečnany a další).

S rostoucí hloubkou pod povrchem se v minerální vrstvě půdy snižuje koncentrace uhlíku (Olsson et al. 2009). Také obsah vápníku lze očekávat v minerálním horizontu nižší než v organickém (Borůvka et al. 2005b), vápněním pak obsah vápníku v minerálním horizontu není výrazně ovlivněn. Síra a dusík mají v minerálním horizontu pouze malé zastoupení, protože nejsou schopné se z povrchové vrstvy půdy transportovat do hlubšího horizontu.

Organická hmota se do minerálního půdního horizontu transportuje prostřednictvím půdotvorných procesů, jako je podzolizace (Borůvka et al. 2005b).

3.2 Zásoby prvků v lesních půdách

Na zásoby a tok prvků v lesních půdách má vliv mnoho faktorů, jako je podnebí, půdní typ, emise, nebo historie využívání půdy (Schrijver et al. 2007). Voda hraje také velmi významnou roli v zásobě živin v půdě. Ve vodě je rozpuštěno určité množství živin, ale i dalších látek. Největší zastoupení z minerálních složek zauímají kationty vápníku, hořčíku, draslíku a sodíku, nebo anionty dusičnanů. Ve vodě jsou zastoupeny i kationty železa nebo hliníku, nejmenší zastoupení v minerální složce půdního roztoku pak mají kationty chromu, niklu, kadmia a olova.

V půdách s kyselějším aktivním pH lze zaznamenat výraznější rozdíly v chemismu půdy (Šrámek et al. 2013), než ve výměnném pH.

Šrámek et al. (2009) uvádějí hraniční hodnoty nedostatku/nadbytku prvků P, K, Ca a Mg v asimilačních orgánech stromů (Tabulka 1), stanovené mezinárodním programem ICP Forests.

Zásoba prvků v asimilačních orgánech stromů úzce souvisí se zásobou prvků v půdách, protože prostřednictvím stromů se do půd dostává značná zásoba těchto prvků, například v případě rozkladu listového opadu.

Tabulka 1 Limitní obsahy prvků v asimilačních orgánech stromů podle ICP Forests (Šrámek et al. 2009 - upraveno)

		P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
Smrk	Hranice nedostatku	1 000	3 500	1 500	600
	Hranice nadbytku	2 000	9 000	6 000	1 500
Borovice	Hranice nedostatku	1 000	3 500	1 500	600
	Hranice nadbytku	2 000	10 000	4 000	1 500
Buk	Hranice nedostatku	1 000	5 000	4 000	1 000
	Hranice nadbytku	1 700	10 000	8 000	1 500
Dub	Hranice nedostatku	1 000	5 000	3 000	1 000
	Hranice nadbytku	1 800	10 000	8 000	2 500

3.2.1 Zásoby uhlíku

Půdy jsou významnou zásobárnou uhlíku. Nerozložený organický materiál obsahuje až 48 % uhlíku (Kučera & Adolt 2019), je tedy také výrazným potenciálním zdrojem uhlíku pro půdu. Organický uhlík v půdě je podle Olsson et al. (2009) největší zásobárnou uhlíku na Zemi a hraje tak velmi důležitou roli v uhlíkovém koloběhu a ovlivňuje koncentraci CO₂ v atmosféře. Uhlík se spolu s kyslíkem a vodíkem řadí mezi základní stavební složky organických látek. Rostlinami je uhlík často přijímán v plynné formě CO₂ nebo HCO₃⁻ (hydrogenuhlíčan) (Vaněk et al. 2016). Většina uhlíku v půdě se vyskytuje v organické formě.

Množství a koncentraci uhlíku v půdě ovlivňuje klima, srážky, evapotranspirace, svažítost, expozice, půdní struktura, zrnitost a také matečná hornina (Lal 2005). Zásobu uhlíku v půdě ovlivňují také antropogenní faktory, jako je odlesňování, lesnické hospodaření nebo zalesňování zemědělských půd. Dle Reich et al. (2005) je obsah a koloběh uhlíku ovlivňován také stářím a druhem stromového porostu a jinou vegetací. Zásoby uhlíku v půdě se pohybují mezi 50 a 200 Mg/ha, v závislosti na výše zmíněných faktorech (Ostrowska et al. 2010). Zásoby uhlíku ve vrstvě 1 m se podle Ostrowska et al. (2010) pohybují v rozmezí 40-60 Mg/ha. Podle Ostrowska et al. (2010) s hloubkou klesá zásoba půdního organického uhlíku.

Větší koncentrace uhlíku se vyskytuje v organických horizontech než v minerálních horizontech. Podle Strand et al. (2016) jsou důvodem vyššího obsahu uhlíku v organických horizontech lesních půd především větší objemová hmotnost a také větší tloušťka organického horizontu než v minerálních horizontech.

Světové zásoby atmosférického oxidu uhličitého se každoročně zvyšují, což vede také ke zvyšování obsahu uhlíku v lesích (Lal 2005). Severské tundry a boreální lesy vypouštějí do atmosféry stále více uhlíku, naopak tropické vlhké pralesy stále více uhlíku ukládají.

Podle Ceulemans et al. (1999) vede zvýšení obsahu oxidu uhličitého k vyššímu růstu stromů, konkrétně k nárůstu listové plochy. Vyšší obsah oxidu uhličitého, potažmo uhlíku v celém ekosystému má za následek větší růst kořenového systému, vyšší aktivitu kořenových i půdních mikroorganismů a také větší ztráty uhlíku v důsledku zvýšené respirace.

Zásoby uhlíku v biomase stromů jsou v České republice vyšší u jehličnatých stromů, které se až z 67 % podílejí na celkovém množství dřevní biomasy (Kučera & Adolt 2019). Listnaté stromy pak ve své biomase obsahují až 33 % z celkového množství uhlíku v biomase stromů.

Podle Olsson et al. (2009) jsou zásoby organického uhlíku v půdě ovlivňovány mnoha faktory, jako jsou nadmořská výška, zeměpisná šířka, vodní poměry v půdě nebo teplota půdy. Největší množství uhlíku je obsaženo v mokřadech (v porovnání s tundrou, tajgou, opadavými lesy mírného pásma a tropickými lesy), poté v tundrách a boreálních lesích/tajgách. Lesy mírného pásma obsahují uhlíku nejméně (Lal 2005). Tropické lesy jsou důležité pro koloběh uhlíku, protože jejich klima (teplota a déšť) představuje ideální prostředí pro fotosyntézu a s ní spojený příjem uhlíku.

Zásoba organického uhlíku v povrchové vrstvě půdy je navíc významně závislá na dalších faktorech, jako je klima, topografie, hospodaření na půdě nebo antropogenní faktory (Tan et al. 2004).

Hloubka

Podle Lal (2005) je obsah půdního organického uhlíku vysoce proměnlivý s hloubkou, ale také v čase. S rostoucí hloubkou půdy, především v případě minerálního horizontu, který je rozsáhlejší než organický, zásoba půdního organického uhlíku klesá (Dieleman et al. 2013).

Hospodaření

Zemědělské půdy mají obecně nízkou zásobu organického uhlíku. Lesní půdy pak disponují výrazně větší zásobou uhlíku než půdy zemědělské (Lal 2005).

Odlesňování a degradace lesa způsobuje ztráty půdního organického uhlíku. Změna lesních půd na pastviny vede k výraznému snížení zásob půdního organického uhlíku a změna porostu z lesa na zemědělskou půdu vede k vyčerpání uhlíku z půdy až o 20-50 %. Důvodem vyčerpání uhlíku z půdy je pokles množství biomasy, změna vlhkosti a teploty půdy a rychlost rozkladu organické hmoty nebo zvýšení eroze půdy (Lal 2005). Také změna klimatu vede k postupnému snižování půdního organického uhlíku (Lal 2005).

Naopak zalesnění zemědělské půdy vede ke zvýšení zásob uhlíku v půdě, prostřednictvím sekvestrace uhlíku. Ovšem zvýšením objemu biomasy nemusí nutně nastat také zvýšení obsahu organického uhlíku v půdě. Další možností zvýšení obsahu uhlíku v lesních půdách je vhodné lesní hospodaření, konkrétně příprava stanoviště, vhodně vybrané druhy stromů, nebo řízené požáry (Lal 2005). Dále ovlivňuje zásoby uhlíku v půdě také hnojení, orba a další operace (Olsson et al. 2009). Hnojení dusíkem může zvýšit zásoby organického uhlíku v půdě (Lal 2005). Podle Lal (2005) může požár významně ovlivnit zásobu uhlíku v půdě. Například v půdě boreálních lesů záleží na délce trvání a teplotě. Lesní požár v tundře může půdu proměnit v zásobárnu uhlíku, kdy před požárem bylo v této půdě uhlíku málo. Požárem se oteplí půda, což vede k tání permafrostu a může tak zvýšit rozklad organické hmoty v půdě.

Hydrologie

Zásoba organického uhlíku se zvyšuje při rostoucích srážkách a vyšší vlhkosti půdy (Shaw et al. 2008). Ve studii Strand et al. (2016) byly největší zásoby uhlíku naměřeny v půdách nasycených vodou a vlhkých organických půdách. Podle Olsson et al. (2009) může být vyšší zásoba půdního organického uhlíku ve vlhčích půdách způsobena menšími ztrátami uhlíku rozkladem látek, způsobenými nasycením půdního profilu vodou, další možností je rozdílná kvalita opadu. Také studie Tan et al. (2004) dokladuje vyšší zásoby půdního organického uhlíku v půdách s vyšší hladinou podzemní vody. Vlhké půdy hromadí organickou hmotu v lesní i minerální vrstvě půdy. Zásoba půdního organického uhlíku v organickém horizontu se významně zvýšila ve vlhké půdě oproti suché, o více než 100 % (Olsson et al. 2009).

V porovnání suchého a mírně vlhkého organického horizontu je v suchém obsah uhlíku okolo 2 kg/m², v mírně vlhkém pak přes 4 kg/m² (Olsson et al. 2009). V případě minerálního horizontu 0-50 cm lze pozorovat vyšší obsah uhlíku než v organickém horizontu jak v případě suché, tak i v případě mírně vlhké půdy. Změny v obsahu uhlíku v minerální vrstvě je již poměrně nepatrný, v mírně vlhkých i suchých půdách je obsah v minerálním horizontu okolo 5 kg/m², ovšem stále je obsah vyšší v případě mírně vlhkých půd.

Druhové složení a stáří porostu

Druhové složení a stáří stromového porostu hraje významnou roli v obsahu živin v půdě a v rychlosti rozkladu organické hmoty.

Největší celkové zásoby uhlíku v půdě byly nalezeny v jehličnatých lesích, nejmenší pak v lesích listnatých. Podle Cramer et al. (2016) jsou největší zásoby organického uhlíku v půdách smrkových porostů. Naopak v listnatých monokulturách – konkrétně v monokulturách buku, jsou celkové zásoby organického uhlíku nejnižší. Vysoký obsah uhlíku v půdách jehličnatých porostů je dán také vyšší mocností organického horizontu v těchto půdách (Hanáková Bečvářová 2022). Mezi extrémními hodnotami pro porosty smrku a buku se nacházejí porosty jehličnaté douglasky tisolisté, které stojí mezi krajními hodnotami přibližně uprostřed, případně pak také různým způsobem smíšené porosty jehličnanů a listnatých stromů (Cramer et al. 2016). Dle Strand et al. (2016) jsou obsahy uhlíku v listnatých lesích většinou do 25 kg/m², v případě borovice a smrku je poměrně významný podíl půd také v kategorii do 35 kg/m².

V půdách jehličnatých stromů probíhá rozklad organické hmoty mnohem pomaleji než v půdách listnatých lesů, především z důvodu výrazné kyselosti jehličnatého opadu a vyšším obsahem ligninu. Půdy v listnatých lesích mají tedy vhodnější podmínky pro rozkladné procesy. Díky hlubšímu prokořenění listnatých stromů může být organický uhlík distribuován do hlubších vrstev půdy, čímž se obsah organického uhlíku nekumuluje pouze v nadložním organickém horizontu, ale dostává se tak také do minerální vrstvy půdy (Hanáková Bečvářová 2022). Také kvalita humusu je díky vhodnějším podmínkám v půdách listnatých lesů lepší.

Podle Olsson et al. (2009) obsahují půdy ve smrkových lesích větší celkovou zásobu půdního organického uhlíku než lesy borové. Zásoby uhlíku v půdách borového a smrkového lesa jsou podobné, ovšem v borovém lese bylo více uhlíku obsaženo v nadložní vrstvě půdy

a ve smrkovém naopak v minerálním horizontu (Strand et al. 2016). Půdy v borovém lese tedy obsahují méně uhlíku v minerální části půdy než půdy ve smrkovém ale i než v listnatém lese (Strand et al. 2016). Půdy v borovém lese navíc vykazují v zásobách uhlíku velkou variabilitu. Půdy listnatých lesů obsahují větší množství uhlíku v minerálním horizontu, jehličnaté porosty mají větší zásobu v nadložním organickém horizontu. Borové lesy se vyskytují více na půdách, kde je přebytek či nedostatek uhlíku. Znamená to tedy, že borovice se lépe přizpůsobuje extrémním podmínkám stanoviště (Strand et al. 2016).

Vyšší zásoby uhlíku byly naměřeny pod staršími stromy (Hughes et al. 1999; Ostrowska et al. 2010).

Také podle Strand et al. (2016) lze zvýšit zásobu uhlíku prodloužením obmýtí lesních porostů, tedy ponecháním stromů na stanovišti po delší časové období.

Podle Ostrowska et al. (2010) je akumulace půdního organického uhlíku více ovlivněna stářím porostu a typem lokality než půdním typem.

Nadmořská výška

Podle Dieleman et al. (2013) se s nadmořskou výškou zvyšují zásoby uhlíku v půdě, dle jiných studií to nemusí být pravidlem. Ovšem pro tyto změny je velmi důležité pH půdy, objemová hmotnost a hloubka půdy. Půdy v tropických lesích mají vyšší obsah uhlíku na horách, nižší v nížinách (Dieleman et al. 2013), což odpovídá také předpokladu, že obecně je ve vyšších polohách uhlíku více. Přeměna lesní půdy v horských oblastech na pastviny může výrazně snížit zásoby uhlíku v půdě.

Podle Dieleman et al. (2013) neexistuje rozdíl v zásobách půdního organického uhlíku mezi lesem a travnatým povrchem ve stejné nadmořské výšce, v hloubce 1 m pod povrchem. V lesních půdách tropických oblastí se zásoby zvyšují o 5,1 kg C/m² při zvýšení nadmořské výšky o 1000 m, na zatravněné půdě se zvyšují o 6,3 kg C/m². Do hloubky 30 cm pod povrchem se nachází více organického uhlíku pod travnatým porostem než v lesích (pod travnatými porosty je vyšší objemová hmotnost půdy), ovšem absolutní koncentrace organického uhlíku byla naměřena vyšší v lesních půdách (větší množství opadu a vyšší poměr C:N).

Podle Shaw et al. (2008) představují lesní porosty významnou zásobárnu uhlíku, a to jak v nadzemních, tak v podzemních orgánech stromů, tento fakt se ještě zvyšuje se zvyšující se nadmořskou výškou.

Zeměpisná šířka

S rostoucí zeměpisnou šířkou klesá zásoba organického uhlíku v půdě. Průměrná roční teplota klesá s rostoucí zeměpisnou šířkou a tedy s vyšší zeměpisnou šířkou klesá zásoba půdního organického uhlíku. Toto pravidlo ovšem platí pouze ve větším měřítku, v regionálním měřítku mohou hodnoty ovlivňovat například vegetace nebo chemické, biologické a fyzikální vlastnosti půdy. Snižující se zásoby půdního organického uhlíku byly naměřeny na Sibiři, Aljašce, v Kanadě i ve Skandinávii, lze tedy konstatovat, že je tomu tak po celém světě.

Ve švédské studii Olsson et al. (2009) byla naměřena průměrná zásoba půdního organického uhlíku v organické i minerální vrstvě půdy do hloubky 50 cm 8,2 kg C/m², pouze v organickém horizontu pak 2,8 kg C/m², což odpovídá poměrně nízké zásobě organického

uhlíku. V suchých švédských podzolových půdách se zásoba půdního organického uhlíku snižovala se zeměpisnou šířkou, tedy na severu byla nižší než na jihu.

Podle Johnson et al. (2011) se nachází víc než polovina světové zásoby půdního organického uhlíku v severních půdách. Velké množství půdního organického uhlíku je obsaženo ve zmrzlých minerálních půdách a díky teplotám pod bodem mrazu zde zůstává uloženo. Riziko ovšem spočívá v oteplování těchto lokalit, které poté obsažený uhlík mohou ztrácet (Johnson et al. 2011).

Tropické lesy v blízkosti rovníku jsou důležitou zásobárnou uhlíku. Jejich teplé a deštivé klima představuje ideální prostředí pro fotosyntézu, čímž mohou přijímat významné množství uhlíku.

3.2.2 Zásoby živin

Živiny v půdě představují jednu ze základních podmínek pro dobrou schopnost růstu rostlin. Obsah přístupných (výměnných) živin a dalších prvků v lesních půdách je tedy zásadním faktorem pro vitalitu a zdravotní stav lesů (Šrámek et al. 2013). Nejdůležitějšími živinami pro výživu lesních porostů jsou Ca, Mg, K a P (Čechmánková et al. 2021).

Živiny se do půdy dostávají opadem listů a z odumřelých částí rostlin, rozkládají se v procesu mineralizace a prostřednictvím recyklace půdními organismy jsou opět přijímány vegetací (Prescott 2002). Pro stanovení potenciální zásoby živin v půdě je třeba dbát také na druh lesního porostu na stanovišti, který zásobu prvků ovlivňuje.

Živiny se v půdě vyskytují ve formě výměnných kationtů nebo aniontů (Reich et al. 2005). Silně kyselé půdy trpí výrazným nedostatkem živin, kromě vápníku, kterého je v silně kyselých půdách dostatek (Šantrůčková et al. 2019).

V nadložním organickém horizontu je zásadní především celkový obsah prvků v půdě, protože tato zásoba je pro stromy rychleji dostupná (Sánka & Materna 2014). V případě minerálních horizontů je důležité sledovat jak celkový obsah živin, tak i obsah přístupné formy jednotlivých živin, které mohou stromy přijímat.

3.2.2.1 Vápník

Vápník v půdě dosahuje obsahu 0,15-10 % (Vaněk et al. 2016). Většina vápníku je vázána ve sloučeninách uhličitánů nebo křemičitanů. Rozpustnost uhličitánů je závislá na pH půdy, kdy pro rozpuštění jsou vhodné podmínky s nižším pH. Šantrůčková et al. (2019) uvádějí, že silně kyselé půdy netrpí nedostatkem vápníku, přitom ostatních živin je nedostatek. Augusto et al. (2002) uvádějí, že nedostatek vápníku se vyskytuje v kyselých půdách vyvinutých na podloží s přirozeným nedostatkem vápníku. Podle Šrámek et al. (2013) je v posledních letech prohlubuje nedostatek vápníku v lesních půdách.

Vápník omezuje rozpustnost většiny rizikových prvků a pozitivně ovlivňuje půdní strukturu a rozpustnost živin.

Koncentrace vápníku v listech stromů se liší v závislosti na druhu stromu (Cramer et al. 2016). Největší obsah vápníku je v porostu buku, nejmenší u smrku (Cramer et al. 2016). Lawrence et al. (2016) tvrdí, že listy s vyšším obsahem vápníku se rozkládají rychleji než s nižším obsahem vápníku. Výraznější nedostatek vápníku se objevuje v suchých a hustých lesích (Augusto et al. 2002). Dle Šrámka et al. (2009) obsahují mladší části stromů výrazně

méně vápníku než starší části stromů. Vápník lze ve stromech naměřit od 1 000 mg/kg dokonce až k hodnotě 15 000 mg/kg, přitom nedostatek se projevuje při poklesu pod 1 500 mg/kg (Šrámek et al. 2009). Až 20 let po vápnění dané lokality lze pozorovat zvýšení koncentrace vápníku v listech stromů (Court et al. 2018).

Acidifikace a vápnění

Acidifikace, tedy okyselování půd, je přirozený proces, ovšem míra acidifikace závisí na okolních podmínkách a často bývá urychlována antropogenní činností. Lesní půdy jsou acidifikací více ohrožené než půdy zemědělské, protože opatření vedoucí k nápravě a zvýšení pH půdy jsou často složitější, méně efektivní nebo nemožná. Proto je acidifikace často označována za jeden z nejzásadnějších faktorů zhoršení zdravotního stavu lesů (Pavlu 2018).

Primární zranitelnost půd vůči acidifikaci je způsobena matečnou horninou a půdotvornými procesy, sekundární zranitelnost pak zahrnuje především antropogenní faktory, jako je kyselá depozice nebo lesní hospodářství (Borůvka et al. 2005b).

Lesní půdy v České republice jsou postiženy acidifikací, až jedna třetina silně kyselých půd je kvůli acidifikaci degradována. Acidifikace je vážným problémem především horských oblastí České republiky. Acidifikace způsobuje vyčerpání bazických kationtů (zejména Ca a Mg) a pokles pH, následně také tvorbu méně kvalitního humusu (Borůvka et al. 2005b; Džermanská 2016). Dále lze následkem vyčerpání bazických kationtů v okyselených půdách zaznamenat zvýšenou mobilitu hliníku. Vyšší obsah volných forem hliníku se vyskytuje v půdách s porostem smrku než s porostem buku (Augusto et al. 2002; Borůvka et al. 2005b). Okyselování půdy a tím také zvýšené uvolňování hliníku v půdě je způsobeno kyselou depozicí, druhem porostu, matečnou horninou nebo nadmořskou výškou (Borůvka et al. 2005b). Kyselost lesních půd je tedy doprovázena vysokou koncentrací výměnných kationtů hliníku (Šantrůčková et al. 2019).

Acidifikace výrazně ovlivňuje vitalitu lesních porostů v dlouhodobém měřítku, půda je také okyselována atmosférickou depozicí (Borůvka et al. 2020). Největší ovlivnění atmosférickou depozicí proběhlo ve druhé polovině 20. století, kdy byly lesní porosty a lesní půdy vystaveny významným emisím sloučenin síry a dusíku (Šrámek et al. 2014a). Takto vysoké emisní zatížení mělo za následek úbytek lesů v horských oblastech České republiky i dalších zemí Evropy (Borůvka et al. 2020). Přestože emise síry nejsou již aktuálním problémem, její následky lze stále pocítovat na snížené rychlosti obnovy ekosystémů po této zátěži. Dle Borůvky et al. (2020) mají lesní porosty vystavené acidifikaci menší schopnost odolnosti proti chorobám, nebo nižší míru ochrany proti suchu.

Prvním opatřením ke snížení acidifikace je omezení emisí a depozice okyselujících látek, nebo změna hospodaření v lesích, zahrnující omezení holosečí (což má pozitivní vliv na snížení rychlosti mineralizace), a obecně omezení odvozu biomasy ze stanoviště. Velmi účinným opatřením je změna druhové skladby porostu z jehličnatých stromů na listnaté, především v polohách, kde nejsou jehličnaté porosty původní. Výsadbou většího množství listnatých stromů lze například docílit menší depozice škodlivých látek do půdy (Šrámek et al. 2009). V případě výrazných poškození lesních porostů vlivem kyselosti půdy je třeba přistoupit k nápravám těchto poškození.

Další z možných forem úpravy pH půdy je zvýšení prostřednictvím vápnění půdy, které ovšem není vhodné za všech podmínek. K vápnění se nejčastěji využívá dolomitický

vápenec nebo dolomit (Pavlů 2018). Vápněním půdy se rychle zvyšuje pH v organické vrstvě půdy, které se v průběhu let postupně pomalu snižuje (Thomas et al. 2019), snižuje se také mobilita hliníku v organickém horizontu (Borůvka et al. 2005b). Vápnění může urychlit obnovu ekosystémů po poškozeních způsobených kyselostí půdy. Vápnění lesních porostů bývá nejčastěji prováděno letecky, což může být prováděno pouze na dostatečně velkých plochách (Borůvka et al. 2020). První podmínkou pro možnost vápnění je nízké pH půdy a nízký obsah bazických kationtů. Zvýšení obsahu bazických kationtů v půdě je možné provést právě vápněním půdy (Borůvka et al. 2020). Dalším pozitivním následkem vápnění je také omezení mobility hliníku, omezení vyluhování draslíku a hořčíku, nebo zvýšení přístupnosti hořčíku pro stromy (Thomas et al. 2019). Podle Kuneš (2003) může vápnění snížit úmrtnost nově vysazených smrkových porostů a také zvýšit rychlost jejich růstu. Podle Court et al. (2018) a Siepel et al. (2019) může mít vápnění půdy pozitivní vliv na snížení nedostatku některých žádoucích prvků, nebo jejich špatnou dostupnost a může snížit dostupnost prvků jako je hliník, což je v půdě žádoucí. Vápnění dlouhodobě zlepšuje úrodnost půdy a zlepšuje výživu a růst stromů (Court et al. 2018). Vápnění dále zlepšuje chemické vlastnosti půdy v nejsvrchnějších vrstvách, dle studie Court et al. (2018) ale také v hlubších vrstvách půdy, do 45 cm pod povrchem.

Ovšem vápnění lesních půd má také negativní dopady, jako je dočasná změna druhového složení bylinného patra lesních porostů (Baumann et al. 2019; Thomas et al. 2019), zvýšení rychlosti mineralizace humusu, změna poměru C:N (Borůvka et al. 2005b) nebo zvýšení mobilizace některých rizikových prvků (Pavlů 2018). Podle Court et al. (2018) dále může vápnění uhličitánem vápenatým zapříčinit dlouhodobou nerovnováhu hořčíku a draslíku v půdě. Vápnění může mít dále za následek nerovnováhu živin.

Další změnou v důsledku vápnění je zvýšení rychlosti rozkladu opadu (mineralizace) prostřednictvím zvýšení biologické aktivity a tím také snížení obsahu uhlíku v lesní půdě (Court et al. 2018; Borůvka et al. 2020). Podle Lawrence et al. (2016) byl pozorován zvýšený obsah uhlíku v půdě po vápnění.

Až 20 let po vápnění dané lokality lze pozorovat zvýšení koncentrace vápníku v listech stromů a stejný průběh lze očekávat také u koncentrace hořčíku. Všechny výše popsané účinky vápnění jsou závislé na mnoha faktorech, jako je poměr C:N, chemické vlastnosti půdy nebo klimatické poměry (Borůvka et al. 2020). Thomas et al. (2019) označili vápnění půd v současné době za nezbytné z důvodu vysoké míry antropogenních emisí dusíku vypouštěných do ovzduší. Vápnění lesů bude nutné také v dalších letech (Čihák et al. 2021).

Vápnění není vhodné na přirozeně kyselých půdách, jako jsou mokřady nebo rašelinné půdy, dále je vápnění omezeno v chráněných územích – přírodních rezervacích a ochranném pásmu vodních zdrojů (Borůvka et al. 2020).

3.2.2.2 Hořčík

V půdách se nachází 0,4-0,6 % hořčíku, v některých případech až 10 % (Vaněk et al. 2016). Hořčík se v půdě stává přístupným při vyšším pH půdy, v kyselých půdách je hořčíku málo. Vyšší obsah hořčíku se nachází na půdách s dolomitickým půdotvorným substrátem.

Vyšší obsah hořčíku lze očekávat v nižších nadmořských výškách a pod bukovými porosty (Borůvka et al. 2005b). Nedostatek hořčíku se objevuje především v suchých hustých

lesích s kyselými půdami s přirozeným nedostatkem hořčíku (Augusto et al. 2002). Podle Šrámka et al. (2013) lze v posledních letech pozorovat prohlubování nedostatku hořčíku v lesních půdách.

Obsah hořčíku ve stromech je udáván mezi 300 a 2 800 mg/kg, nedostatek pak pod hodnotou 600-700 mg/kg (Šrámek et al. 2009). Podle Šrámka et al. (2009) se nedostatek hořčíku v lesních půdách a asimilačních orgánech stromů projevuje žloutnutím (především u smrkových porostů se tento jev objevil koncem 90. let minulého století), stejné tvrzení podává také studie Šrámka et al. (2008), podle níž je důvodem žloutnutí smrkového jehličí především nedostatek obsahu hořčíku v minerální vrstvě půdy. Také Novotný et al. (2018) uvádějí jako jednu z příčin rozsáhlého odumírání lesních porostů koncem 20. století nedostatek hořčíku v půdě. Koncentrace hořčíku jsou odlišné v závislosti na druhu stromu, například u smrkových porostů je koncentrace nižší než v porostech buku (Augusto et al. 2000; Cramer et al. 2016). Podobně jako v případě vápníku lze po vápnění dané lokality pozorovat zvýšenou koncentraci hořčíku v listech až 20 let po provedení vápnění (Court et al. 2018), ovšem pouze v případě, kdy je k vápnění použit přípravek s obsahem hořčíku, v případě použití uhličitanu vápenatého lze naopak očekávat výrazné snížení koncentrace hořčíku v listech až k hranici nedostatku.

3.2.2.3 Draslík

Draslík je obecně v půdě přístupný spíše při vyšším pH, v kyselých půdách je dostupný spíše méně. Obsah draslíku v půdě se pohybuje mezi 0,5 a 3,2 % (Vaněk et al. 2016), v písčitéch a rašelinných půdách je draslíku méně. Draslík je v půdě vázán v anorganických sloučeninách.

Nedostatek draslíku se vyskytuje v suchých půdách, v hustých porostech na vápenatých půdách (Augusto et al. 2002). Důvodem nedostatku draslíku v půdách je tedy více než druh porostu spíše hospodaření a vliv přírodních podmínek.

Obsah draslíku ve stromech byl naměřen mezi 2 000 a 15 000 mg/kg, o nedostatku můžeme mluvit v případě poklesu pod hodnotu 3 500 mg/kg (Šrámek et al. 2009). Koncentrace draslíku jsou odlišné v závislosti na druhu stromu, ve studii Cramer et al. (2016) byly naměřeny vyšší hodnoty draslíku například v listech douglasky než v listech smrku. Mladší části stromů, jako jsou listy, jehlice, větve, kůra a další, jsou obecně bohatší na obsah draslíku (Šrámek et al. 2009).

3.2.2.4 Fosfor

Fosfor se v půdě nachází jak v anorganické, tak organické formě. Obsah organicky vázaného fosforu je v půdě 30-50 %, zbytek tvoří fosfor v anorganické formě (Pykalová 2021).

Zásoby fosforu v lesních půdách po celé Evropě jsou velmi nízké, a snižují se mimo jiné také v důsledku lidské aktivity (Vitousek et al. 2010). Podle hodnocení ÚKZÚZ se v minerální i humusové vrstvě půdy nacházejí nízké koncentrace přístupného fosforu (Novotný et al. 2018). Celkový obsah fosforu v půdě je 0,01-0,15 % (Vaněk et al. 2016), přičemž větší obsah lze většinou najít v půdách s vyšším množstvím organické hmoty. Hranice nedostatku přístupného fosforu je stanovena na 20 mg/kg.

Fosfor do půdy vstupuje především prostřednictvím atmosférické depozice nebo zvětráváním (Ilg et al. 2009). V půdě se fosfor vyskytuje v organické i anorganické formě.

Fosfor ve volné formě, která je přístupná pro rostliny a organismy, se vyskytuje pouze v úzkém rozmezí pH, proto je často označován jako limitující prvek ve výživě rostlin, ovšem je také nejdůležitější makroživinou pro růst lesů (Prietz et al. 2015). Fosfor je lépe dostupný, stejně jako draslík, spíše při slabě kyselém pH půdy. Při nižším pH tvoří nerozpustné sloučeniny s hliníkem, železem nebo manganem, při vyšším pak s vápníkem a hořčíkem (Pavlu 2018). Fosfor je podle Novotného et al. (2018) velmi silně vázán v půdě a také v tělech rostlin a živočichů. Silnější vazby fosforu lze pozorovat v půdách s nižšími hodnotami pH (Novotný et al. 2018).

Silně kyselé půdy obsahují fosfor v méně rozpustných formách, jako fosfátové komplexy hliníku a železa (jak již bylo zmíněno), fosfor se tak stává nepřístupným pro kořeny stromů. Pro zvýšení přijatelnosti fosforu v těchto půdách je zapotřebí hnojení či vápnění, které upravuje pH a zlepšuje tak přijatelnost fosforu pro stromy. Úprava pH probíhá také za přítomnosti organické hmoty v půdě. Spadané jehlice rozkladem obohacují půdu o fulvokyseliny a snižují tak pH půdy. Dalšími faktory, které ovlivňují pH půdy jsou antropogenní zdroje, především emise oxidu siřičitého a oxidů dusíku, které jsou obsahem kyselých dešťů. Snížením pH půdy dochází ke zvýšení obsahu iontů Al^{3+} a Fe^{3+} , které omezují příjem fosforu.

Ilg et al. (2009) dospěli k závěru, že v jehličnatých lesích se nachází výrazně větší zásoba fosforu než v lesích listnatých. Důvodem větších zásob fosforu může být větší obsah humusu typu mor u podzolů v jehličnatých lesích.

Dle Novotného et al. (2018) se nachází v lesích Lužických, Jizerských a Orlických hor nedostatek fosforu, často pod hodnotou 10 mg/kg, naměřený i v minerálním půdním horizontu. V průběhu studie Novotného et al. (2018) bylo naměřeno i mnoho hodnot pod hranici deficitu fosforu – 1,2 mg/kg. Pro lesy a lesní půdy na území Evropy je nedostatek fosforu typický.

Mladé půdy, které vznikly na bazických horninách obsahují větší množství fosforu než půdy starší a písčité (Šimek et al. 2019). Ve většině půd dnes dochází ke ztrátám fosforu v důsledku těžby dřeva a eroze.

V případě fosforu se hovoří o nedostatku při 800–1 000 mg/kg v asimilačních orgánech stromů, pokud obsah klesne pod 500 mg/kg, může docházet k poškození fyziologických funkcí stromů (Šrámek et al. 2009). Mladší části stromů, jako jsou listy, jehlice, větve, kůra a další, jsou obecně bohatší na obsah fosforu než starší části stromů (Šrámek et al. 2009). Koncentrace fosforu v listech se podle Cramer et al. (2016) neliší v závislosti na druhu stromu.

3.3 Vliv stanovištních podmínek na obsahy a zásoby prvků v půdě

Faktorů, které ovlivňují zásoby prvků v půdě, je velké množství, jsou to především: nadmořská výška, druh porostu, půdní typ, charakteristika reliéfu, geologické podloží, nebo lesní vegetační stupně.

Dle Šrámka et al. (2009) závisí dostupnost a obsah živin na několika faktorech, jako je zvětrávání hornin, atmosférická depozice, vymývání látek z půdního horizontu, hnojení a lesnické hospodaření.

Nadmořská výška a tím také reliéf, klimatické podmínky, vyšší úhrny srážek a nižší teploty zvyšují vyplavování látek z půdy a zpomalují mineralizaci organické hmoty (Borůvka

et al. 2005b). Zvýšené vyplavování živin může být způsobeno také kyselými dešti (Tomlinson 2003).

Rychlost rozkladu a mineralizace tedy závisí na teplotě a vlhkosti půdy a dalších fyzikálních a chemických vlastnostech (Prescott 2002).

3.3.1 Vliv druhu porostu

Druh porostu má vliv na fyzikální, chemické i biologické půdní vlastnosti (Augusto et al. 2002). Nejvýznamnější vliv má druh porostu na vrchní vrstvy půdy. Dle Spielvogel et al. (2014) druhové složení porostů významně ovlivňuje složení a distribuci organické hmoty v lesní půdě. Druh stromového porostu má významný vliv také na mikroklima v půdě (Augusto et al. 2002) a půdní strukturu. Také druh odpadu, který je závislý na druhu lesního porostu, má vliv na koloběh živin, protože listy různých druhů stromů mají různé složení. Nejenom druhové složení dřevin hraje významnou roli v zásobě živin v lesní půdě. Také přízemní druhy vegetace (podrost) ovlivňují obsah živin, ale i půdní mikroflóru, která následně ovlivňuje zvětrávání půdy (Augusto et al. 2003).

Na nezalesněných plochách dochází ke ztrátám organického uhlíku z půdy, který je jinak fixován v rostlinné biomase (Kuneš 2003). I podle Prescott (2002) jsou na málo zalesněných lokalitách (mezerách v korunách stromů) živiny více dostupné než v uzavřených lesích, což vede ke zvýšené dostupnosti, a právě také ke zvýšeným ztrátám uhlíku. Les zadržuje živiny především v listech. Při vytvoření větší mezery v korunách stromů (lokální holoseč) dochází ke změnám v koloběhu látek, pokud dojde k odtěžení stejného objemu stromů probírkou, k takovým změnám nedojde. Důležité je tedy pro ochranu živin v půdě, nevytvářet rozsáhlé holiny, ale snažit se spíše o menší narušení a pouze o těžbu jednotlivých poškozených stromů.

Jedním z faktorů ovlivňujících zásoby živin a prvků v půdě jsou dále také kořeny stromů, které u každého druhu dosahují do jiné hloubky a rozsahu (Cramer et al. 2016). Porosty stromů s vyšším poměrem jemných kořenů obsahují vyšší množství organické hmoty a dusíku v důsledku jejich rozkladu, než množství získané z rozkladu opadu stromů (Spielvogel et al. 2014). Hluboce kořenicí stromy mají lepší schopnosti získávat živiny z hlubších vrstev půdy, což je především v půdách s rizikem ztráty živin velmi důležitá funkce (Huber et al. 2004).

Rozsah svrchního horizontu lesní půdy a také složení listového opadu následně ovlivňuje také složení půdy. Rychlost rozkladu opadu závisí na jeho složení, především na obsahu uhlíku a živin (Reich et al. 2005).

Rozdíly v obsahu organického uhlíku v lesních půdách jsou způsobeny rozdílnou rychlostí rozkladu a složením živin z opadu (Cramer et al. 2016). Dále jsou rozdíly ve vlhkosti půdy, biologické aktivitě, rychlosti rozkladu, pH opadu a další. Dle Prescott (2002) je vhodnější smíšená kultura, která zvyšuje biologickou rozmanitost a nutriční rozmanitost půdy, které mají za následek například lepší rozklad organického materiálu.

Průměrné množství opadu v lesích mírného pásma závisí především na zeměpisné šířce, klimatu a managementu lesa, částečně závisí také na druhu porostu (Augusto et al. 2002). Průměrný roční opad je 3,5–4 t/ha/rok. Například v případě borovice lesní je průměrný roční opad 3,9 t/ha, u buku lesního je to jen 3,5 t/ha.

Mladší části stromů, jako jsou listy, jehlice, větve, kůra a další, jsou obecně bohatší na obsah hořčíku, naopak u křemíku jsou větší obsahy zaznamenány ve starších částech stromů (Šrámek et al. 2009). Starší stromy tedy obsahují menší množství živin než mladší stromy (Augusto et al. 2002). Podobně i větve a listy jsou bohatší na živiny než kmeny stromů.

Vyšší obsah živin urychluje rozklad opadu zvyšuje biologickou rozmanitost v půdě.

3.3.1.1 Listnaté lesy

Listnaté stromy se v České republice podílejí z 42,4 % na celkovém zastoupení dřevin v ČR (Kučera & Adolt 2019). Nejvíce jsou listnaté stromy zastoupeny bukem lesním (10,1 %) a různými druhy dubů (7,8 %), ostatní listnaté dřeviny zaujímají zbylých 24,5 %. S rostoucí nadmořskou výškou postupně ubývá podílu listnatých stromů v porostech, největší zastoupení mají v nadmořské výšce pod 400 m n.m., kde až 18 % dřevin zaujímají duby. Při absenci antropogenních faktorů by ovšem přirozeně zaujímaly listnaté lesy větší část rozlohy České republiky.

Rozsáhlejší kořenový systém mají především stromy s širokými listy, záleží ovšem také na živinách v půdě (Finér et al. 2007). Buk, na rozdíl od smrku, ovlivňuje také půdu hluboko pod povrchem, protože má výrazně rozsáhlejší kořenový systém (Spielvogel et al. 2014). Stromy s hlubokým kořenovým systémem, jako je právě buk, ve svých půdách obsahují větší množství organické hmoty.

Listnaté lesy mají ve svém opadu výrazně větší koncentrace draslíku, vápníku a hořčíku než opad z jehličnatých stromů (Augusto et al. 2002). Obecně na živiny bohatší jsou tedy spíše půdy pod listnatými porosty než ty pod porosty jehličnatými (Schrijver et al. 2007; Cramer et al. 2016), přestože jehličnaté lesy zachycují větší množství živin díky své struktuře porostu. Také dle Augusto et al. (2002) je větší množství živin v biomase listnatých dřevin. Opad z bukových porostů se rozkládá rychleji než opad ze smrkových porostů. Vyšší koncentrace živin se nacházejí v listech, na rozdíl od jehlic jehličnatých stromů.

Nejvyšší hodnoty pH jsou v půdách buku a dalších listnatých stromů, poté až v půdách jehličnatých stromů (Cramer et al. 2016; Šrámek & Fadrhonsová 2018).

Augusto et al. (2002) uvádějí, že v povrchové vrstvě půdy pod listnatými stromy je vyšší vlhkost než v půdě pod jehličnatými stromy.

3.3.1.2 Jehličnaté lesy

Dle Kučery a Adolta (2019) zaujímají v České republice jehličnaté porosty přes 57 % z celkového zastoupení dřevin. Výrazně z jehličnatých druhů převažuje smrk ztepilý (43 %), doplněný borovicí lesní (9,8 %) a zbylými druhy (do 5 %). Smrk ztepilý se v rámci České republiky nachází především ve vyšších nadmořských výškách, ovšem ani ve výšce do 400 m n.m. není jeho zastoupení zanedbatelné. Naopak borovice lesní se nachází především ve výškách do 400 m n.m.

Vhodné prostředí pro růst jehličnatých dřevin je především na kyselém podloží s nízkými průměrnými teplotami a vyššími úhrny srážek, což obvykle nastává ve vyšších nadmořských výškách (Pavlů 2018).

Jehličnaté stromy se nejen v České republice, ale i jinde, nacházejí v oblastech, které nejsou pro jehličnany vhodné. Většinou jsou vysazovány do nižších poloh, než jsou jejich přirozené areály výskytu, kde by přirozeně převažovaly spíše listnaté lesy. Smrkové porosty v nižších polohách jsou náchylnější vůči nepříznivým podmínkám počasí, ovšem mohou být více produktivní než v horských oblastech (Šrámek et al. 2019). Vyšší podíl jehličnatých stromů a především smrků je důsledkem lesnického hospodaření v minulosti. Vysazování jehličnatých lesů má za následek snížení biodiverzity a odolnosti vůči nežádoucím přírodním faktorům (Knoke et al. 2005).

Smrk má podle Vacka et al. (2015) schopnost zachytit velké množství okyselujících látek, což je také důvodem velmi kyselé reakce půdy ve smrkových lesích. Také podle Augusto et al. (2002) a Schrijver et al. (2007) zvyšují jehličnaté lesy acidifikaci lesních půd, více než lesy listnaté. Proto je nutné omezit na místech s kyselou atmosférickou depozicí výsadbu smrků. Smrk podporuje zvětrávání půdních minerálů (Augusto et al. 2002). Nejen smrkové lesy, ale i borové podporují ztrátu živin z půdy.

Jehličnaté lesy zachycují větší množství znečišťujících látek a větší množství živin a dalších látek než listnaté stromy za stejných podmínek, především z důvodu rozdílnosti struktury porostu (Schrijver et al. 2007). Také Augusto et al. (2002) tvrdí, že smrkové porosty obsahují výrazně více živin než bukové lesy.

Jehličnaté lesy jsou více postiženy rizikem vyplavování živin než listnaté lesy.

Vyšší obsah uhlíku, dusíku a síry se nachází v organickém horizontu pod porosty smrku nebo jiných jehličnatých stromů, naopak pod porosty buku je obsah nižší (Borůvka et al. 2005b; Schrijver et al. 2007), což je způsobeno rozdílnou rychlostí rozkladu opadu. V opadu ze smrku je více ligninu než v opadu z buku, proto se opad ze smrku rozkládá pomaleji (Prescott 2002). V půdách jehličnatých porostů je uváděna nižší biologická aktivita, než v listnatých půdách (Schrijver et al. 2007), což dále podporuje nižší rychlost rozkladu.

Jehličnaté stromy dosahují obvykle větší výšky než stejně staré listnaté stromy. Jehličnaté stromy tak zachycují větší množství prvků z atmosférické depozice. Například depozice síry je výrazně vyšší u smrku či borovice než u buku nebo dubu (Augusto et al. 2002).

Augusto et al. (2002) uvádí, že v povrchové vrstvě půdy jehličnatých stromů je nižší vlhkost než v půdě listnatých stromů. Především na jaře, kdy začíná transpirace jehličnatých stromů dříve než listnatých, lze pozorovat v půdách jehličnatých stromů nižší vlhkost. Dalším důvodem vyššího vyčerpání vody z půd pod jehličnany je mělký kořenový systém, který odčerpává vodu právě z mělkých vrstev půdy. Smrk ztepilý, jako mělce kořenící strom, ovlivňuje především svrchní vrstvy půdy.

Porosty smrku mají větší jehlice v kyselých dobře provzdušněných půdách než ve vápenitých půdách (Prietzl et al. 2015).

Jehličnaté lesy propouštějí menší množství světla na povrch půdy, což má za následek nižší vlhkost pod těmito porosty. Ve srovnání smrku ztepilého a borovice lesní je nižší teplota pozorována pod porostem smrku ztepilého (Augusto et al. 2002).

Jehličnaté druhy stromů, které mají husté zapojení porostu, omezují růst podrostní vegetace (Augusto et al. 2002) a dávají prostor rozvoji spíše mechové vegetace.

Půda pod porostem smrku ztepilého má nižší pórovitost než půda ostatních druhů stromů (Augusto et al. 2002), což může mít z dlouhodobého hlediska negativní vliv na vlastnosti půdy.

Borovice ve svém těle obsahuje pouze malé množství fosforu, proto není nedostatek fosforu v půdě pro borovice limitující (Pykalová 2021). V případě smrku je fosforu potřeba v půdě výrazně více.

Například cedrové lesy fixují v půdě větší množství vápníku, borové lesy mají obecně málo živin. Smrkové lesy mají oproti borovým lesům vyšší koncentraci živin v půdě.

Smrkové porosty jsou dle Schrijver et al. (2007) považovány za nestabilní. Pro omezení rizik spojených s čistými kulturami smrku, lze pěstovat smrk v kombinaci s některými listnatými druhy, jako například buk.

3.3.1.3 Smíšené lesy

Smíšené lesy jsou oproti monokulturám výrazně vhodnější, z důvodu vyšší odolnosti vůči kalamitám způsobeným hmyzem nebo větrem (Huber et al. 2004). Smíšené porosty lesů mají oproti monokulturám vyšší produkci biomasy, lepší využití vody, mají lepší schopnost využívat živiny a jsou méně citlivé vůči suchu (Šrámek & Fadrhonsová 2018). Dalším pozitivem smíšených porostů, případně aspoň snížení hustoty výsadby jehličnatých stromů v porostu, je snížení rizika acidifikace lesních půd (Augusto et al. 2002). Dále mají smíšené porosty vhodnější výživu fosforem. Nejlepším smíšeným porostem je podle Šrámka a Fadrhonsové (2018) kombinace smrku a buku. Kombinace smrku a buku je také nejčastějším smíšeným porostem (von Lüpke et al. 2004).

3.3.2 Vliv nadmořské výšky

Nadmořská výška, ale také lesní vegetační stupně, které nadmořskou výšku z větší části kopírují, lze považovat za velmi výrazný ovlivňující faktor z hlediska dostupnosti živin a dalších prvků v půdě.

Lesní vegetační stupně představují vertikální členitost vegetace, která se určuje podle přirozeného vegetačního pokryvu na daném území, který by se zde vyskytoval při absenci antropogenních faktorů (Kučera & Adolt 2019). Rozlišujeme 9, v některých případech 10, zonálních lesních vegetačních stupňů – dubový, bukodubový, dubokukový, bukový, jedlobukový, smrkobukový, bukosmrkový, smrkový, klečový, případně alpský a jeden azonální – borový, který se vyskytuje ve specifických podmínkách.

Horské oblasti jsou náchylnější k půdní erozi a s ní spojené ztrátě živin a humusu. Výrazná ztráta živin nastává také na místech s vyšším odlesněním, až holosečemi. Horské půdy jsou většinou mělké než půdy v nížinných oblastech, mají proto také menší zásoby makroživin (N, P, K) (Prietz et al. 2015). Podle Šantrůčkové et al. (2019) jsou v horských lesích půdy kyselější, tedy s rostoucí nadmořskou výškou se zvyšuje acidita. Jehličnaté lesy mají obecně nižší pH než lesy listnaté. Půdy v nížinných oblastech České republiky jsou méně kyselé a živiny v půdě jsou v nich lépe dostupné (Šantrůčková et al. 2019). V nížinách je velká variabilita v obsahu živin mezi středně a málo kyselými půdami (Šantrůčková et al. 2019). Menší variabilita živin je v horských oblastech, kde jsou půdy méně kvalitní.

Dieleman et al. (2013) uvádějí, že v horských oblastech se nachází větší množství nerozložené organické hmoty, z důvodu snížené schopnosti rozkladu organické hmoty v kyselých a chladných půdách. Naopak v nížinách jsou půdy pro rozklad organické hmoty vhodnější, především z důvodu vyššího pH nebo vyšší teploty.

Lesy v horských oblastech jsou vystavovány většímu stresu než lesy v nížinách (Vacek et al. 2015). Stres představuje především znečištění ovzduší, ale například i nedostatek vody nebo extrémní teploty. Ve vyšších nadmořských výškách se stromový porost po poškození obnovuje pomaleji než v nížinách (Vacek & Lepš 1996).

Nejvýznamnější vliv dřevin na zásoby organického uhlíku jsou v nejmenší hloubce do 15 cm (Cramer et al. 2016). Byly zjištěny vyšší zásoby organického uhlíku v porostech douglasky a smrku oproti buku. Dále byly zásoby uhlíku ovlivněny půdním typem. Ve smíšených porostech v porovnání s čistou kulturou buku lesního byly pozorovány vyšší zásoby organického uhlíku. Ve srovnání s čistými porosty jehličnatých stromů pak byly smíšené kultury podobné, či jen o málo chudší na organickou hmotu. Nejzásadnější ovlivnění v zásobách živin udává Augusto et al. (2003) také v nejsvrchnější vrstvě půdy, do 10 cm.

Na nadmořské výšce je závislá mocnost půdních horizontů. Mocnost opadu na nadmořské výšce příliš závislá není, mocnost drti se s nadmořskou výškou zvyšuje až na 7,5 cm v nadmořské výšce nad 700 m n.m. (Kučera & Adolt 2019). Celková mocnost organického (L, F, H) a povrchového (organominerálního i eluviálního) horizontu se s nadmořskou výškou také mění, nejvyšší je v nadmořské výšce nad 700 m n.m. – až 16,5 cm, nejnižší pak mezi 400 a 700 m n.m. – pouze 13,3 cm. V nadmořské výšce do 400 m n.m. se mocnost organického a povrchového horizontu opět zvyšuje na 14,5 cm.

Změna klimatu může pozitivně ovlivnit rychlost růstu lesních porostů prostřednictvím zlepšení přístupnosti minerálního dusíku, což může kompenzovat úbytek uhlíku v půdě, který se ztrácí v důsledku oteplování půdy (Lal 2005).

4 Materiál a metody

Ve spolupráci s několika institucemi byla vytvořena rozsáhlá databáze vlastností lesních půd celé České republiky. Diplomová práce posoudí na základě této databáze úroveň koncentrací a zásoby a zhodnotí hlavní faktory prostorového rozložení vybraných prvků (uhlík, živiny – Ca, Mg, K, P), a to jak pro celou Českou republiku, tak podrobněji pro širší oblast Jizerských hor. Budou využity základní statistické metody. Budou hodnoceny možné důsledky zjištěného stavu pro lesnické hospodaření a pro životní prostředí.

4.1 Charakteristika České republiky

Česká republika se nachází ve střední Evropě, tedy v mírném klimatickém pásmu. Průměrná roční teplota v ČR je 8,3 °C, přičemž nejvyšší průměrná roční teplota je zpravidla v nížinách a nejnižší v horských oblastech (ČHMÚ 2022). Průměrný roční úhrn srážek je 684 mm, přičemž nejvyšší úhrny srážek jsou zpravidla v horských oblastech.

Dle Kučery a Adolta (2019) dosahuje lesnatost v ČR 36,8 %. Nad průměrem lesnatosti České republiky se vyskytuje Karlovarský, Liberecký a Zlínský kraj, které dosahují lesnatosti přes 45 %. Obecně převažují v ČR lesy hospodářské (67,6 % z celkové plochy lesa), poté lesy zvláštního určení, zahrnující například lesy na území národních parků, chráněných krajinných oblastí, lesy v ochranných pásmech hygienické ochrany vod a další (20,8 %).

4.2 Charakteristika Jizerských hor

Jizerské hory se nacházejí na severu České republiky, v Libereckém kraji, ale také za hranicemi České republiky, v Polsku. Právě severní, především polská strana hor má vysoce specifické podmínky, kdy částečně propouští do České republiky studený vítr a srážky (Novotný et al. 2018), ovšem větší množství srážek zůstává právě na severní straně, která funguje jako bariéra proti vstupu nepříznivých podmínek počasí za hranu hor. Tento stav potvrzuje také meteorologická stanice v obci Bílý potok, která zaznamenává dlouhodobě nejvyšší úhrny srážek na území České republiky. Na celém území Jizerských hor je uváděn roční úhrn srážek mezi 800 a 1705 mm (Novotný et al. 2018), v Bílém potoce lze pozorovat právě hodnoty okolo 1700 mm. Průměrné roční teploty se vyskytují mezi 4,4-7,1 °C.

Nadmořská výška v Jizerských horách se pohybuje od 300 m do 1100 m. Největší rozsah ploch se nachází v nadmořské výšce mezi 600 a 1000 m, několik vrcholů lze zařadit do výšky nad 1000 m. Nejvyšším bodem Jizerských hor na území České republiky je vrchol Smrk, s 1124 metry, ještě o 2 metry výše je na polské straně vrchol Wysoka Kopa.

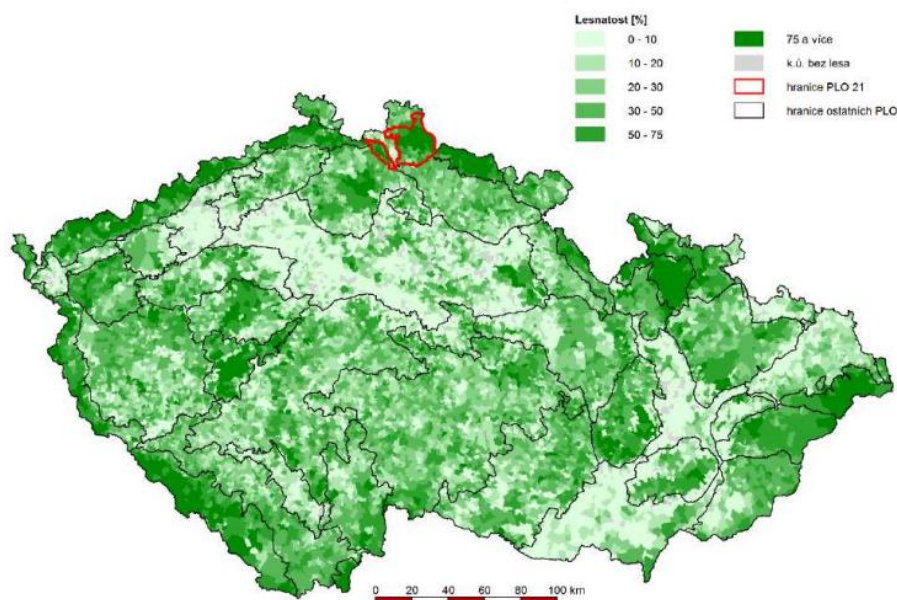
Půdní reakce pH (KCl) v Jizerských horách je velmi kyselá. V organické vrstvě lesních půd byly naměřeny mezi lety 2003 a 2012 hodnoty okolo 3,4 (Novotný et al. 2018). V minerální vrstvě pak byly naměřeny hodnoty mezi 3,5 a 3,6.

V Jizerských horách došlo na přelomu 70. a 80. let minulého století k rozsáhlému úbytku lesů, z důvodu vysokého znečištění ovzduší v této lokalitě, vlivem kyselé atmosférické depozice (Hruška & Cienciala 2001; Kuneš 2003; Šrámek et al. 2014c; Novotný et al. 2018). Kyselá atmosférická depozice měla za následek významnou acidifikaci půdy, která vedla právě k odumírání lesních porostů (Borůvka et al. 2020). Hlavní příčinou znečištění byly emise SO_x

z nedalekých elektráren v Německu a Polsku, které vypouštěly do ovzduší významné množství znečišťujících látek a měly tak za následek devastující změny pro lesní ekosystémy v okolí. V 90. letech již došlo ke zlepšení podmínek, ovšem lesní prost byl již nenávratně poškozen. V roce 1995 bylo zaznamenáno 12 tisíc hektarů holin v Jizerských horách, způsobených právě imisním zatížením počátkem 80. let. Lesní porosty byly později opět vysazeny. Nově vysazené lesy ovšem limituje kyselost půdy, nedostatek živin nebo extrémní mikroklima (Kuneš 2003).

Půdy v Jizerských horách obsahují v minerálních horizontech vyšší množství hořčíku (Borůvka et al. 2005b). Naopak obsah vápníku je vyšší v organické vrstvě půdy, což může být způsobeno vápněním půdy. Dále obsahuje organická vrstva půdy více uhlíku a také síry a dusíku, což je způsobeno atmosférickou depozicí těchto dvou prvků. Největší množství síry je zachycováno v organické vrstvě půdy, především na západních svazích, které jsou vystaveny přímému větru (Borůvka et al. 2005b). Dále je vyšší obsah síry ve vyšších nadmořských výškách, což je způsobeno horší mineralizací síry v této oblasti, podobně je tomu také u uhlíku.

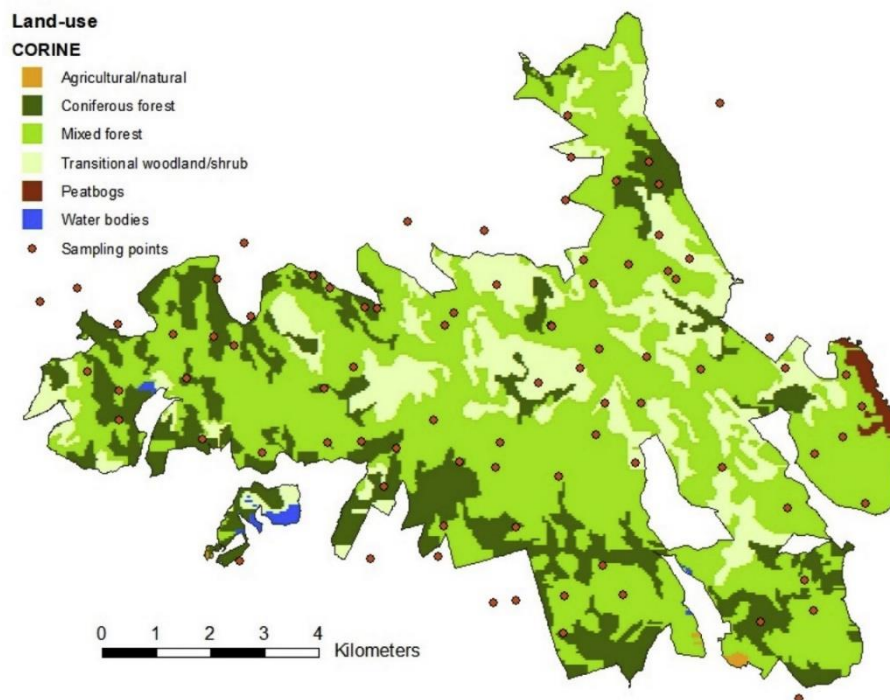
Česká republika je rozdělena do několika přírodních lesních oblastí, z nich jednou jsou Jizerské hory (PLO 21). Dle těchto oblastí probíhal výzkum vlastností lesních půd. Přírodní lesní oblast Jizerské hory dosahuje lesnatosti 74,6 % (Kučera & Adolt 2019), což lze pozorovat také na Obrázku 1. Celková plocha přírodní lesní oblasti Jizerské hory je 53 673 ha (ÚHÚL 2020), z toho přes 40 tisíc ha jsou lesní porosty. Jizerské hory, podobně jako další hory na území České republiky, mají výrazně pozměněnou druhovou skladbu lesů. V Jizerských horách převažuje smrk ztepilý, který zaujímá přes 70 % rozlohy, přičemž přirozeně by měl být zastoupen pouze do 35 % (Vacek et al. 2003). Ovšem podle Kučery a Adolta (2019) měla mezi lety 2011 a 2015 oblast Jizerských hor podle odhadu z více než 60 % přirozenou druhovou skladbu lesů.



Obrázek 1 Lesnatost v roce 2015 (ÚHÚL 2020)

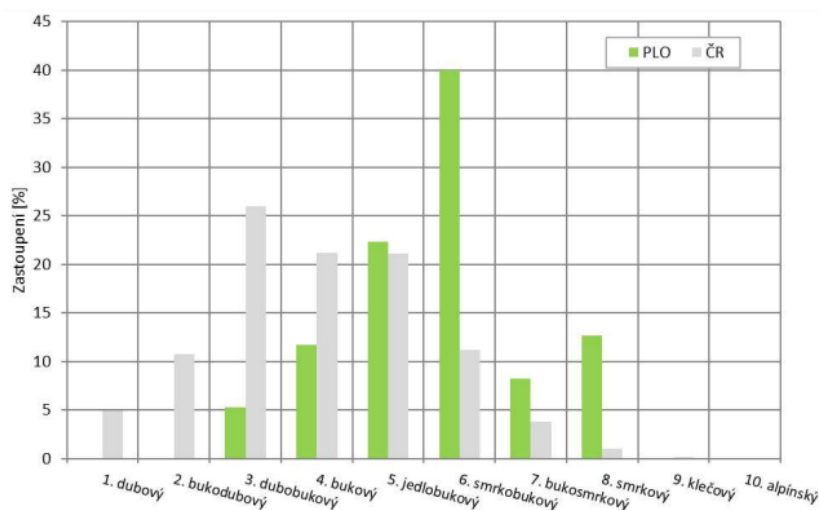
V Jizerských horách převažují jehličnaté porosty smrku ztepilého (přes 26 tisíc ha, tedy přes 65 %), z listnatých stromů převažuje buk lesní (až 4 tisíce hektarů, což odpovídá

rozsahu 10 %). Ostatní druhy dřevin zaujímají pouze nižší jednotky %. Celkově jsou v největším zastoupení v Jizerských horách smíšené lesní porosty (mixed forest) a poté jehličnaté porosty (coniferous forest) (Obrázek 2).



Obrázek 2 Zastoupení porostů v Jizerských horách dle systému CORINE (Borůvka et al. 2020)

Podle ÚHÚL (2020) jsou Jizerské hory a Ještěd (přírodní lesní oblast Jizerské hory) zastoupeny šesti vegetačními stupni od 3. do 8., tedy od dubobukového do smrkového (Obrázek 3). Největší část zaujímají porosty ve smrkobukovém vegetačním stupni, celkem 40 %. V celé České republice se oproti tomu přes ¼ rozkládá v dubobukovém vegetačním stupni, tedy v nižší nadmořské výšce.



Obrázek 3 Zastoupení lesních vegetačních stupňů v PLO Jizerské hory a ČR v roce 2018 (%) (ÚHÚL 2020)

Nejrozšířenějším půdním typem v oblasti Jizerských hor je kambizem, ve vyšších polohách se pak nacházejí hlavně kryptopodzoly a podzoly (Kozák et al. 2009). Rovněž v celé ČR je hlavním půdním typem kambizem, dále tam jsou zastoupeny ve větší míře též pseudogleje, gleje, v nižších polohách luvizemě a hnědozemě.

4.3 Odběr vzorků a metodika analýz

Na základě výsledků průzkumů lesních půd prováděných Výzkumným ústavem lesního hospodářství a myslivosti, Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů a Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským po celém území České republiky byla vytvořena databáze všech sebraných dat všech institucí. Tento projekt byl nazván „Vývoj a verifikace prostorových modelů vlastností lesních půd v České republice“. Data obsažená v projektu pocházejí z období od roku 2000 až do roku 2020. Právě v návaznosti na tento projekt byl zhodnocen stav lesů České republiky, rozložení živin v lesních půdách a další.

V rámci projektu byly shromážděny výsledky analýz 19 478 půdních vzorků z 9 167 lokalit (Šrámek et al. 2020). Vzhledem k tomu, že jednotlivé průzkumy používaly různé hloubky odběru, byly výsledky sjednoceny a přepočteny na tři půdní vrstvy – nadložní organický horizont, svrchní minerální horizont v hloubce 0-30 cm, hlubší minerální vrstvy půdy v hloubce 30-80 cm. Šrámek et al. (2020) dodávají, že v průběhu let došlo ke změnám v analýze, hodnocené vzorky se také lišily dle institucí, kterými byly odebírány a analyzovány, mohlo tedy dojít k určitým chybám. V databázi byly nalezeny podezřelé hodnoty, které byly následně zkontrolovány, případně z databáze vymazány.

4.3.1 ÚKZÚZ

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský provedl mezi lety 1996 a 2011 Průzkum výživy lesa, který měl za úkol zhodnotit výživný stav lesů na základě analýzy stavu živin a prvků, půdní reakce a dalších půdních charakteristik. V rámci Průzkumu výživy lesa bylo hodnoceno 16 155 vzorků půdy (ÚKZÚZ).

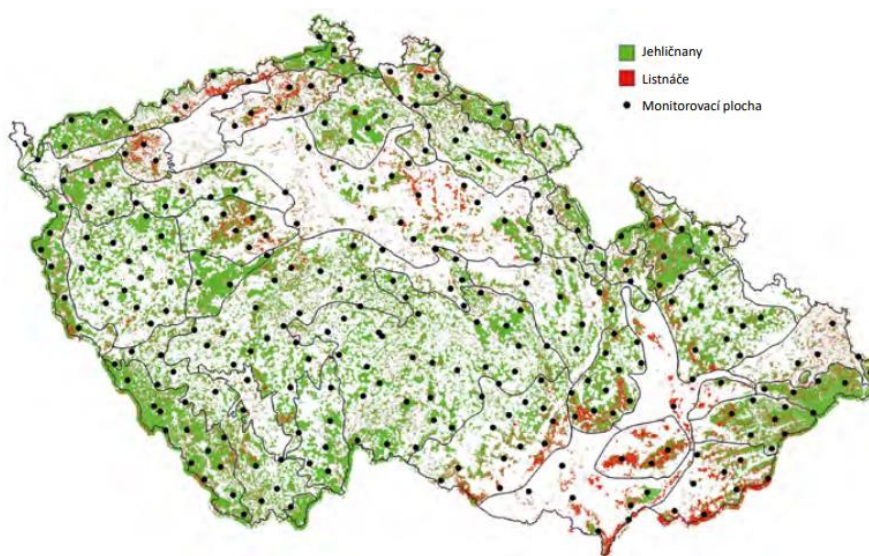
Byly odebrány vzorky horizontu nadložního organického humusu, minerálního povrchového horizontu a minerálního podpovrchového horizontu (Fiala et al. 2006). V nadložním organickém humusovém horizontu byla vyhodnocena acidita, celkový obsah dusíku, obsah uhlíku, obsah živin a stopových prvků a aktivní a výměnné pH. V dalších horizontech pak byl vyhodnocen obsah živin a stopových prvků a aktivní a výměnné pH. Kromě odběrů půdy byly odebrány také vzorky asimilačních orgánů stromů (jehlice, listy).

4.3.2 VÚLHM

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti provedl monitoring zdravotního stavu lesa v České republice v rámci programu ICP Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), který byl založen v roce 1985 pro sledování stavu lesů v Evropě, s návazností na kvalitu ovzduší (Buriánek et al. 2019). Výzkum byl sledován mezi lety 1986-2018. Nejprve byly lokality analyzovány v rámci plošného monitoringu zdravotního stavu lesa, později byly některé lokality doplněny o intenzivní monitoring lesních ekosystémů.

4.3.2.1 Plošný monitoring zdravotního stavu lesa

Celkem bylo v rámci plošného monitoringu analyzováno 306 monitorovacích ploch v síti 16×16 km, případně 8×8 km na celém území České republiky (Obrázek 4). Na každé z analyzovaných lokalit byly zjištěny základní charakteristiky území: nadmořská výška, dostupnost vody, zastoupení a stáří dřevin v porostu a další. Hodnocen byl v pravidelných časových intervalech zdravotní stav stromů (například defoliace) a hodnocení přízemní vegetace, nepravidelně pak také například listové a půdní analýzy. Z Obrázku 4 je patrné, že v České republice převažují spíše jehličnaté lesy, které se v největší míře vyskytují v pohraničních oblastech. Listnaté lesy se pak vyskytují spíše na Moravě, případně v Ústeckém kraji.



Obrázek 4 Základní monitorovací plochy ICP Forests v ČR (Buriánek et al. 2019)

4.3.2.2 Intenzivní monitoring lesních ekosystémů

Od roku 1994 byl postupně na 16 vybraných lokalitách zahájen intenzivní monitoring stavu lesních porostů pro zjištění příčin změn stavu lesních porostů (Buriánek et al. 2019). Na plochách intenzivního monitoringu byly sledovány: zdravotní stav korun, růst, fenologie, přízemní vegetace, meteorologie, depozice, půdní voda, chemismus půd, listové analýzy a opad.

Pro analýzu chemismu půd byly na intenzivně monitorovaných plochách vykopány půdní sondy a odebrány vzorky nadložního humusu i minerální půdy v pětiletém intervalu (Buriánek et al. 2019). Na polovině lokalit bylo dále odebráno po čtyřech vzorcích půd z hloubek 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm a 40-80 cm za pomoci půdního vrtáku. Na některých lokalitách byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti půdy za pomoci Kopeckého válečků o objemu 100 cm³. Odebrané vzorky byly následně analyzovány v laboratoři pro stanovení půdní reakce, obsahu uhlíku a přístupných živin, celkové zásoby jednotlivých prvků, zatížení těžkými kovy a další.

Mezi jednu z ploch intenzivního monitoringu patří také lokalita Jizerských hor, která byla založena v roce 2004. Jizerské hory byly zde popsány jako lokalita s převahou smrku a nadmořskou výškou 910 m n.m.

4.3.3 ÚHÚL

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů provedl mezi lety 2001 a 2004 první cyklus Národní inventarizace lesů a mezi lety 2011 a 2015 druhý cyklus. Národní inventarizace lesů měla sloužit ke zjištění stavu a vývoje lesa (Kučera & Adolt 2019).

Pro zjištění pedologických charakteristik lesních půd byly využity půdní zákopky a sondy. Celkem bylo analyzováno přes 13 000 zákopků (2 na každé ploše) a přes 1 500 sond na bezmála 7 000 plochách.

Zákopky o velikosti 30×30 cm a hloubce do 50 cm, ovšem minimálně tolik, aby bylo možné popsat všechny povrchové půdní horizonty (Kučera & Adolt 2019). Analyzována byla forma humusu (mull, moder, mor), převládající složka opadu, půdní druh, skeletovitost a mocnost půdních horizontů.

Půdní sondy zasahovaly až do hloubky substrátového horizontu. Na všech sondách byla provedena taxonomická klasifikace půdního profilu a odebrány neporušené půdní vzorky. Na neporušených půdních vzorcích byly analyzovány fyzikální vlastnosti půdy, na následně porušených vzorcích pak pedochemické vlastnosti půdy (aktivní půdní reakce, kationtová výměnná kapacita, bazická saturace, obsah oxidovatelného organického uhlíku, celkový dusík, obsah přístupných živin, obsah celkových živin, hmotnostní vlhkost půdy a redukovaná objemová hmotnost), kvantitativní a kvalitativní vlastnosti nadložního humusu (Kučera & Adolt 2019).

4.4 Metodika zpracování dat

Ke statistickému vyhodnocení dat byl využit tabulkový software Microsoft Excel a program STATISTICA 12.

Data byla analyzována především pro vyhodnocení předem stanovených hypotéz, aby bylo možné je potvrdit, případně zamítnout.

Pro vyhodnocení hypotézy „Zásoby živin v půdách pod listnatými lesy jsou vyšší než v půdách pod jehličnatými porosty“ byla hodnocena data za pomoci analýzy rozptylu – ANOVA s interakcemi, kde závislou proměnnou byla vždy zásoba prvků a nezávislými proměnnými byly faktory půdní vrstvy a druhu porostu. V tomto hodnocení byly porovnávány pouze listnaté a jehličnaté porosty. Smíšené porosty hodnoceny nebyly, jednak proto, že je jich menší počet, a jednak proto, že v rámci této skupiny se může podíl listnatých a jehličnatých dřevin výrazně lišit, takže může být kategorie smíšených lesů značně heterogenní a hodnocení rozdílů od lesů jehličnatých a listnatých by bylo méně průkazné.

Hypotéza „V lesních půdách vyšších poloh je vyšší zásoba organického uhlíku a živin uložena v nadložních organických horizontech, zatímco v půdách nižších poloh je vyšší zásoba v minerálních půdních horizontech“ byla vyhodnocena pomocí analýzy rozptylu – ANOVA s interakcemi, kde závislou proměnnou byla vždy zásoba prvků a nezávislými proměnnými byly faktory půdní vrstvy a lesních vegetačních stupňů. Spolu s analýzou rozptylu byla využita také tabulka průměrných zásob prvků.

K vyhodnocení hypotézy „V Jizerských horách se vyskytuje větší zásoba organického uhlíku a živin na jednotku plochy ve srovnání se středními hodnotami celé České republiky“ byla využita analýza rozptylu – ANOVA s interakcemi pro jednotlivé prvky, kde jako závislá

proměnná byla vždy využita zásoba prvků na m² a jako nezávislé proměnné pak lokalita půdní vrstvy.

Hypotéza „Většina lesních půd vykazuje nízký obsah přístupného hořčíku a fosforu“ byla vyhodnocena za pomoci průměrných hodnot porovnaných s vypočítanou referenční hodnotou obsahu prvků v minerálních horizontech na základě hodnotících kritérií v Tabulce 2 a 3 v kapitole 4.5 Hodnotící kritéria koncentrací a zásob prvků.

Na základě sebraných dat byly vytvořeny mapy, které ukazují rozložení organického uhlíku a dalších prvků v lesních půdách České republiky, posloupně ve třech půdních vrstvách – organický horizont, minerální horizont 0-30 cm a minerální horizont 30-80 cm.

Metodika tvorby map procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách je uvedena v publikaci: Vašát R, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sánka M, Sánka O, Vacek O, Penížek V, Čechmánková J. 2021a. Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady. Publikace je dostupná z odkazu: https://www.vulhm.cz/files/uploads/2021/12/Mapa-procentualniho-obsahu-organickehouhliku-v-lesnich-pudach_CM-5_2021.pdf

Metodika tvorby map obsahů výměnných prvků v lesních půdách v minerální vrstvě 0-30 cm je uvedena v publikaci: Komprdová K, Vašát R, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sánka M, Sánka O, Fadrhonsová V, Čechmánková J. 2021. Chemické vlastnosti svrchních minerálních vrstev lesních půd a ohrožení lesních půd acidifikací a nutriční degradací. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady. Publikace je dostupná

z odkazu:

https://www.vulhm.cz/files/uploads/2022/01/Chemicke%20vlastnosti%20%20svrchnich%20mineralnich%20vrstev%20lesnich%20pud%20a%20ohrozeni%20lesnich%20pud%20acidifikaci%20a%20nutricni%20degradaci_b.pdf

Metodika tvorby map zásob prvků v nadložním organickém horizontu lesních půd a zásoby uhlíku v celém půdním profilu je uvedena v publikaci: Vašát R, Komprdová K, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sánka M, Sánka O, Fadrhonsová V, Čechmánková J. 2021b. Zásoby prvků v nadložním organickém horizontu lesních půd a zásoby uhlíku v celém půdním profilu. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady. Publikace je dostupná z odkazu: <https://www.vulhm.cz/files/uploads/2019/10/Zasoby-prvku-v-nadloznim-organickem-horizontu-lesnich-pud-a-zasoby-uhliku-v-celem-pudnim-profilu.pdf>

4.5 Hodnotící kritéria koncentrací a zásob prvků

Pro vyhodnocení obsahu přístupných forem prvků v minerálním horizontu byla využita hodnotící kritéria půdních vlastností podle Fialy et al. (2013) (Tabulka 2 a 3). Hodnotící kritéria obsahů přístupných forem prvků jsou rozdělena zvlášť pro půdy v jehličnatých a listnatých lesích. Pro potřeby potvrzení či vyvrácení hypotézy „Většina lesních půd vykazuje nízký obsah přístupného hořčíku a fosforu“ byly stanoveny referenční hodnoty nízkého obsahu:

P – referenční hodnota nízkého obsahu je 190 mg/kg.

Mg – referenční hodnota nízkého obsahu je 50 mg/kg.

Tabulka 2 Obsahy přístupných forem prvků v minerálním horizontu pod jehličnatými porosty (mg/kg) (Fiala et al. 2013 - upraveno)

OBSAH	P	K	Ca	Mg
Nedostatečný	<60	<30	<90	<20
Nízký	61-190	31-45	91-250	21-40
Vyhovující	191-320	46-60	251-560	41-80
Vysoký	321-450	61-90	561-1120	81-140
Luxusní	>450	>90	>1120	>140

Tabulka 3 Obsahy přístupných forem prvků v minerálním horizontu pod listnatými porosty (mg/kg) (Fiala et al. 2013 - upraveno)

OBSAH	P	K	Ca	Mg
Nedostatečný	<70	<40	<190	<25
Nízký	71-190	41-60	191-500	26-50
Vyhovující	191-310	61-90	501-950	51-90
Vysoký	311-430	91-120	951-1530	91-150
Luxusní	>430	>120	>1530	>150

Pro zásobu uhlíku v minerálním horizontu nebyla nalezena žádná hodnotící kritéria, stejně tak pro vyhodnocení obsahu prvků v organickém horizontu.

5 Výsledky

5.1 Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách České republiky a jednotlivých oblastí

Průměrné hodnoty celkových zásob uhlíku a prvků v organickém horizontu a minerálních horizontech 0-30 cm a 30-80 cm jsou uvedeny v Tabulce 4. V Tabulce 5 jsou zobrazeny hodnoty obsahů prvků v mg/kg. Průměrné hodnoty byly vypočítány z celého datového souboru, tedy mezi lety 2000 a 2020.

Celkové zásoby uhlíku byly na jednotku plochy nejvyšší v minerální vrstvě půdy 0-30 cm, v organickém horizontu byly naopak naměřeny nejnižší hodnoty, tedy v povrchové organické vrstvě lesních půd se nachází menší množství celkového uhlíku.

Zásoby živin na jednotku plochy byly rovněž nejnižší v organickém horizontu lesních půd, v nejhlubším minerálním horizontu byly pak nejvyšší, vzhledem k mocnosti této vrstvy. Ovšem jako koncentrace v mg/kg jsou výsledky odlišné. V případě vápníku, draslíku a fosforu byly nejnižší hodnoty naměřeny v minerálním horizontu 0-30 cm a v případě hořčíku byly nejnižší hodnoty v organickém horizontu.

Tabulka 4 Průměrné hodnoty celkových zásob prvků 2000-2020

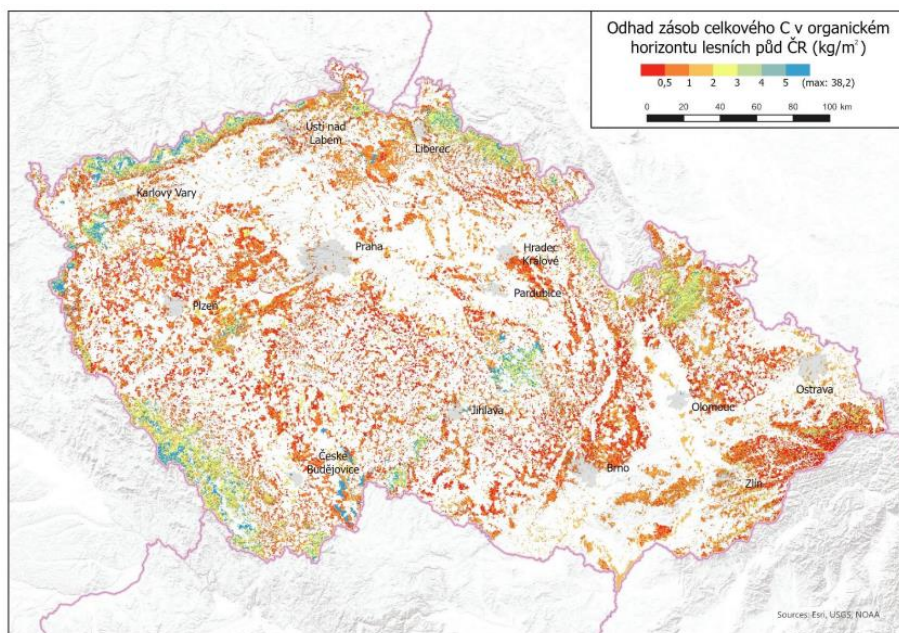
	C (kg/m ²)	Ca (g/m ²)	Mg (g/m ²)	K (g/m ²)	P (g/m ²)
org	1,60	13,78	6,94	7,33	4,30
0-30 cm	10,30	288,15	722,41	389,86	85,01
30-80 cm	5,87	2142,65	3579,24	2486,37	261,69

Tabulka 5 Průměrné hodnoty celkového obsahu prvků 2000-2020 (mg/kg)

	Ca	Mg	K	P
org	3143,0	1443,7	1302,2	819,1
0-30 cm	849,1	1990,1	1053,2	251,5
30-80 cm	3061,3	4677,3	3249,9	351,2

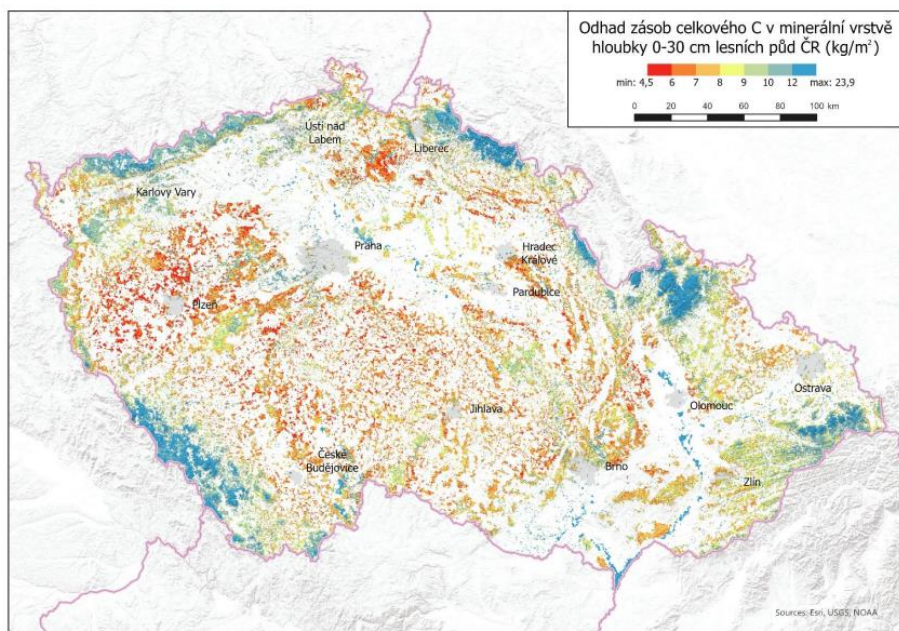
5.1.1 Uhlík

Odhad zásob celkového uhlíku v organickém horizontu lesních půd v České republice je poměrně variabilní (Obrázek 5). V horských oblastech byl odhad zásob uhlíku v organické vrstvě lesních půd mnohem vyšší než v nížinách, ovšem například v případě Beskyd byl obsah velmi malý. V Jizerských horách byla zásoba uhlíku v organické vrstvě převážně mezi 3-5 kg/m².



Obrázek 5 Odhad zásob celkového C v organickém horizontu lesních půd ČR (kg/m^2) (Vašát et al. 2021b)

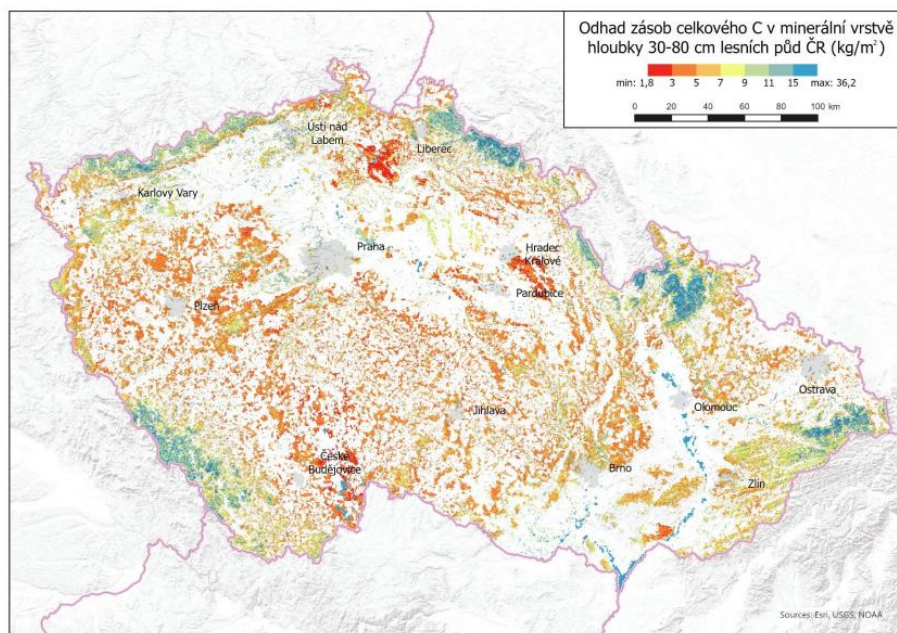
Odhad zásob celkového uhlíku v minerální vrstvě 0-30 cm byl opět v rámci území České republiky velmi variabilní, výrazně nejvyšší byl v horských oblastech České republiky (Obrázek 6). V Jizerských horách byl odhad zásoby uhlíku v této vrstvě převážně nad 12 kg/m^2 , tedy vyšší než na většině území České republiky.



Obrázek 6 Odhad zásob celkového C v minerální vrstvě hloubky 0-30 cm lesních půd ČR (kg/m^2) (Vašát et al. 2021b)

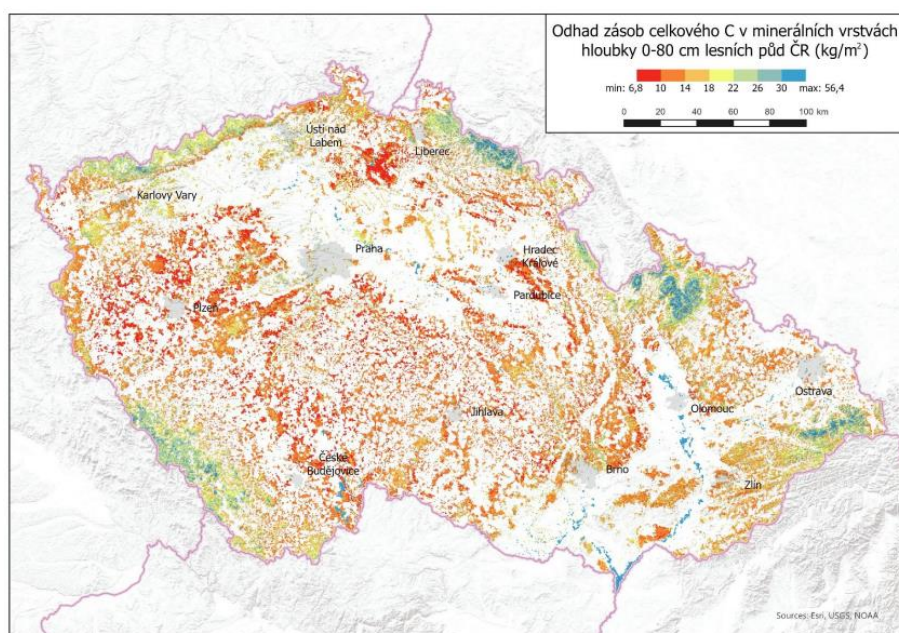
V minerální vrstvě lesních půd v hloubce 30-80 cm byl odhad zásob celkového uhlíku podobný jako v případě svrchnější minerální vrstvy, tedy že na horách se vyskytovala vyšší zásoba uhlíku než v nížinných oblastech České republiky (Obrázek 7). V Jizerských horách se

zásoba uhlíku ve vrstvě 30-80 cm pohybovala většinou nad 15 kg/m^2 , v některých místech nad 11 kg/m^2 .



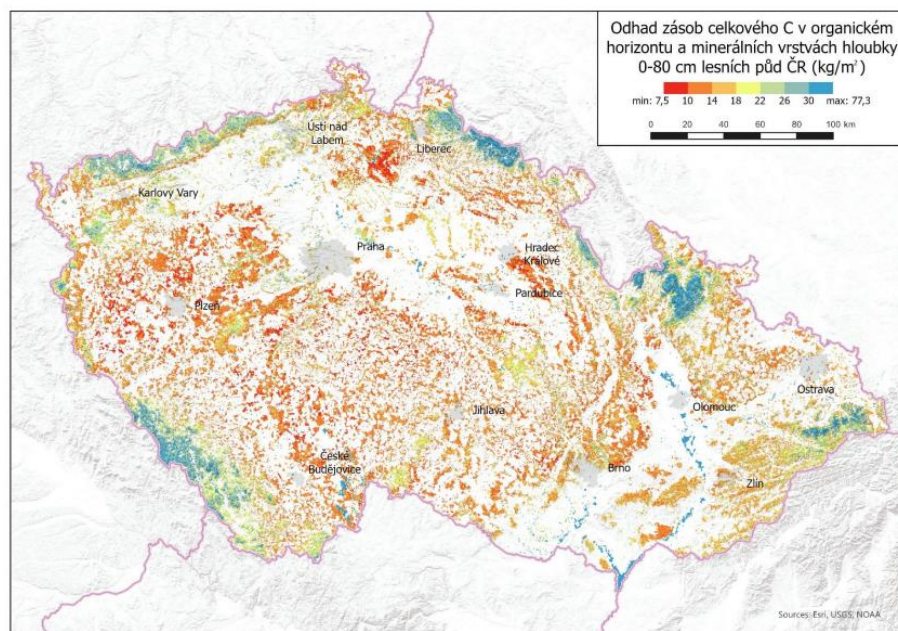
Obrázek 7 Odhad zásob celkového C v minerální vrstvě hloubky 30-80 cm lesních půd ČR (kg/m^2) (Vašát et al. 2021b)

Odhad zásob celkového uhlíku v celé minerální vrstvě půdy České republiky se pohyboval od $6,8$ do $56,4 \text{ kg/m}^2$ (Obrázek 8). V horských oblastech České republiky byly zásoby uhlíku vyšší než v nížinách, podobně jako v případě rozdělení minerálních vrstev na 0-30 cm a 30-80 cm.



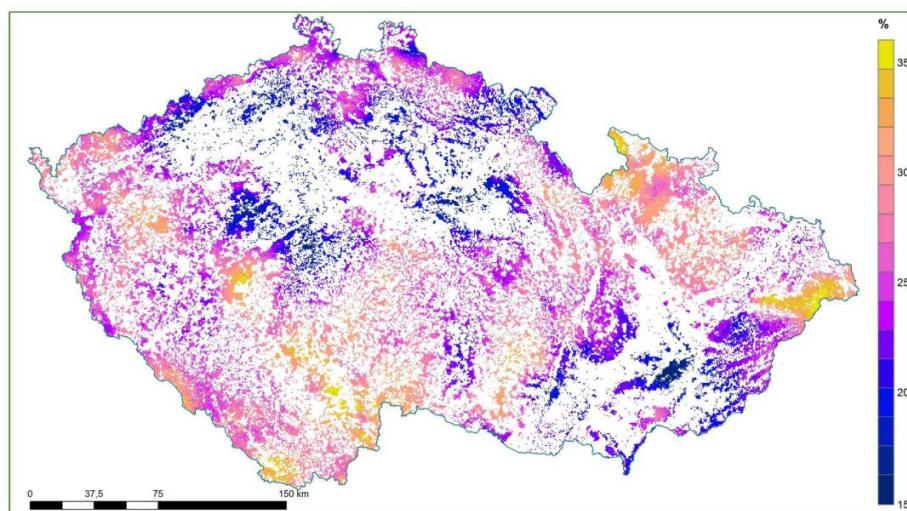
Obrázek 8 Odhad zásob celkového C v minerálních vrstvách hloubky 0-80 cm lesních půd ČR (kg/m^2) (Vašát et al. 2021b)

V případě odhadu zásob celkového uhlíku v organickém i minerálním horizontu lesních půd se obsah pohyboval mezi 7,5 a 77,3 kg/m² (Obrázek 9). V Jizerských horách se celková zásoba uhlíku v minerálním i organickém horizontu vyskytovala převážně nad 26 kg/m².



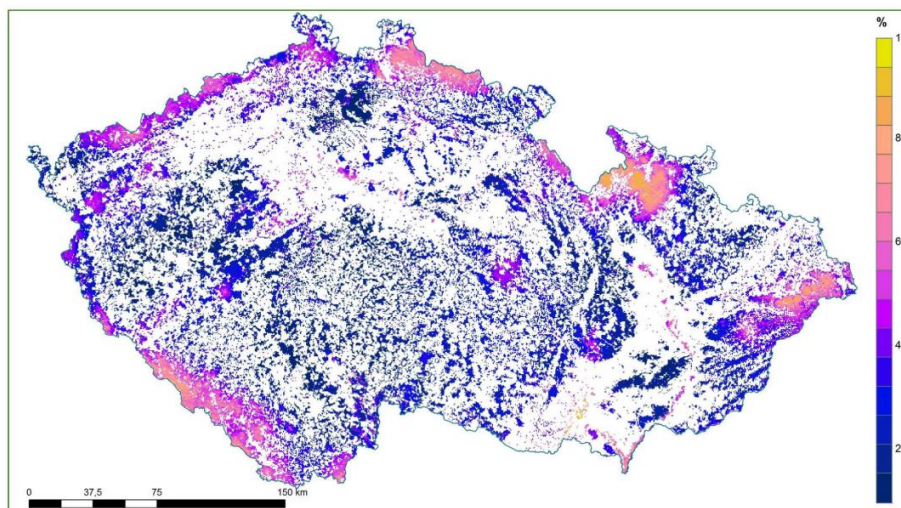
Obrázek 9 Odhad zásob celkového C v organickém horizontu a minerálních vrstvách hloubky 0-80 cm lesních půd ČR (kg/m²) (Vašát et al. 2021b)

V případě vyjádření obsahu organického uhlíku v procentech bylo možné pozorovat obsah organického uhlíku v lesních půdách v nadložním organickém horizontu mezi 15-35 % (Obrázek 10). Jeden z nejnižších obsahů organického uhlíku v nadložním organickém horizontu se nacházel nedaleko města Brna, na území přírodního parku Chřiby. Nejvyšší obsah organického uhlíku v nadložním organickém horizontu bylo možné pozorovat v lesích Moravskoslezských Beskyd, Rychlebských hor, Brd, na Třeboňsku a Českokrumlovsku.



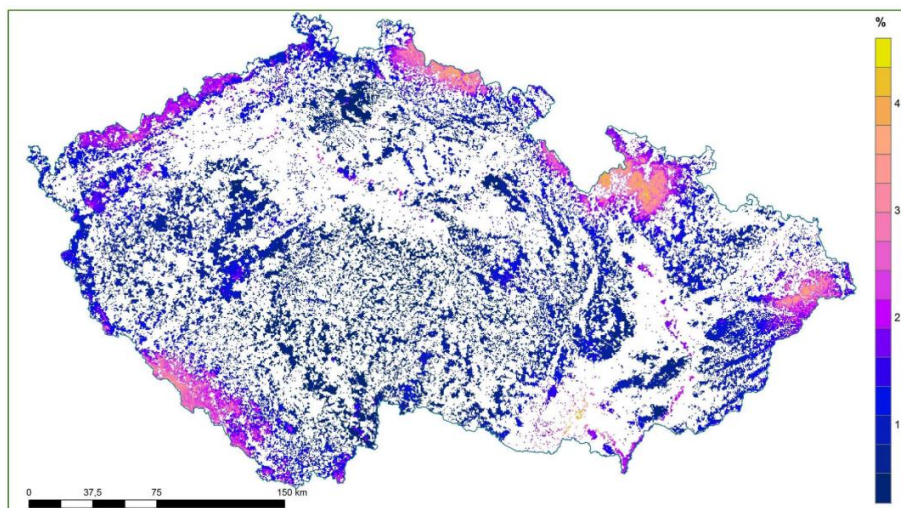
Obrázek 10 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (organický horizont) (Vašát et al. 2021a)

Obsah organického uhlíku v lesních půdách v minerálním horizontu 0-30 cm byl v České republice převážně v nižších hodnotách, do 4 %. V Jizerských horách byl ale obsah výrazně vyšší než ve většině oblastí ČR; v některých případech dosahoval až 10 %, ovšem většinou přibližně okolo 6-8 % (Obrázek 11). Vysoký obsah organického uhlíku byl zaznamenán v oblasti Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku, dále také ve vyšších nadmořských výškách Šumavy a Moravskoslezských Beskyd. Velmi nízký obsah organického uhlíku v minerální vrstvě 0-30 cm se vyskytoval například v oblasti Kokořínska, kde převažují písčité půdy (podzoly arenické) a borové lesy.



Obrázek 11 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (minerální horizont 0-30 cm) (Vašát et al. 2021a)

Obsah organického uhlíku v minerálním horizontu 30-80 cm byl na některých místech naměřen přes 4 %, ovšem ve většině lesních půd České republiky byl obsah výrazně nižší, do 2 % (Obrázek 12). V Jizerských horách byl stanoven obsah v nejvyšších hodnotách, právě okolo 4 %. Dále byl vyšší obsah organického uhlíku zaznamenán, podobně jako v minerálním horizontu 0-30 cm, v oblasti Králického Sněžníku, Hrubého Jeseníku, Šumavy a Moravskoslezských Beskyd.



Obrázek 12 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (minerální horizont 30-80 cm) (Vašát et al. 2021a)

5.1.2 Živiny

Průměrné hodnoty zásob a obsahů výměnných forem prvků v různých půdních vrstvách jsou uvedeny v Tabulce 6 a 7. V případě minerálních horizontů 0-30 cm a 30-80 cm lze výsledné hodnoty v Tabulce 7 porovnat s referenčními hodnotami, uvedenými v metodické části práce. Pro obsah výměnných forem fosforu a hořčíku byly stanoveny hodnoty v kategorii nízkého obsahu prvků: P do 190 mg/kg a Mg do 50 mg/kg.

Z tabulky průměrného obsahu výměnného hořčíku a fosforu lze vidět, že naměřené průměrné hodnoty v minerální vrstvě 0-30 cm i 30-80 cm v případě hořčíku přesahovaly stanovenou referenční hodnotu 50 mg/kg, tedy průměrný obsah přístupného hořčíku nebyl nízký, ovšem více než polovina hodnocených vzorků (přes 7271 z 10446 platných) vykazovala nižší hodnotu než 50 mg/kg, tedy na základě výsledků lze potvrdit, že obsah výměnného hořčíku je nízký. V případě průměrného obsahu fosforu byly v minerální vrstvě půdy 0-30 cm naměřeny hodnoty nižší, než byla stanovená referenční hodnota 190 mg/kg. V případě fosforu lze tedy taktéž potvrdit, že obsah v minerální vrstvě půdy je nízký.

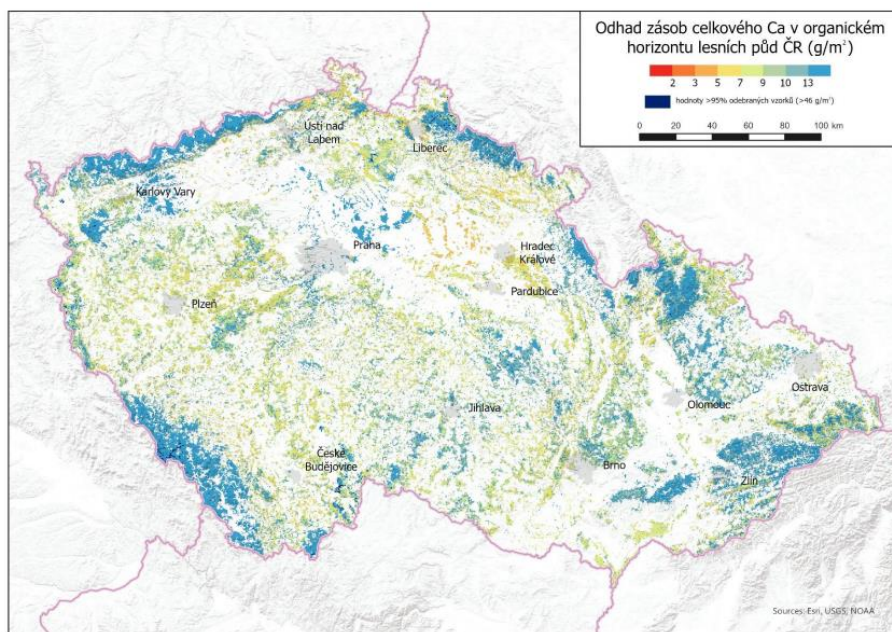
Tabulka 6 Průměrné hodnoty výměnných zásob prvků 2000-2020

ČR	Ca (g/m ²)	Mg (g/m ²)	K (g/m ²)	P (g/m ²)
org	10,47	1,58	1,58	0,13
0-30 cm	155,11	22,80	25,77	4,33
30-80 cm	634,19	119,44	78,28	16,44

Tabulka 7 Průměrné hodnoty výměnného obsahu prvků 2000-2020 (mg/kg)

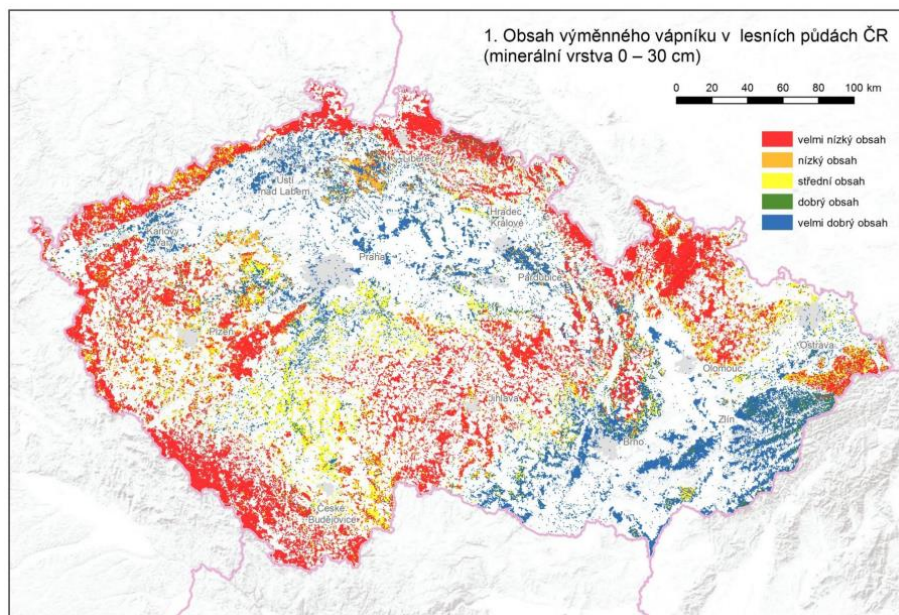
ČR	Ca	Mg	K	P
org	2192,04	292,04	338,26	28,28
0-30 cm	450,92	65,30	73,41	12,06
30-80 cm	826,35	152,04	99,63	21,16

Odhad zásob celkového vápníku v organickém horizontu lesních půd České republiky byl naměřen i v hodnotách přes 13 g/m² (Obrázek 13). Nejvyšší zásoby vápníku v organické vrstvě lesních půd byly naměřeny v horských oblastech České republiky z důvodu nejvyšší mocnosti nadložních organických horizontů v těchto polohách. Jizerské hory většinou dosahovaly hodnot nad 13 g/m². Všechny lesy České republiky dosahovaly poměrně vysokých hodnot, jak lze vidět na Obrázku 13, kde žádná z oblastí nebyla vyobrazena červenou barvou, která značí velmi nízkou zásobu vápníku.



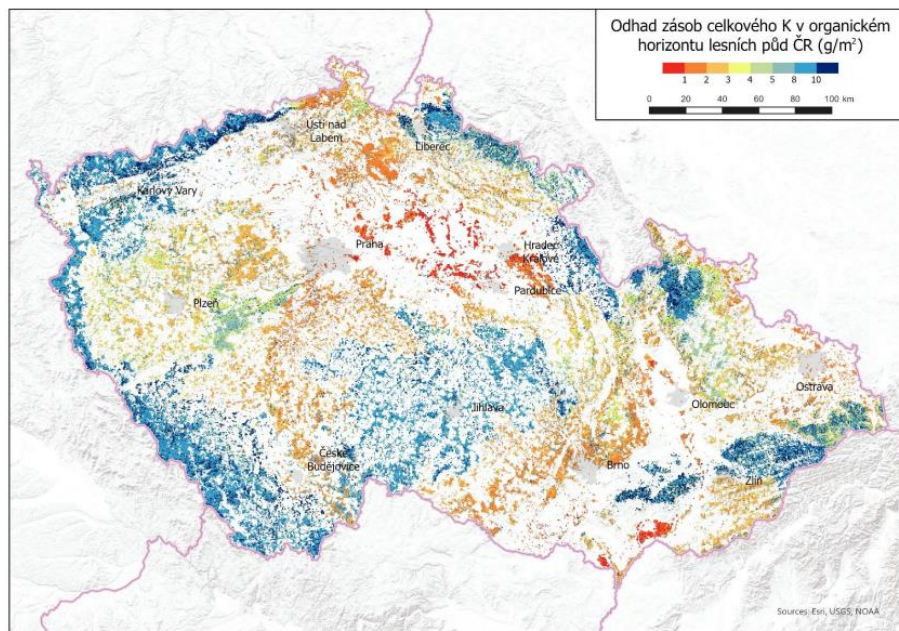
Obrázek 13 Odhad zásob celkového Ca v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m²) (Vašát et al. 2021b)

Na Obrázku 14 lze vidět obsah výměnného vápníku v minerální vrstvě půdy 0-30 cm. Ve většině pohraničních oblastí České republiky bylo možné pozorovat velmi nízký obsah výměnného vápníku. Naopak v nižších polohách (Polabí a jižní Morava) bylo možné pozorovat velmi vysoký obsah přístupného vápníku. Oblast Bílých Karpat a Hostýnsko-vsetínské hornatiny byla zařazena do kategorie velmi dobrého obsahu výměnného vápníku. V Jizerských horách byl obsah výměnného vápníku zařazen do kategorie velmi nízkého obsahu.



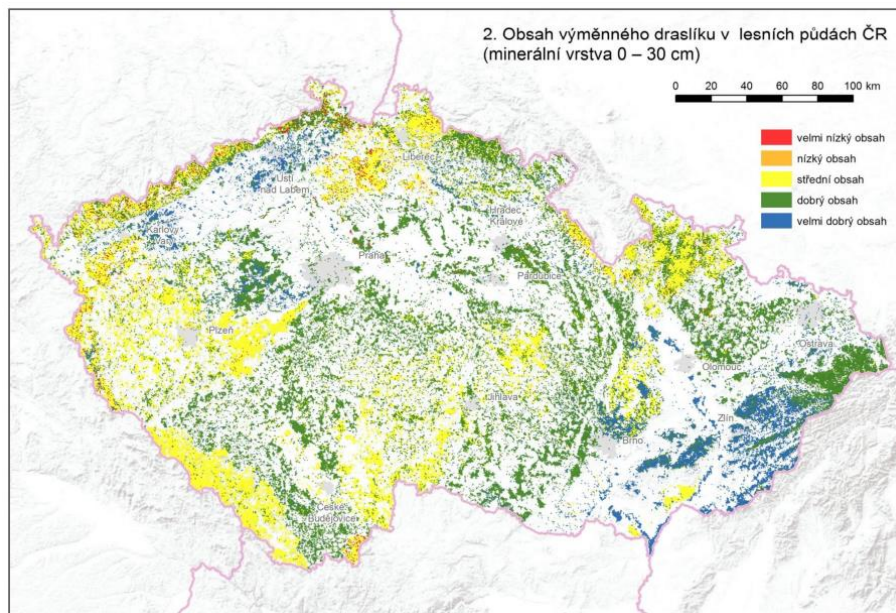
Obrázek 14 Obsah výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021)

Zásoby celkového draslíku v organickém horizontu lesních půd byly velmi variabilní. Na Obrázku 15 lze vidět, že ve vyšších nadmořských výškách byly zásoby draslíku vyšší, naopak v Polábí a na jižní Moravě byly zásoby velmi nízké.



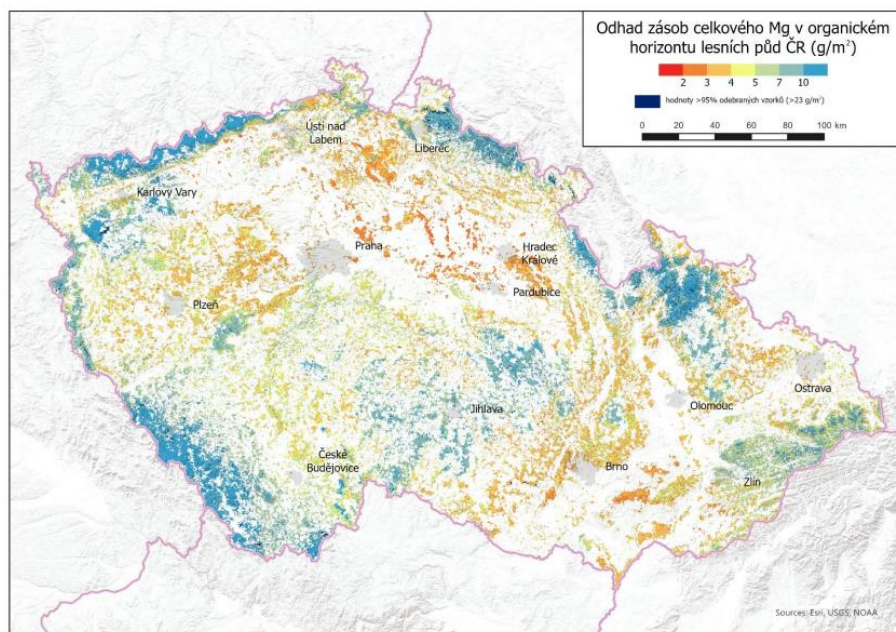
Obrázek 15 Odhad zásob celkového K v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m^2) (Vašát et al. 2021b)

Obsah výměnného draslíku v minerální vrstvě 0-30 cm byl na většině území České republiky střední až dobrý (Obrázek 16). V oblasti Zlínska byl obsah dokonce vyhodnocen jako velmi dobrý. V Jizerských horách dosáhl obsah výměnného draslíku v minerální vrstvě půdy 0-30 cm převážně střední kategorie.



Obrázek 16 Obsah výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021)

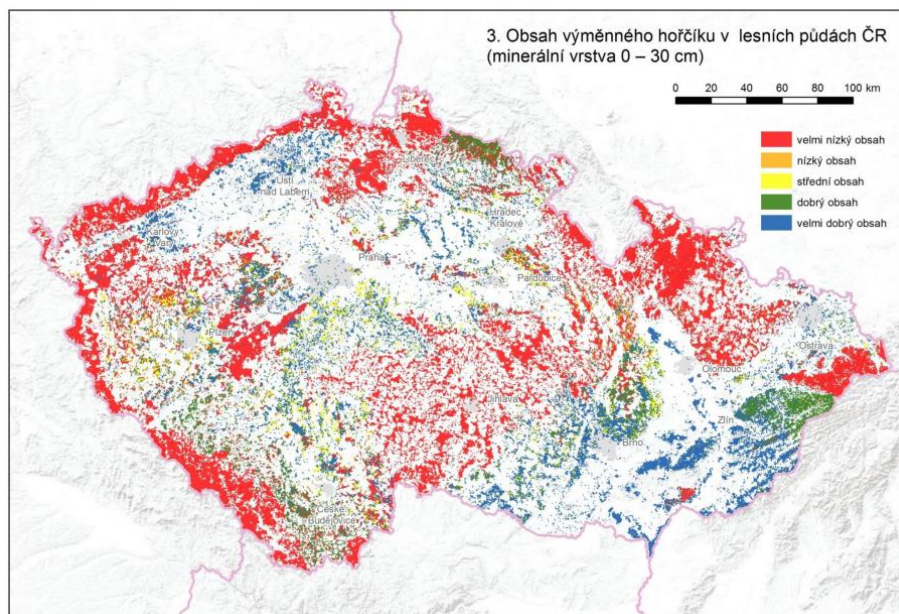
Odhad zásob celkového hořčíku v organickém horizontu lesních půd se pohyboval pouze v nízkých hodnotách (Obrázek 17). Na několika místech České republiky byly naměřeny hodnoty zásoby celkového hořčíku nad 23 g/m^2 . Nejvyšší zásoba hořčíku se nacházela v horských oblastech České republiky, nejnižší pak v Polabí a na jižní Moravě, podobně jako v případě draslíku. Z horských oblastí byly výjimkou Beskydy, kde byly zásoby hořčíku nižší než v ostatních horských oblastech ČR.



Obrázek 17 Odhad zásob celkového Mg v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m^2) (Vašát et al. 2021b)

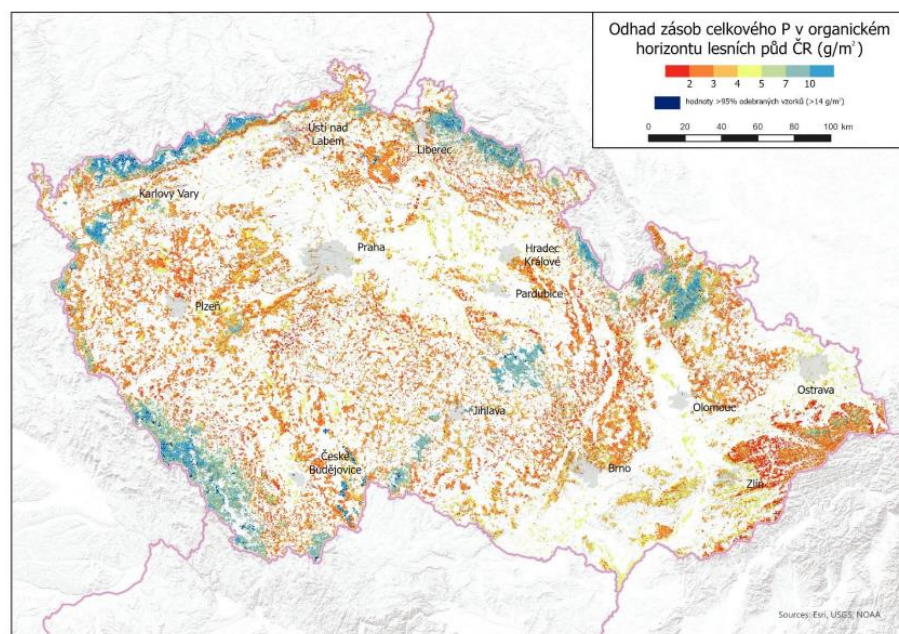
Obsah výměnného hořčíku v minerální vrstvě půdy byl na velké části území České republiky vyhodnocen v kategorii velmi nízké (Obrázek 18). Oblast Krkonoše a oblast

Hostýnsko-vsetínské hornatiny byly zařazeny převážně do kategorie dobrého obsahu a významná část Jihomoravského kraje dokonce do kategorie velmi dobrého obsahu. Jizerské hory, podobně jako další hory v České republice dosahovaly velmi nízkých hodnot obsahu výměnného hořčíku v minerální vrstvě půdy.



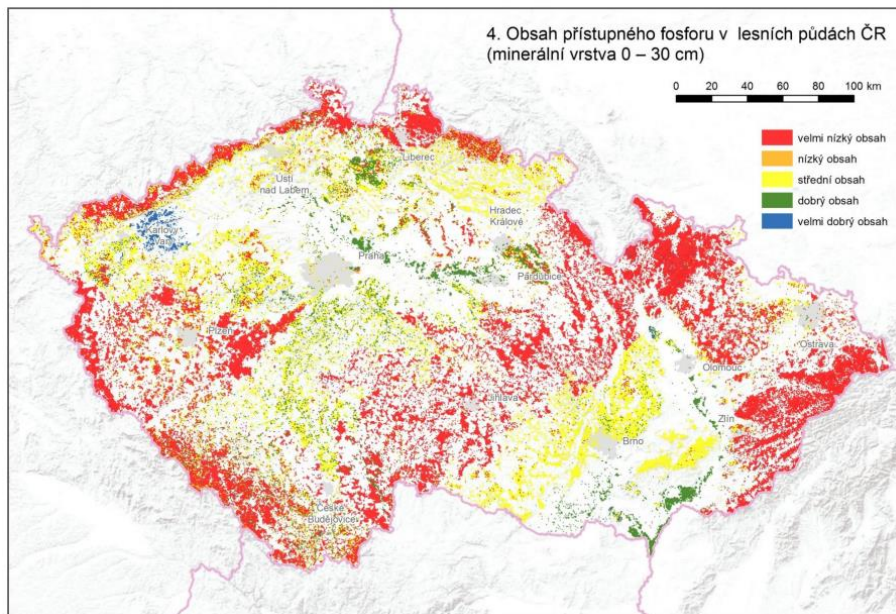
Obrázek 18 Obsah výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021)

Odhad zásob celkového fosforu v organickém horizontu se pohyboval, podobně jako v případě hořčíku, pouze v nižších hodnotách (Obrázek 19). Na některých místech České republiky byly naměřeny hodnoty nad 14 g/m^2 . Nejvyšší zásoby fosforu se nacházely především v horských oblastech, s výjimkou Beskyd, kde byly zásoby naopak velmi nízké.



Obrázek 19 Odhad zásob celkového P v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m²) (Vašát et al. 2021b)

Obsah přístupného fosforu v lesních půdách v minerální vrstvě 0-30 cm byl převážně velmi nízký až střední (Obrázek 20). Horské oblasti dosahovaly velmi nízkých hodnot obsahu přístupného fosforu, naopak Doupovské hory vykazovaly velmi vysoký obsah a oblast Dolnomoravského úvalu či Kokořínska dobrý obsah přístupného fosforu.



Obrázek 20 Obsah přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021)

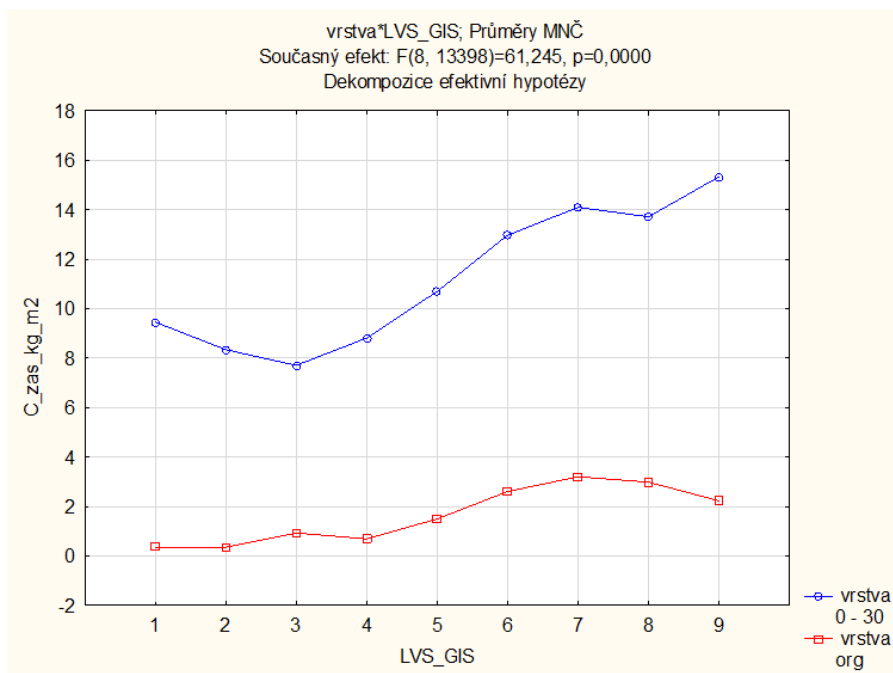
5.2 Vliv stanovištních podmínek na zásoby prvků v lesních půdách

Vyhodnoceny byly vlivy nadmořské výšky formou lesních vegetačních stupňů a vlivy druhu porostu – listnatých a jehličnatých lesů na koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách, nejčastěji pro organický horizont a minerální horizont 0-30 cm, které mají narozdíl od minerálního horizontu 30-80 cm větší význam pro výživu kořenů stromů a také z důvodu, že hodnoty pro organické horizonty a minerální horizont 0-30 cm bylo naměřeno více.

5.2.1 Vliv lesních vegetačních stupňů

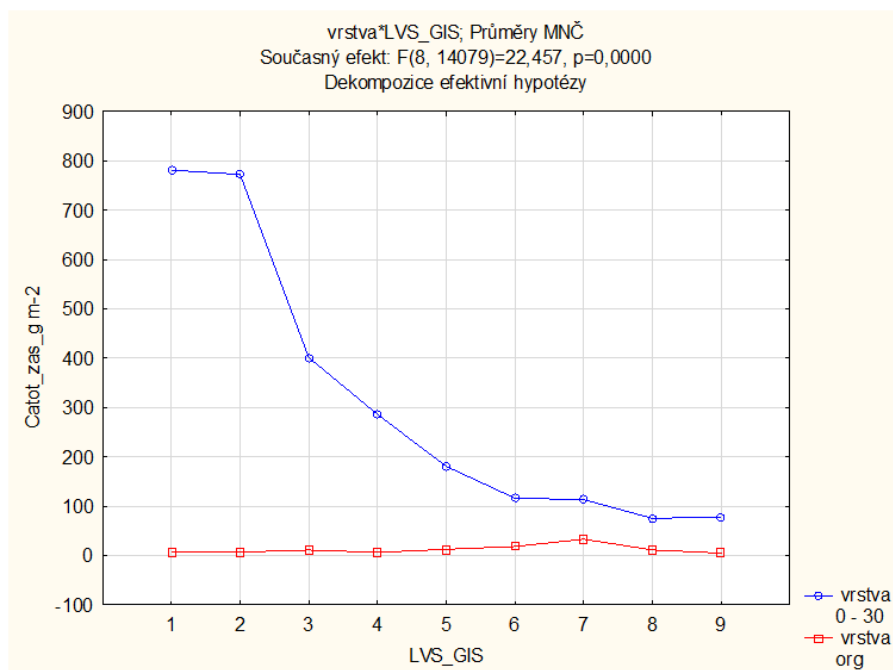
V organické vrstvě půdy byly vyšší zásoby uhlíku a živin na jednotku plochy spíše ve vyšších nadmořských výškách (lesních vegetačních stupních) než v nížinách, ovšem ne ve všech případech. Větší zásoba uhlíku a živin byla v nížinách spíše v minerální vrstvě půdy, ve vysokých nadmořských výškách byly tyto zásoby spíše nižší, ovšem opět ne ve všech případech.

Průměrná zásoba prvků na jednotku plochy v organickém horizontu v lesních vegetačních stupních v letech 2000-2020 byla statisticky vyhodnocena pro organický horizont a minerální horizont 0-30 cm. Průměrná zásoba uhlíku sledovala stoupající trend s vyšším vegetačním stupněm jak v organickém, tak i minerálním půdním horizontu 0-30 cm (Obrázek 21). Ovšem průměrná zásoba uhlíku v organickém horizontu v žádném LVS nepřesáhla zásobu v minerální vrstvě půdy.



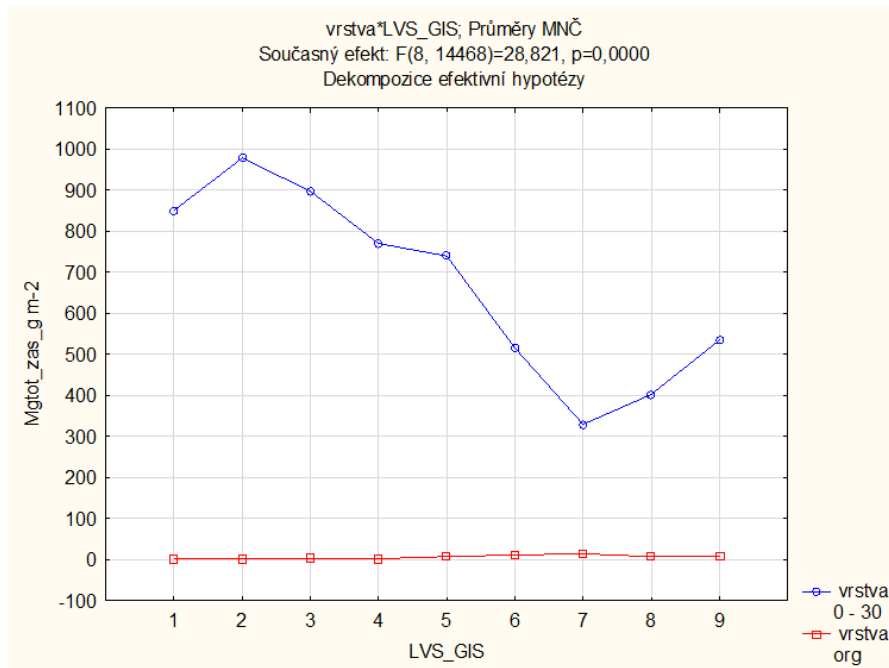
Obrázek 21 Průměrná zásoba uhlíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (kg/m²)

V případě vápníku byly průměrné hodnoty zásob v nižších lesních vegetačních stupních výrazně rozdílné od zásob ve vyšších nadmořských výškách (Obrázek 22). Lze tvrdit, že v minerálním půdním horizontu s rostoucí nadmořskou výškou zásoba vápníku na jednotku plochy klesá, ovšem ani v nejvyšším lesním vegetačním stupni neklesla zásoba vápníku v minerální vrstvě půdy pod hodnotu zásoby vápníku v organické vrstvě půdy.



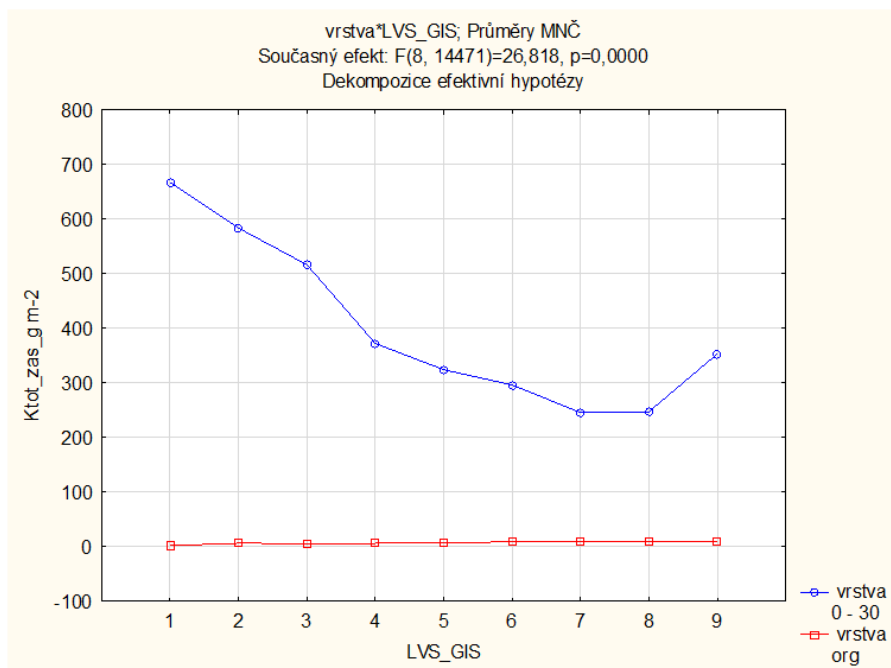
Obrázek 22 Průměrná zásoba vápníku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m²)

Průměrná zásoba hořčíku v organickém horizontu sledovala se zvyšující se nadmořskou výškou stoupající trend, naopak v minerálním horizontu se zásoba hořčíku na jednotku plochy s vyšší nadmořskou výškou spíše snižovala (Obrázek 23). Přestože v minerálním horizontu v 8. a 9. LVS, tedy v nejvyšších nadmořských výškách byl zaznamenán nárůst zásoby hořčíku, v nižších vegetačních stupních byly hodnoty stále výrazně vyšší. Podobně jako v případě předchozích vyhodnocení uhlíku a vápníku, ani v případě hořčíku nebyla zaznamenána vyšší zásoba v organické vrstvě půdy než v minerální.



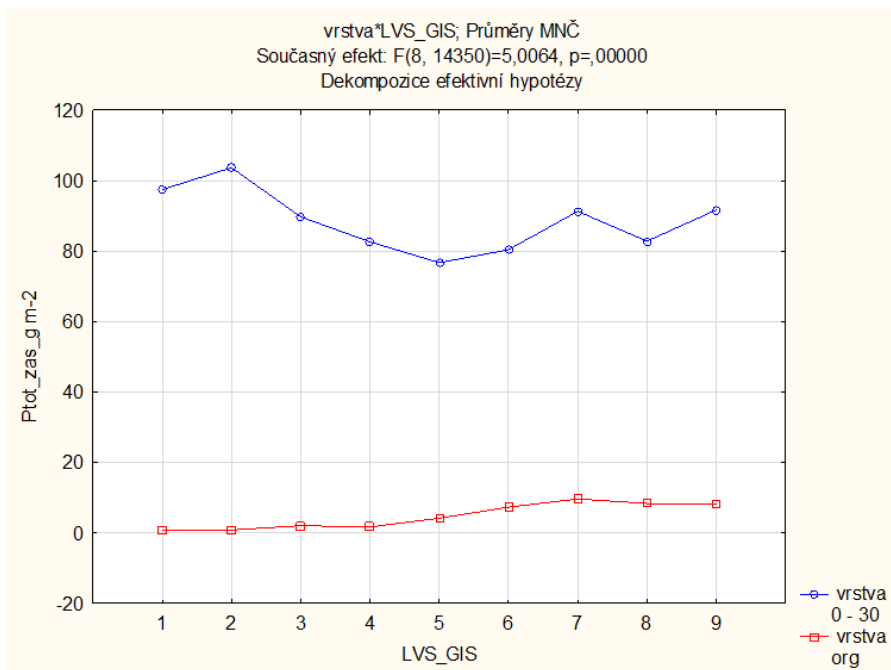
Obrázek 23 Průměrná zásoba hořčíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m²)

Průměrná zásoba draslíku na jednotku plochy v porovnání organického a minerálního horizontu 0-30 cm sledovala podobný trend jako v případě hořčíku. V minerálním horizontu zásoby s rostoucí nadmořskou výškou klesaly, s výjimkou 9. lesního vegetačního stupně, kde se průměrná zásoba mírně zvýšila (Obrázek 24). Naopak v organickém horizontu hodnoty zásoby draslíku spíše stoupaly s nadmořskou výškou.



Obrázek 24 Průměrná zásoba draslíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m²)

Průměrná zásoba fosforu na jednotku plochy v organickém horizontu byla výrazně vyšší ve vyšší nadmořské výšce (Obrázek 25). V minerálním horizontu 0-30 cm byl průběh hodnot spíše klesající, tedy vyšší hodnoty byly naměřeny v nižších lesních vegetačních stupních. Minimální průměrná zásoba fosforu byla v minerální vrstvě půdy 0-30 cm zaznamenána v 5. lesním vegetačním stupni, tedy jedlobukovém.



Obrázek 25 Průměrná zásoba fosforu v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m²)

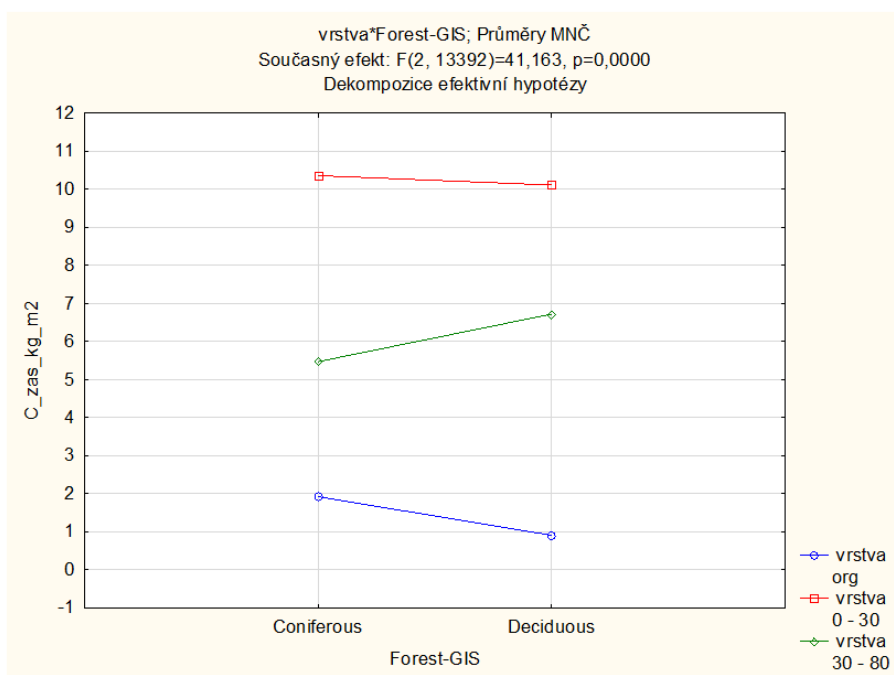
5.2.2 Vliv druhu porostu

V porovnání listnatých a jehličnatých porostů bylo možné pozorovat rozdíly v zásobách uhlíku a živin pod těmito dvěma druhy porostu. Zásoba uhlíku a živin na jednotku plochy pod listnatými porosty byla v minerální vrstvě půdy většinou vyšší než v půdách jehličnatých stromů, ovšem v nadložním organickém horizontu vykazovaly vyšší hodnoty spíše půdy pod jehličnatými porosty než pod listnatými (Tabulka 8). V průměru let 2000–2020 se průměrné zásoby živin v organické vrstvě půdy výrazně nelišily mezi listnatými a jehličnatými lesy. S výjimkou draslíku byla průměrná zásoba živin v organické vrstvě půdy na jednotku plochy vyšší vždy v půdách jehličnatých stromů. V případě minerálních vrstev půdy byly naopak až na výjimku zásoby uhlíku v minerální vrstvě 0–30 cm vyšší v listnatých lesích.

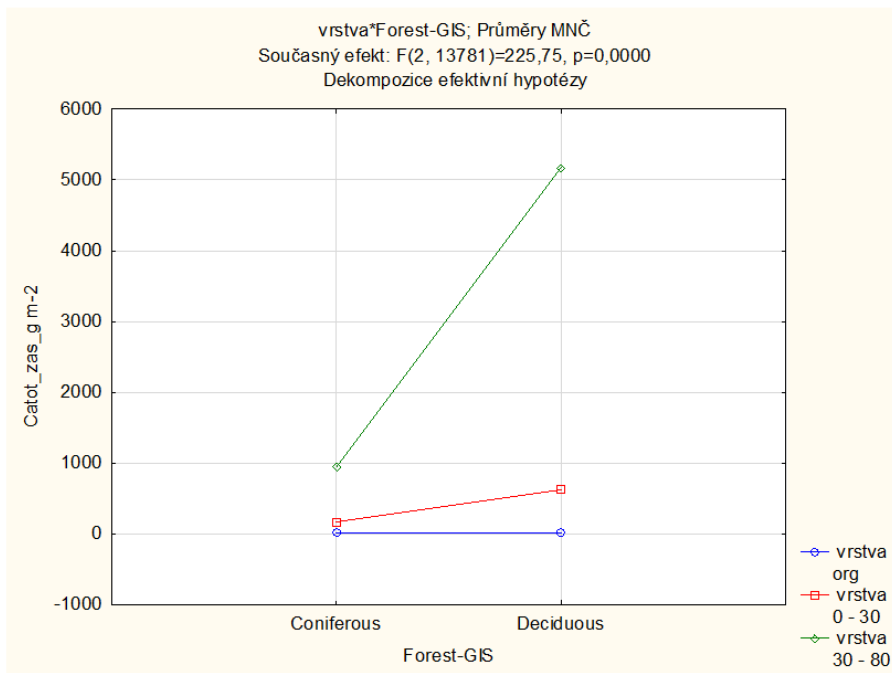
Tabulka 8 Průměrná zásoba prvků v půdě dle druhu porostu v letech 2000–2020

vrstva	Druh porostu	C (kg/m ²)	Ca (g/m ²)	Mg (g/m ²)	K (g/m ²)	P (g/m ²)
org	Jehličnatý	1,92	14,14	7,33	7,47	4,88
	Listnatý	0,91	14,12	6,53	7,72	3,16
0–30 cm	Jehličnatý	10,36	169,51	613,23	329,58	77,22
	Listnatý	10,11	623,14	973,10	533,68	103,46
30–80 cm	Jehličnatý	5,47	940,38	3348,78	2475,28	255,92
	Listnatý	6,72	5176,97	3934,93	2514,47	263,19

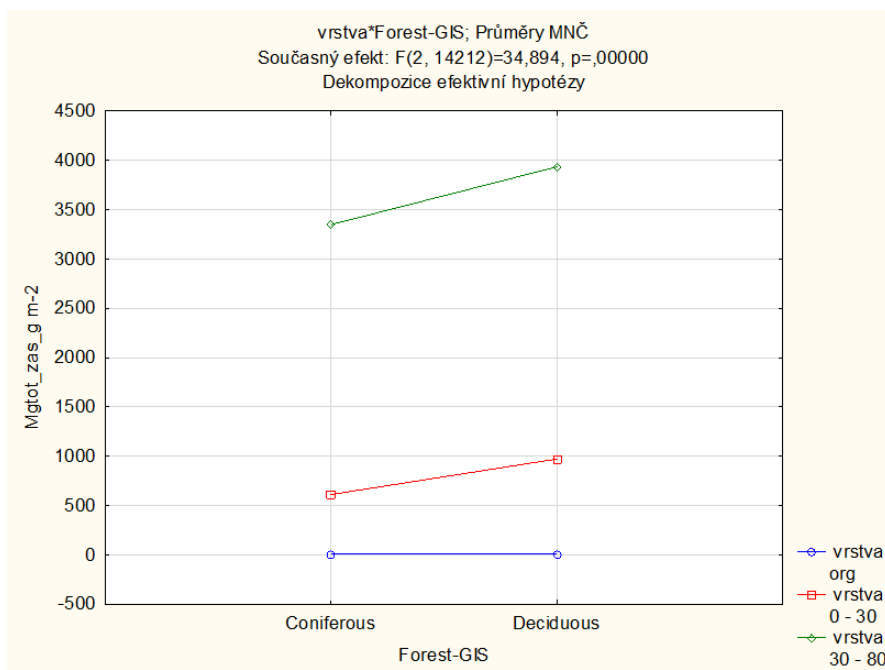
Přehledněji jsou výsledky průměrných zásob uvedeny v grafech na Obrázcích 26–30, kde lze pozorovat výrazné rozdíly mezi půdními horizonty. Ve všech případech dosahoval nejnižších průměrných zásob na jednotku plochy organický půdní horizont.



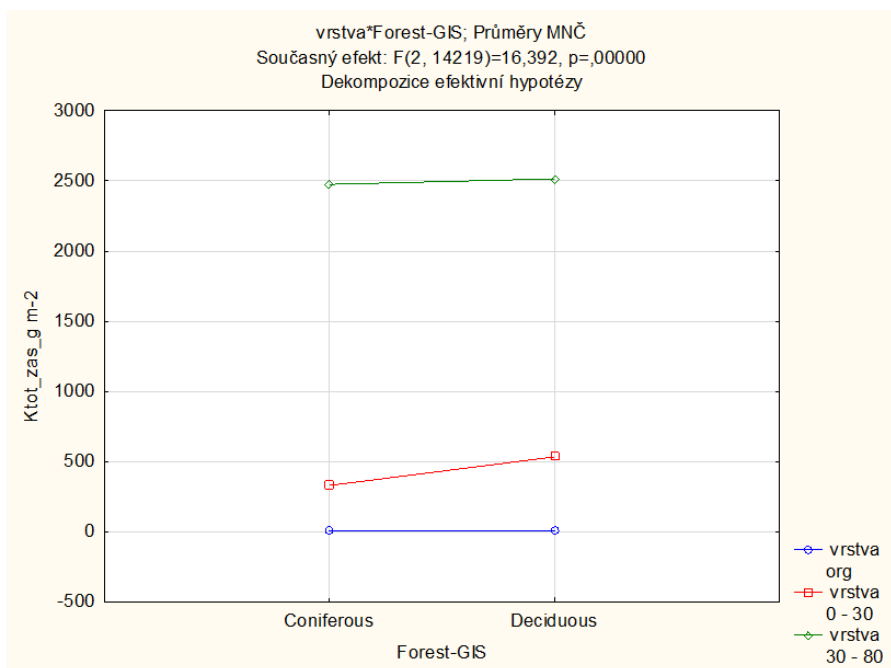
Obrázek 26 Průměrná zásoba uhlíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (kg/m²)



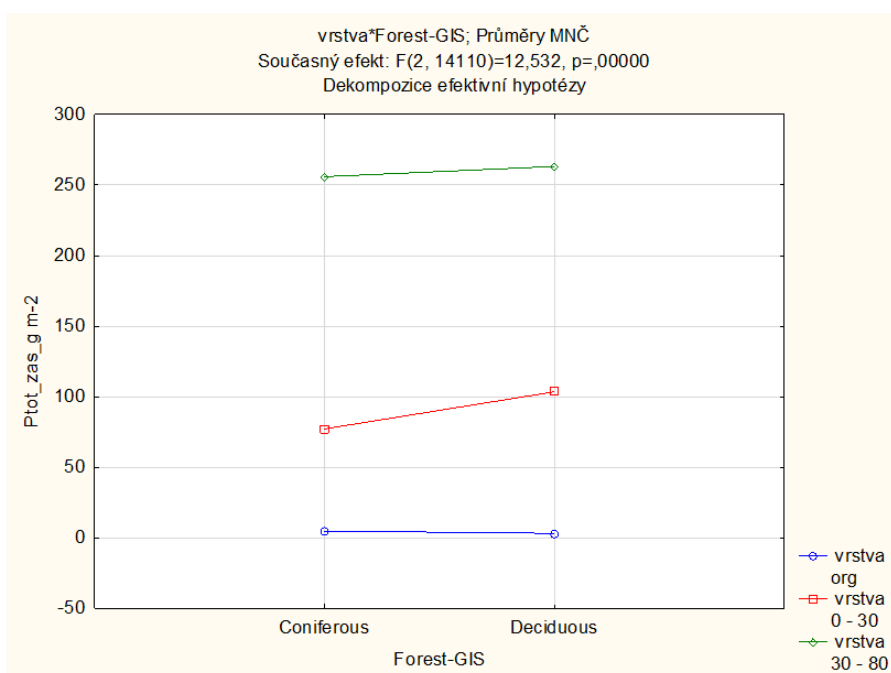
Obrázek 27 Průměrná zásoba celkového vápníku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2)



Obrázek 28 Průměrná zásoba celkového hořčíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2)



Obrázek 29 Průměrná zásoba celkového draslíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2)



Obrázek 30 Průměrná zásoba celkového fosforu v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2)

Průměrný obsah výměnných (v případě fosforu přístupných) forem prvků v půdě dle druhu porostu je uveden v Tabulce 9. V organické vrstvě půdy byly naměřeny nižší hodnoty obsahů výměnných forem prvků v půdách jehličnatých stromů. Podobně jako v případě organického horizontu, i v minerálním horizontu byly výsledky obdobné, s výjimkou obsahů přístupných forem fosforu v minerální vrstvě 30-80 cm, kde byly hodnoty vyšší v půdách jehličnatých lesů v porovnání s půdami listnatých lesů. Na základě těchto výsledků lze tvrdit,

že v půdách jehličnatých lesů se nachází výrazně menší obsah (koncentrace) přístupných forem prvků než v půdách listnatých lesů.

V porovnání hodnot obsahů přístupných forem prvků s referenčními hodnotami z Tabulky 2 a 3 v kapitole 4.5 bylo možné pozorovat v minerálních vrstvách půd v případě fosforu hodnoty z kategorie nedostatečného obsahu přístupných forem prvků v jehličnatém i listnatém porostu. V případě draslíku byly hodnoty v jehličnatých porostech v kategorii vyhovující až vysoké, v listnatých porostech pak v kategorii vysoké až luxusní. Obsah přístupných forem vápníku v jehličnatých porostech byl vyhodnocen v kategorii nízké až vyhovující a v listnatých porostech v kategorii vysoké až luxusní. V případě hořčíku byly hodnoty obsahu přístupných forem vyhodnoceny v kategorii vyhovující až vysoké pro jehličnaté porosty a v kategorii vysoké až luxusní pro listnaté porosty. Jako podprůměrné se ukázaly být obsahy přístupných forem fosforu v jehličnatém i listnatém porostu.

Tabulka 9 Průměrný obsah výměnných (resp. přístupných) forem prvků v půdě dle druhu porostu 2000-2020 (mg/kg)

vrstva	Druh porostu	Ca	Mg	K	P
org	Jehličnatý	1487,50	250,88	300,72	23,23
	Listnatý	4109,07	412,18	437,17	38,08
0-30 cm	Jehličnatý	235,00	44,26	58,99	10,23
	Listnatý	1061,06	125,45	111,64	16,26
30-80 cm	Jehličnatý	478,20	115,07	88,35	20,88
	Listnatý	1554,84	224,70	121,73	20,79

5.3 Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách Jizerských hor

Dle Tabulky 10 byly průměrné zásoby prvků na jednotku plochy výrazně vyšší v minerálních půdních horizontech než v organickém půdním horizontu. Nejvyšší průměrné zásoby vápníku, hořčíku, draslíku a fosforu byly nalezeny v nejhlubším minerálním horizontu 30-80 cm, kde vždy výrazně převažovaly nad průměrnými zásobami v minerálním horizontu 0-30 cm. V případě průměrné zásoby uhlíku byly nejvyšší hodnoty naměřeny v minerálním horizontu 0-30 cm.

Tabulka 10 Průměrné zásoby prvků v Jizerských horách 2000-2018

JH	C (kg/m ²)	Ca (g /m ²)	Mg (g/ m ²)	K (g/m ²)	P (g/m ²)
org	2,22	8,84	8,56	7,47	7,22
0-30 cm	14,18	121,31	333,67	178,20	59,54
30-80 cm	10,98	461,06	2249,80	1343,23	241,61

Hodnoty průměrného obsahu prvků v Jizerských horách v mg/kg jsou uvedeny v Tabulce 11. Ve všech případech bylo po přepočtu na jednotku mg/kg možné pozorovat vyšší hodnoty obsahů prvků v organické vrstvě půdy než v minerální vrstvě 0-30 cm. Hodnoty v minerální vrstvě půdy 30-80 cm ve všech případech převyšovaly hodnoty v minerální vrstvě 0-30 cm.

Tabulka 11 Průměrný celkový obsah prvků v Jizerských horách 2000-2018 (mg/kg)

JH	Ca	Mg	K	P
org	1365,96	1132,08	1019,65	997,04
0–30 cm	445,53	1116,94	565,21	212,28
30–80 cm	746,63	3332,54	1897,67	364,87

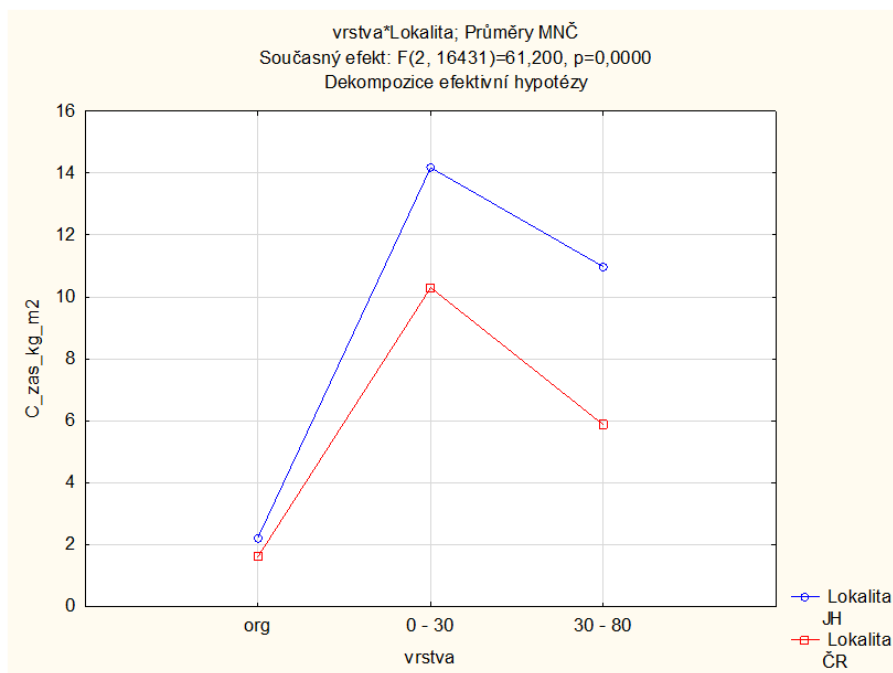
5.4 Srovnání obsahů a zásob prvků v Jizerských horách s hodnotami celé České republiky

V Tabulce 12 je uvedeno srovnání průměrných zásob prvků v Jizerských horách a průměru České republiky. Nelze jednoznačně potvrdit, že se v Jizerských horách nacházela větší zásoba živin a uhlíku na jednotku plochy než v průměru České republiky. V případě uhlíku byla zásoba ve všech horizontech v Jizerských horách vyšší než v průměru České republiky. Ve všech případech zásob Ca, Mg, K a P v minerálních vrstvách byla vyšší zásoba na jednotku plochy v průměru České republiky než v Jizerských horách. Výsledky v organickém horizontu byly vyšší v Jizerských horách, ovšem s výjimkou zásob vápníku.

Tabulka 12 Průměrné zásoby prvků v Jizerských horách (JH) a v průměru ČR 2000-2020

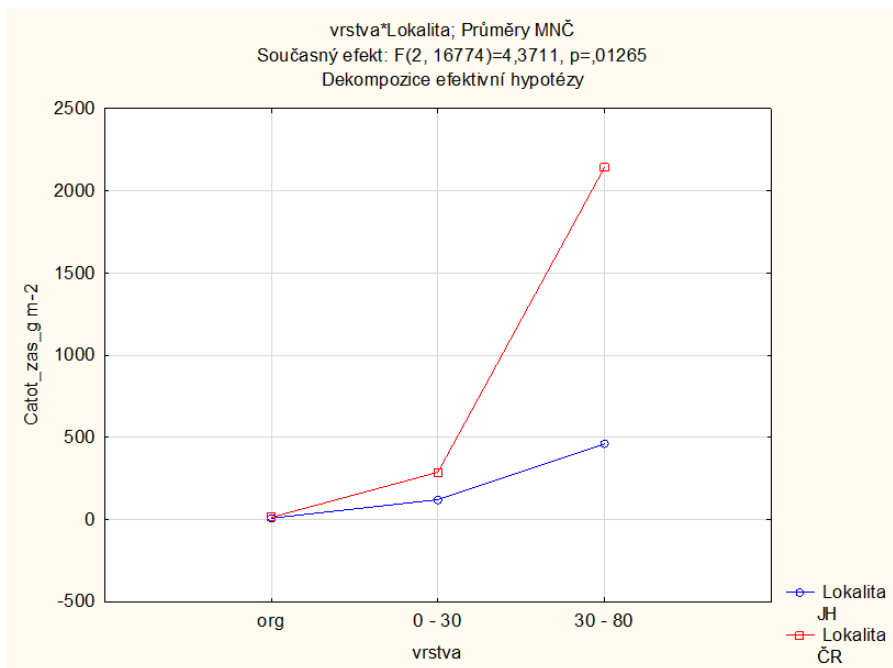
vrstva	Lokalita	C (kg/m ²)	Ca (g/m ²)	Mg (g/m ²)	K (g/m ²)	P (g/m ²)
org	JH	2,22	8,84	8,56	7,47	7,22
	ČR	1,60	13,78	6,94	7,33	4,30
0–30 cm	JH	14,18	121,31	333,67	178,20	59,54
	ČR	10,30	288,15	722,41	389,86	85,01
30–80 cm	JH	10,98	461,06	2249,80	1343,23	241,61
	ČR	5,87	2142,65	3579,24	2486,37	261,69

Analýza rozptylu zásob uhlíku v Jizerských horách v letech 2000-2020 v porovnání středních hodnot České republiky je uvedena na Obrázku 31. Na lokalitě Jizerských hor se nacházela větší zásoba uhlíku na jednotku plochy než v průměru České republiky. V organickém půdním horizontu jsou zásoby podobné, ovšem v minerálních půdních horizontech byly zásoby uhlíku v Jizerských horách výrazně vyšší než průměrné hodnoty České republiky.



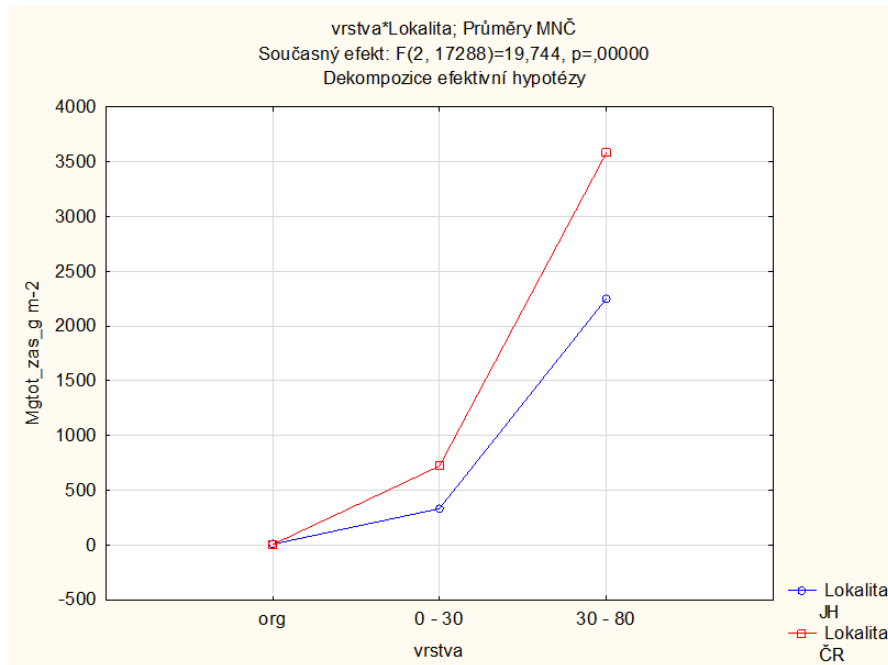
Obrázek 31 Průměrná zásoba uhlíku v Jizerských horách a v průměru ČR 2000-2020 (kg/m²)

Zásoby vápníku v porovnání Jizerských hor s průměrnými hodnotami ČR v letech 2000-2020 (Obrázek 32) byly v organickém půdním horizontu a minerálním horizontu 0-30 cm srovnatelné, v minerálním horizontu 30-80 cm byly naměřeny výrazně vyšší hodnoty na jednotku plochy v průměru ČR než v Jizerských horách.



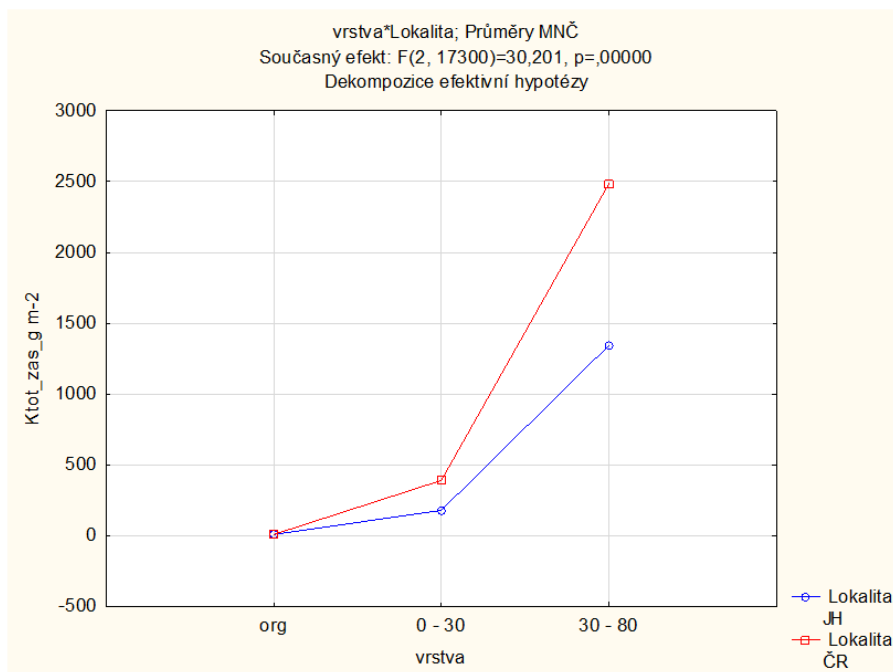
Obrázek 32 Průměrná zásoba vápníku v Jizerských horách a v průměru ČR 2000-2020 (g/m²)

Zásoba hořčíku na jednotku plochy v organickém horizontu byla podobná v Jizerských horách s průměrnou hodnotou ČR (Obrázek 33), ovšem průměrné hodnoty v ČR byly nižší než v průměru Jizerských hor. V minerálních horizontech dosahovaly vyšších hodnot průměrné hodnoty ČR.



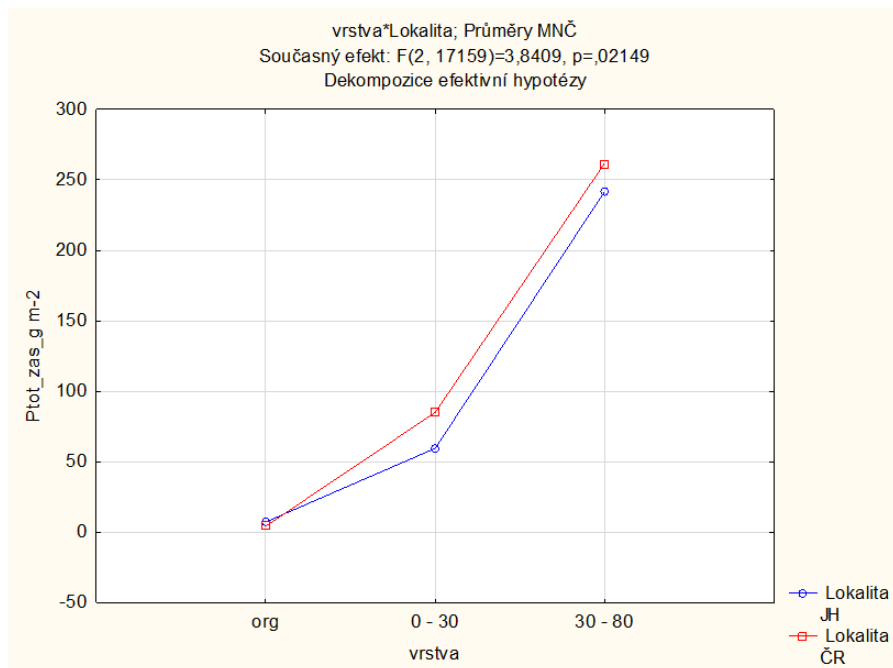
Obrázek 33 Průměrná zásoba hořčíku v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m²)

Podobně jako v případě hořčíku, také u draslíku byly vyšší hodnoty na jednotku plochy naměřeny v průměru České republiky narozdíl od Jizerských hor, s výjimkou organického horizontu, kde byly průměrné hodnoty České republiky nižší (Obrázek 34, Tabulka 12).



Obrázek 34 Průměrná zásoba draslíku v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m²)

Průměrná zásoba fosforu na jednotku plochy byla naměřena vyšší v Jizerských horách v případě organického půdního horizontu, naopak v případě minerálního horizontu 0-30 cm i 30-80 cm byly naměřeny vyšší hodnoty v průměru ČR než v Jizerských horách (Obrázek 35).



Obrázek 35 Průměrná zásoba fosforu v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m²)

Průměrný obsah výměnných forem prvků v porovnání Jizerských hor a průměru České republiky je uveden v Tabulce 13. Ve všech případech bylo možné pozorovat nižší obsah výměnných forem prvků v Jizerských horách než v průměru České republiky. V porovnání hodnot s referenčními hodnotami bylo možné v minerálních horizontech České republiky pozorovat poměrně dobrý obsah, ovšem v Jizerských horách byl obsah spíše nedostatečný nebo nízký. V případě hořčíku byl obsah v České republice vyhovující, ovšem v Jizerských horách spíše nedostatečný. Obsah fosforu byl České republice i v Jizerských horách výrazně nedostatečný. Obsah draslíku, jako jediný z prvků, byl v minerálních půdách České republiky i Jizerských hor dostatečný.

Tabulka 13 Průměrné hodnoty obsahu výměnných (resp. přístupných) forem prvků v Jizerských horách a v průměru ČR (mg/kg)

vrstva	Lokalita	Ca	Mg	K	P
org	JH	766,06	234,35	324,96	20,84
	ČR	2192,04	292,04	338,26	28,28
0–30 cm	JH	151,55	26,57	50,57	7,55
	ČR	450,92	65,30	73,41	12,06
30–80 cm	JH	177,60	29,56	40,80	15,60
	ČR	826,35	152,04	99,63	21,16

6 Diskuse

V této části práce jsou diskutovány výsledky vyhodnocené za pomoci statistických metod a následně porovnány s dalšími studii a výzkumy provedenými jinými autory, ať už na území České republiky a Jizerských hor, nebo na území jiných států. Vyhodnocení správnosti stanovených hypotéz proběhlo s využitím poznatků získaných v literární rešerši a na podkladě studií jiných autorů.

6.1 Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách České republiky

6.1.1 Uhlík

Na základě výsledků bylo vyhodnoceno, že organická vrstva půdy obsahuje nižší zásobu celkového uhlíku než minerální horizont. Studie Dieleman et al. (2013) dospěla k závěru, že s rostoucí hloubkou v minerálním horizontu klesá zásoba půdního organického uhlíku. Toto tvrzení koresponduje s našimi výsledky, které zaznamenaly zásobu uhlíku v minerální vrstvě 0-30 cm přes 10 kg/m², přičemž v hloubce 30-80 cm byla koncentrace bezmála poloviční, přestože mocnost této vrstvy je větší. Z Obrázků 10-12 vyplývá, že procentuální obsah organického uhlíku se v rámci České republiky výrazně liší, ovšem v minerálním horizontu bylo dosaženo maximálních hodnot obsahu organického uhlíku přes 35 % a v minerálním horizontu 30-80 cm pouze okolo 4 %. Lze tedy klesající trend zásob organického uhlíku s hloubkou potvrdit.

Cramer et al. (2016) naměřili vyšší zásoby uhlíku v půdách smrkových porostů, nižší pak v půdách bukových porostů. Toto tvrzení jen částečně koresponduje s výsledky, které popisují, že vyšší průměrná zásoba uhlíku se nachází v půdách jehličnatých stromů v případě organického horizontu a minerálního horizontu 0-30 cm, ovšem v případě minerálního horizontu 30-80 cm byly naměřeny vyšší hodnoty v půdách listnatých lesů.

Výsledky ukazují, že s rostoucí nadmořskou výškou se zvyšuje zásoba celkového uhlíku v půdě, jak pro organický, tak pro minerální půdní horizont. Také Dieleman et al. (2013) tvrdí, že se s nadmořskou výškou zvyšují zásoby uhlíku v půdě. V případě obsahu organického uhlíku je obsah ve vyšší nadmořské výšce zpravidla také vyšší.

6.1.2 Živiny

Vápník

Kučera a Adolt (2019) vyhodnotili v rámci Národní inventarizace lesů v České republice (2011-2015), že lesní půdy, a především jejich svrchní horizonty obsahují velmi vysoké zásoby přístupného vápníku, ovšem nízké zásoby celkového vápníku. Zásoba přístupného vápníku na plochu byla vyšší v podpovrchových vrstvách půdy, v minerálních horizontech.

Cramer et al. (2016) tvrdí, že nejvyšší obsah vápníku je v půdách bukových porostů, nejmenší pak v půdách smrkových porostů. Výsledky Cramer et al. (2016) lze na základě našich výsledků v případě minerálního horizontu potvrdit, v případě organického horizontu byly průměrné hodnoty listnatých a jehličnatých porostů srovnatelné. Nízký obsah kationtů vápníku má za následek acidifikaci půdy, tedy její okyselování. Nízký obsah vápníku v půdách

smrkových porostů poukazuje také na fakt, že v půdách jehličnatých lesů je zpravidla nižší pH půdy než v lesích listnatých. Z našich výsledků vyplývá, že průměrná zásoba výměnného vápníku se zvyšuje s rostoucí hloubkou pod povrchem. Bylo možné také pozorovat zvyšující se zásobu celkového vápníku s rostoucí nadmořskou výškou, ovšem pouze v organickém horizontu lesních půd. V minerální vrstvě půdy byly naměřeny nejvyšší hodnoty zásoby celkového vápníku v nízkých LVS, naopak ve vysokých LVS, a tím i vysokých nadmořských výškách, byly průměrné zásoby vápníku v půdě minimální.

Šrámek et al. (2014b) uvádějí, že na většině ploch ČR se v minerálních horizontech nachází nedostatečný obsah vápníku, přičemž jako výrazně deficitní uvádějí hodnotu výrazného nedostatku 140 mg/kg. V našich výsledcích je v minerálním horizontu uvedena průměrná hodnota celkového obsahu vápníku 849,10 mg/kg, tedy výrazně vyšší než právě hodnota nedostatečného obsahu vápníku podle Šrámka et al. (2014b).

Obsah výměnného vápníku v minerální vrstvě půdy 0-30 cm byl ve vyšších nadmořských výškách nízký.

Hořčík

Kučera a Adolt (2019) vyhodnotili, že v České republice se nachází velká variabilita v zásobách přístupného hořčíku, kdy lze najít lokality s velmi nízkými i s velmi vysokými zásobami přístupného hořčíku. Svrchní vrstvy lesních půd ovšem obsahují převážně nízké zásoby přístupného hořčíku. Zásoby přístupného hořčíku na plochu byly výrazně vyšší v podpovrchových minerálních horizontech.

Dle Borůvky et al. (2005b) lze pozorovat vyšší obsah hořčíku v půdách nižších nadmořských výšek, tedy i nižších lesních vegetačních stupňů a zároveň v půdách bukových porostů. Podobné výsledky publikovali také Cramer et al. (2016). Z našich výsledků vyplývá, že v minerální vrstvě půdy jsou vyšší průměrné zásoby hořčíku v půdách listnatých lesů, podobně jako ukazují výše zmínění autoři. V organické vrstvě půdy byla naměřena vyšší průměrná zásoba hořčíku v půdách jehličnatých lesů. Průměrné zásoby hořčíku v našem výzkumu byly výrazně nejnižší v organické vrstvě půdy, poté v minerální vrstvě půdy 0-30 cm a v hloubce 30-80 cm byly hodnoty nejvyšší.

Dle mapy Vašát et al. (2021b) vytvořené na základě dat z námi použité databáze lze pozorovat v organické vrstvě půdy vyšší zásobu celkového hořčíku v organickém horizontu spíše ve vyšších nadmořských výškách České republiky. Vyšší obsah přístupného hořčíku lze nalézt v minerálním horizontu spíše v nižších nadmořských výškách.

Draslík

Podle Kučery a Adolta (2019) byl obsah přístupného i celkového draslíku ve svrchních horizontech lesních půd v rámci Národní inventarizace lesů 2011-2015 na dobré úrovni. Dále byl naměřen vyšší obsah přístupného draslíku (mg/kg) v povrchových organických horizontech než podpovrchových minerálních horizontech. Ovšem naopak plošné průměrné zásoby draslíku sledovaly v našem výzkumu s hloubkou stoupající trend, kdy v organické vrstvě půdy byla naměřena průměrná hodnota draslíku pouze 7,33 g/m², v minerálním horizontu 0-30 cm pak 389,86 g/m² a v hloubce 30-80 cm hodnotu 2486,37 g/m².

Podle Cramer et al. (2016) lze očekávat nižší hodnoty celkového obsahu draslíku spíše ve smrkových porostech. Půdy v listnatých lesích měly průměrnou zásobu draslíku ve všech půdních horizontech vyšší než v jehličnatých lesích.

Vyšší zásoby draslíku v organickém horizontu lze pozorovat spíše v horských oblastech. Nižší hodnoty průměrné zásoby draslíku v minerálním horizontu byly naměřeny také v horských LVS.

Fosfor

Fosfor je lépe přístupný spíše při jen slabě kyselém pH půdy, tedy v kyselých půdách smrkových porostů může být přístupného fosforu nedostatek (Novotný et al. 2018). Tyto výsledky podporují také hodnotící kritéria Fialy et al. (2013), která vyjadřují jako nedostatečný obsah minerálním horizontu jehličnatých porostů hodnotu 60 mg/kg, přitom jako nedostatečná v případě minerálního horizontu listnatých stromů je již hodnota pod 70 mg/kg, tedy pro jehličnaté stromy je jako nedostatek klasifikována nižší hodnota. V minerálním horizontu byly naměřeny vyšší hodnoty v půdách listnatých lesů, což potvrzuje tvrzení, že se zde nachází větší zásoba fosforu než v půdách jehličnatých lesů. V organické vrstvě půdy pak byla naměřena vyšší průměrná zásoba fosforu v půdách jehličnatých lesů.

Průměrná zásoba fosforu v organické vrstvě půdy byla v našem výzkumu 4,30 g/m², v minerálním horizontu 0-30 cm pak hodnota 85,01 g/m² a v minerálním horizontu 30-80 cm hodnota 261,69 g/m². Dle map vytvořených Vašátem et al. (2021b) bylo možné pozorovat v organickém horizontu lesních půd vyšší zásoby celkového fosforu spíše v horských oblastech České republiky než v nížinách. Ve studii Novotného et al. (2018) byl v minerálních vrstvách naměřen nižší obsah fosforu (mg/kg) než v organické vrstvě půdy, což podporuje výsledky našeho výzkumu. Obsah přístupného fosforu v minerálních vrstvách půd ČR byl ve všech horských oblastech velmi nízký.

Podle Kučery a Adolta (2019) dosahovaly zásoby přístupného i celkového fosforu ve svrchních horizontech lesních půd mezi lety 2011 a 2015 dobré úrovně. Kučera a Adolt (2019) podotýkají, že při nedostatku přístupných forem fosforu v půdě nemusí docházet k deficitu ve výživě dřevin, protože některé dřeviny mohou přijímat fosfor také v nerozpustných formách. V případě fosforu lze tedy i nízký obsah považovat za dostatečný. Vyšší zásoby přístupného fosforu byly v rámci Národní inventarizace lesů (2011-2015) naměřeny v podpovrchových horizontech.

6.2 Vliv stanovištních podmínek na koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách

Různé stanovištní podmínky mají na zásobu a koncentraci živin v lesních půdách významný vliv. Lze pozorovat rozdíly v koncentracích živin v různých nadmořských výškách, v různých druzích porostů, ale i v porovnání různých klimatických podmínek, svažitosti, půdní struktury, matečné hornině (Lal 2005). Podle Ostrowska et al. (2010) závisí koncentrace a zásoba živin v půdě také na hloubce pod povrchem. Dle Olsson et al. (2009) lze pozorovat rozdíly v zásobách prvků také v závislosti na zeměpisné šířce nebo teplotě půdy. Dále lze pozorovat rozdíly mezi minerálními a organickými horizonty, jak dokládá například studie Strand et al. (2016) a také výsledky našeho průzkumu. Dle našich výsledků lze v minerální

vrstvě půdy pozorovat výrazně nižší obsah prvků v mg/kg než v organickém horizontu, ovšem zásoba prvků na jednotku plochy je výrazně vyšší v minerálním horizontu 0-30 cm.

Faktorů, které ovlivňují zásobu prvků v lesních půdách je tedy velké množství a vliv nadmořské výšky a vliv druhu porostu lze zařadit mezi jedny z nejdůležitějších.

6.2.1 Vliv nadmořské výšky a lesních vegetačních stupňů

S nadmořskou výškou se výrazně mění teplota vzduchu, ale i teplota půdy. A právě teplota je limitujícím faktorem růstu dřevin ve vyšších nadmořských výškách, kde bývá obecně chladněji (ÚHÚL 2020). Naopak v nižších nadmořských výškách limituje růst stromů především množství srážek, které je tam nižší. Změna v rychlosti růstu dřevin hraje roli také v ukládání zásob prvků v lesních půdách. Naopak ve vyšších nadmořských výškách, kde jsou obecně vyšší úhrny srážek, může docházet k většímu vyluhování živin, kterých je pak v půdě nedostatek.

Zásoba vápníku v minerálních horizontech není podle Borůvky et al. (2005b) příliš závislá na nadmořské výšce ani typu lesa. Vyšší zásobu hořčíku lze podle Borůvky et al. (2005b) očekávat v nižších nadmořských výškách, což odpovídá výsledkům našeho výzkumu, kde byl pozorován se stoupající nadmořskou výškou spíše snižující se trend zásoby hořčíku v půdě.

V našem výzkumu proběhlo vyhodnocení zásob prvků v různých lesních vegetačních stupních, které potvrdilo, že v organickém horizontu se zásoby prvků s vyšší nadmořskou výškou spíše zvyšují, a naopak že v minerálním horizontu 0-30 cm se zásoby prvků spíše snižují, přičemž v žádném z případů nebylo možné pozorovat vyšší zásobu žádného z prvků v organické vrstvě půdy než v minerální vrstvě 0-30 cm, jak bylo předpokládáno v jedné z hypotéz této práce.

Dle Dieleman et al. (2013) se s vyšší nadmořskou výškou zvyšuje také zásoba uhlíku v půdě, což bylo možné pozorovat také při našem výzkumu. Také Shaw et al. (2008) potvrdil, že s vyšší nadmořskou výškou roste také zásoba uhlíku v půdě. Ve vyšších nadmořských výškách jsou obecně nižší teploty a nižší pH půdy, které zpomalují rozklad organické hmoty v půdě a právě proto lze pozorovat v těchto půdách vyšší zásoby uhlíku.

Podle Prietzel et al. (2015) jsou horské oblasti, tím tedy i vyšší lesní vegetační stupně, výrazně náchylnější ke ztrátě živin, kterých proto může být v těchto oblastech nedostatek.

Dle map (Vašát et al. 2021a) lze pozorovat vyšší obsah organického uhlíku ve vyšších nadmořských výškách v obou minerálních půdních horizontech, v organickém horizontu nebyl vyšší obsah ve vyšší nadmořské výšce pravidlem.

Nejvyšší obsah hořčíku byl nalezen v nižších nadmořských výškách, naopak ve vysokých nadmořských výškách lze očekávat nízkou celkovou zásobu hořčíku (Borůvka et al. 2005a; Borůvka et al. 2005b). Obsah hořčíku v půdě se tedy s vyšší nadmořskou výškou snižuje, což bylo možné pozorovat také v případě našeho výzkumu.

6.2.2 Vliv druhu porostu

Druh porostu má podle studie Augusto et al. (2002) nejzásadnější vliv především na svrchní vrstvy půdy.

Výsledky Cramer et al. (2016), že v půdách smrkových porostů se vyskytuje větší zásoba organického uhlíku oproti listnatým stromům, koreluje s hypotézou, že větší obsah organického uhlíku se nachází v lesích ve vyšších nadmořských výškách, kde se běžně vyskytují právě spíše jehličnaté stromy, především smrky. Také Borůvka et al. (2005a) pozorovali vyšší hromadění organického uhlíku v horských půdách se smrkovým porostem. V našem výzkumu bylo možné pozorovat vyšší zásoby uhlíku v půdách jehličnatých porostů v případě organického horizontu a minerálního horizontu 0-30 cm, ovšem v minerálním horizontu 30-80 byla zásoba uhlíku vyšší pod listnatými lesy. Vyšší zásobu uhlíku ve vyšší hloubce by bylo možné objasnit kořenovým systémem listnatých stromů, který zasahuje do větší hloubky než kořenový systém jehličnatých stromů a díky kterému je uhlík vnášen do hlubších vrstev půdy (Hanáková Bečvářová 2022).

Podle Borůvky et al. (2005b) lze v organické vrstvě listnatých lesů očekávat nižší obsah hořčíku a dalších živin než v lesích jehličnatých. Podobné výsledky z hlediska zásoby živin v různých druzích porostu dokládá také studie Schrijver et al. (2007). Celkově vyšší obsahy Ca, Mg, K i P byly zjištěny ve studii Borůvky et al. (2005b) pod listnatými - bukovými porosty než pod jehličnatými porosty. V případě fosforu naměřili Borůvka et al. (2005b) hodnoty poměrně nízké, zatímco u ostatních živin byly zásoby vysoké. Studie Borůvka et al. (2005b) probíhala na silně kyselých půdách Jizerských hor, které byly vápněny. Borůvka et al. (2008) zaznamenali vyšší obsah draslíku, hořčíku a vápníku v organickém horizontu bukových půd než půd smrkových.

V našem výzkumu byl na základě referenční hodnoty zjištěn nízký obsah přístupného fosforu v minerální vrstvě půdy, který koresponduje s výsledky výše zmíněné studie Borůvky et al. (2005b). V případě hořčíku byl v našem výzkumu zjištěn dostatečný obsah hořčíku, což také koresponduje se studií Borůvky et al. (2005b), že ostatních živin je v půdě dostatek. Dostatečná zásobenost půd hořčíkem, draslíkem a vápníkem může být způsobena atmosférickou depozicí těchto prvků, která byla ve studii Borůvky et al. (2005b) v Jizerských horách poměrně významná.

Podle Šrámka a Fadrhonové (2018) lze vyšší obsah přístupného draslíku, hořčíku i vápníku v humusové vrstvě lesních půd naměřit pod porosty buku než pod porosty smrku. Výsledky Šrámka a Fadrhonové (2018) podporují výsledky našeho výzkumu, kde byly v organické vrstvě lesních půd naměřeny vyšší obsahy prvků v půdách listnatých lesů než v půdách jehličnatých lesů. Celková zásoba uhlíku byla v organické vrstvě podle Šrámka a Fadrhonové (2018) vyšší v půdách smrkových porostů, což bylo opět možné pozorovat při našem výzkumu, kde byla zásoba uhlíku v půdách jehličnatých lesů naměřena 1,92 kg/m², zatímco v půdách listnatých lesů pouze 0,91 kg/m². Podobně také nižší zásoba vápníku a fosforu v organickém horizontu listnatých lesů se shodovala v případě studie Šrámka a Fadrhonové (2018) s našimi výsledky.

V jedné z map (Komprdová et al. 2021), kde je zobrazen obsah výměnného hořčíku v minerální vrstvě půdy 0-30 cm (Obrázek 18), byl zaznamenán zajímavý výsledek v Jihomoravském kraji. V lesních porostech v okolí obce Dubňany, kde se nachází listnatý les s množstvím podrostu, byl naměřen vysoký obsah výměnného hořčíku, zatímco v sousedním lese poblíž Vracova, kde jsou písčité půdy s borovým porostem, byl obsah výměnného hořčíku vyhodnocen jako velmi nízký. Podobné výsledky byly potvrzeny také v případě výměnného obsahu vápníku. Na základě tohoto poznatku a dalších získaných informací lze tvrdit, že

v jehličnatých lesích se nachází velmi malé množství přístupného hořčíku a vápníku v minerální vrstvě půdy.

6.3 Koncentrace a zásoby prvků v lesních půdách Jizerských hor

V Jizerských horách byly v roce 2003 podle Slodičáka et al. (2004) naměřeny nízké hodnoty přístupných forem živin, v případě draslíku a hořčíku dokonce pod hranicí deficitu. Také podle Pavlů et al. (2007) byl v minerální vrstvě půdy naměřen nedostatek základních prvků, zatímco v organickém horizontu byly naměřeny dostatečné zásoby. Zásoby fosforu a hořčíku byly podle Pavlů et al. (2007) pod hranicí deficitu.

Ve vrcholových partiích Jizerských hor se nachází velmi nízký obsah základních prvků (Borůvka et al. 2005b). Dle Borůvky et al. (2005b) byl v organickém horizontu lesních půd naměřen výrazně vyšší obsah vápníku v organickém horizontu, který byl ovšem značně proměnlivý na různých lokalitách. V minerálním horizontu pak byly naměřeny nižší hodnoty, které vykazovaly nižší kolísavost mezi lokalitami. V porovnání s výsledky naší práce lze zmíněný vyšší obsah vápníku v organickém horizontu potvrdit.

Podle Novotného et al. (2018) se v půdách Jizerských hor nachází nedostatek fosforu. Stejně výsledky publikovali také Lomský et al. (2011), kteří zaznamenali v organických horizontech Jizerských hor pokles obsahu přístupného fosforu mezi rokem 2003 a 2009 z průměrné hodnoty 27,9 mg/kg na průměrnou hodnotu 16,5 mg/kg. Nízké obsahy fosforu se vyskytují také v minerální vrstvě půd Jizerských hor (Lomský et al. 2011). Naše výsledky potvrdily, že v Jizerských horách se nachází výrazně nedostatečný obsah přístupného fosforu. V průměru sledovaných let byl v minerálním horizontu 0-30 cm naměřen obsah přístupného fosforu 7,55 mg/kg, v minerálním horizontu 30-80 pak 15,60 mg/kg. Takto kritický nedostatek fosforu může mít vážný dopad na kvalitu a zdravotní stav smrkových porostů na lokalitě. Také Slodičák et al. (2004) dokladují nedostatečné zásoby fosforu v půdách Jizerských hor.

Celkový obsah hořčíku v organické vrstvě půdy Jizerských hor byl zaznamenán výrazně vyšší v minerálním horizontu na rozdíl od organického horizontu lesních půd (Borůvka et al. 2005b), obdobný výsledek byl vyhodnocen také při našem výzkumu, kde v minerálním horizontu 30-80 cm byly naměřeny vyšší hodnoty než v organickém horizontu.

6.4 Srovnání obsahů a zásob prvků v Jizerských horách s hodnotami celé České republiky

Dle jedné z hypotéz by se v Jizerských horách měly nacházet vyšší zásoby živin než v průměru České republiky. Tento předpoklad ovšem nelze v případě zásob prvků na jednotku plochy potvrdit, protože výsledky našeho výzkumu naznačily, že pouze zásoby hořčíku, draslíku a fosforu v organickém horizontu byly v Jizerských horách vyšší, ovšem ve všech ostatních případech byly zásoby živin na jednotku plochy nižší než v průměru České republiky. V případě průměrné zásoby uhlíku bylo možné pozorovat vyšší hodnoty v Jizerských horách v porovnání s průměrnými hodnotami České republiky ve všech půdních horizontech. Vyšší zásoby živin v organickém horizontu by mohly být způsobeny vyšší mírou atmosférické depozice, která je v Jizerských horách vyšší z důvodu vysoké koncentrace průmyslových objektů v okolí. Důvodem nižších průměrných zásob živin (Ca, Mg, K, P) v Jizerských horách

by mohlo být poměrně vysoké zastoupení měřených lokalit v rámci České republiky spíše v lesích horských oblastí, které vykazují vyšší hodnoty zásob prvků než nížiny. V případě absence hodnot z lesních půd například Šumavy, Jeseníků nebo Krušných hor by pak bylo možné očekávat průměrné hodnoty v Jizerských horách vyšší než průměrné hodnoty České republiky.

V případě porovnání hodnot celkových obsahů prvků v jednotkách mg/kg (Tabulka 5 a 11) lze jednoznačně potvrdit že v Jizerských horách se nachází nižší obsah celkového vápníku, hořčíku a draslíku než v průměru České republiky. V případě celkového obsahu fosforu ovšem Jizerské hory vykazují nižší hodnoty pouze v minerálním horizontu 0-30 cm, v organickém horizontu a minerálním horizontu 30-80 cm byl obsah fosforu vyšší na území Jizerských hor.

Průměrný obsah výměnných forem prvků byl v Jizerských horách, podobně jako v případě celkových obsahů prvků, ve všech případech nižší než průměr České republiky. Obsah prvků v Jizerských horách byl většinou nedostatečný.

Dle map (Vašát et al. 2021a) byl obsah organického uhlíku v Jizerských horách vyšší než na většině oblastech České republiky, ovšem pouze v minerálních půdních horizontech (Obrázky 11 a 12). V organickém půdním horizontu byla především severní část Jizerských hor charakterizována nízkým obsahem organického uhlíku (Obrázek 10).

6.5 Možné důsledky nepříznivého stavu lesních půd

Možnými důsledky nepříznivého stavu lesních půd může být například defoliace stromů nebo acidifikace lesních půd.

Defoliace (ztráta listové plochy) je ovlivněna především znečištěním ovzduší, ale také stanovištními podmínkami (Novotný et al. 2017). Dle výsledků Buriánka et al. (2019) byla v 80. letech 20. století sledována rozsáhlá defoliace jehličnatých stromů starších 59 let, která v menší míře pokračovala také v 90. letech. V roce 1996 dosáhla průměrná defoliace smrku 33,9 % a borovice 38,3 %. V případě stejně starých listnatých stromů dosáhla nejvyšší hodnoty defoliace v roce 1993. V případě dubu dosáhla defoliace až 43 %, u buku pak 22,5 %. Mladší porosty jehličnatých i listnatých stromů dosahují obecně nižších hodnot defoliace, u smrku dosahují mladší porosty výrazně nižších hodnot, u borovice pak rozdíl ve stáří porostu není výrazný. V porovnání mladých listnatých a jehličnatých stromů dosahují vyšší defoliace listnaté druhy, v případě starších stromů je to ovšem naopak.

Defoliace byla hodnocena v několika třídách: 1 (0-10 %), 2 (10-25 %), 3 (25-60 %), 4 (60-99 %) a 5 (100 %) (Buriánek et al. 2019). U jehličnatých stromů starších 59 let se v nejvyšší míře objevovala defoliace třídy 3, tedy mezi 25-60 % v průběhu celého sledovaného období 1986-2018. V případě listnatých porostů starších 59 let byla nejvíce ve sledovaném období dosahována defoliace z třídy 2 (10-25 %), ovšem třída 3 byla také hojně zastoupena. Ve skupině mladších jehličnanů byla hojně dosahována třída 1, případně 2. U mladých listnatých stromů byla nejhojněji zastoupena třída 2.

Při konkrétním hodnocení druhů stromů dosahovaly starší smrky konstantních hodnot defoliace 3. třídy okolo 65 %, borovice zaznamenala v průběhu let postupné zvyšování v třídě 3 z 55 % až na přibližně 70 % se současným zvýšením třídy 4 na přibližně 17 % v roce 2018, lze tedy zaznamenat výrazné zhoršování v průběhu času. U dubu dosahovala v průběhu

sledovaného období největší zastoupení třída 3, v roce 2018 dokonce v zastoupení přes 70 %, buk dosahoval spíše defoliace z třídy 2, tedy vždy o poznání menší než dub.

Dle Komprdové et al. (2021) lze hodnocení rizika acidifikace rozřídít v minerální vrstvě 0-30 cm půdy do pěti kategorií, z čehož největší počet hodnocených ploch byl zařazen do kategorie s vysokým rizikem acidifikace, a to celkem na 2 114 z 3 596 ploch (58,8 %). Další v pořadí počtu ploch hodnocených v určité kategorie byly půdy v kategorii extrémního rizika ohrožení acidifikací – 978 ploch (27,2 %). Podobné rozložení rizika acidifikace bylo analyzováno také v minerální vrstvě půdy 30-80 cm, kdy celkem 1 221 lokalit z 2 085 (58,6 %) bylo zařazeno do kategorie s vysokým rizikem acidifikace a poté 13,5 % v kategorii extrémního ohrožení.

V příhraničních oblastech České republiky bylo mnoho oblastí postiženo vysokým až extrémním rizikem acidifikace v minerální vrstvě lesních půd. Jizerské hory, jako hodnocená oblast v této práci, byly zařazeny do kategorie extrémního rizika acidifikace lesních půd v minerální vrstvě 0-30 cm (Komprdová et al. 2021). Riziko acidifikace v hloubce 30-80 cm bylo již výrazně nižší, v Jizerských horách přesto dosahovalo středního až vysokého rizika. V rámci České republiky byla pak minerální vrstva 30-80 cm nejvíce ohrožena acidifikací v oblasti Beskyd.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zhodnotit celkovou úroveň obsahu a zásoby organického uhlíku, přístupných a celkových živin v lesních půdách České republiky a v Jizerských horách, posoudit vliv nadmořské výšky a druhu porostu na obsahy a zásoby organického uhlíku a živin v lesních půdách a zhodnotit rozložení obsahu uhlíku a živin v půdním profilu na různých typech lesních stanovišť.

Na základě výsledků lze vyvodit tyto závěry:

- Lze potvrdit hypotézu, že většina minerálních vrstev lesních půd v České republice vykazuje nízký obsah přístupného fosforu. V případě hořčíku stanovenou hypotézu, že většina lesních půd vykazuje nízký obsah přístupného hořčíku, lze také potvrdit, protože více než polovina vzorků z minerálních půd vykazovala nižší hodnotu než 50 mg/kg, která byla stanovena jako referenční hodnota pro nízký obsah výměnného hořčíku.
- Hypotézu, že zásoby živin v půdách pod listnatými lesy jsou vyšší než v půdách pod jehličnatými lesy, je možné přijmout pro minerální půdní horizont, ovšem nikoli pro nadložní organický horizont. V nadložním organickém horizontu se nacházely vyšší zásoby živin spíše v půdách jehličnatých porostů. V případě koncentrací přístupných forem prvků je vyšší obsah v půdách listnatých lesů než v půdách lesů jehličnatých.
- Hypotézu „V lesních půdách vyšších poloh je vyšší zásoba organického uhlíku a živin uložena v nadložních organických horizontech, zatímco v půdách nižších poloh je vyšší zásoba v minerálních půdních horizontech“ nebylo možné zcela potvrdit. Vyšší zásoba uhlíku a živin se nachází v půdách v minerálním horizontu ve všech nadmořských výškách, zásoba živin v organickém horizontu nepřesahuje zásoby v minerálních horizontech. Ani v případě organického uhlíku nebylo možné hypotézu potvrdit. Lze ovšem potvrdit, že množství uhlíku a většiny živin v nadložních organických horizontech obecně s nadmořskou výškou stoupá.
- Hypotézu „V Jizerských horách se vyskytuje větší zásoba organického uhlíku a živin na jednotku plochy ve srovnání se středními hodnotami celé České republiky“ nelze v případě živin Ca, Mg, K ani P potvrdit. V Jizerských horách bylo možné pozorovat vyšší zásoby celkového uhlíku než v průměru České republiky. Přestože ale průměrné hodnoty České republiky byly vyšší než Jizerských hor, je možné potvrdit i na základě dalších studií, že v horských oblastech se nacházejí vyšší zásoby prvků než v nižších nadmořských výškách.

Koncem minulého století docházelo vlivem velkého množství emisí sloučenin dusíku a síry k významným ztrátám lesních porostů, které musely být z důvodu poškození pokáceny. Dalším rizikovým faktorem byl nedostatečný obsah hořčíku v minerálních vrstvách půd, který měl za následek žloutnutí jehlic smrkových porostů. V dnešní době je výrazným problémovým faktorem obsah fosforu, jehož nedostatek může mít za následek poškození fyziologických funkcí stromů. V současné době stále probíhá obnova lesních porostů postižených takto rozsáhlým poškozením, a přicházejí další hrozby, jako v případě rozsáhlého poškození porostů kůrovcem. Pro zdravý růst stromů je důležitý správný obsah a vyvážená zásoba živin v půdách a současně také vhodná půdní reakce.

Nedostatečný obsah prvků v lesních půdách by mohl ohrozit zdravotní stav lesních ekosystémů v České republice, proto je potřeba obsah a zásoby prvků nadále sledovat.

8 Literatura

- Augusto L, Dupouey JL, Ranger J. 2003. Effects of tree species on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests. *Annals of Forest Science* **60** (8): 823-831.
- Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. 2002. Impact of several tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science* **59** (3): 233–253.
- Augusto L, Ranger J, Ponette Q, Rapp M. 2000. Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. *Annals of Forest Science* **57** (4): 313-324.
- Baumann M, Dittrich S, Körner M, von Oheimb G. 2019. Liming in spruce stands: What effect does the number of lime applications have on the herb layer? *European Journal of Forest Research* **138**: 723-735.
- Borůvka L, Mládková L, Drábek O, Vašát R. 2005a. Factors of spatial distribution of forest floor properties in the Jizerské Mountains. *Plant, Soil and Environment* **51** (10): 447-455.
- Borůvka L, Mládková L, Drábek O. 2005b. Factors controlling spatial distribution of soil acidification and Al forms in forest soils. *Journal of Anorganic Biochemistry* **99** (9): 1796-1806.
- Borůvka L, Mládková L, Penížek V, Brábek O, Vašát R. 2007. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. *Geoderma* **140** (4): 374-382.
- Borůvka L, Pavlů L, Drábek O, Nikodem A. 2008. Acidifikace a znečištění lesních půd v oblasti Slezských Beskyd. Pages 239-246 in Sobocká J, Kulhavý J, editors. *Půda v moderní informační společnosti, Sborník příspěvků. Výzkumný ústav půdoznalectva a ochrany půdy*, Bratislava.
- Borůvka L, Vašát R, Němeček K, Novotný R, Šrámek V, Vacek O, Pavlů L, Fadrhonsová V, Drábek O. 2020. Application of regression-kriging and sequential Gaussian simulation for the delineation of forest areas potentially suitable for liming in the Jizera Mountains region, Czech Republic. *Geoderma Regional* **21**: e00286
- Buriánek V, Čihák T, Fabiánek P, Fadrhonsová V, Neudertová-Hellebrandová K, Novotný R, Šrámek V, Vejpusťková M. 2019. Monitoring zdravotního stavu lesa v České republice v rámci programu ICP Forests a navazujících projektů. Data do roku 2018 [Monitoring of forest condition in the Czech Republic in frame of ICP Forests programme and follow-up projects. Data to 2018]. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady*.

- Ceulemans R., Janssens IA, Jach ME. 1999. Effects of CO₂ Enrichment on Trees and Forests: Lessons to be Learned in View of Future Ecosystem Studies. *Annals of Botany*. **84**(5): 577-590.
- Court M, van der Heijden G, Didier S, Nys C, Richter C, Pousse N, Saint-André L, Legout A. 2018. Long-term effects of forest liming on mineral soil, organic layer and foliage chemistry: Insights from multiple beech experimental sites in Northern France. *Forest Ecology and Management* **409**: 872-889
- Cramer M, Kern NV, Prietzel J. 2016. Soil organic carbon and nitrogen stocks under pure and mixed stands of European beech, Douglas fir and Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **367**: 30–40.
- Čechmánková J, Šrámek V, Sáňka M, Drábek O, Fadrhonsová V, Skála J. 2021. Porovnání metod pro stanovení přístupných a pseudototálních forem živin a prvků v lesních půdách. *Zprávy lesnického výzkumu* **66** (2): 115-125.
- Český hydrometeorologický ústav. 2022. Klimatologická ročenka České republiky 2021. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- Čihák T, Šrámek V, Fadrhonsová V, Novotný R. 2021. Metodika kontroly vápnění lesních porostů: certifikovaná metodika. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Strnady.
- Dieleman W, Venter M, Ramachandra A, Krockenberger A, Bird M. 2013. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. *Geoderma* **204-205**: 59-67.
- Džermanská L. 2016. Zhodnocení obsahu potenciálně rizikových prvků v lesních půdách vybraných oblastí s odlišnou úrovní znečištění [MSc. Thesis]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Fiala P, Reininger D, Samek T, Němec P, Sušil P. 2013. Průzkum výživy lesa na území České republiky 1996–2011. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský.
- Fiala P, Reininger D, Samek T. 2006. Výsledky průzkumu stavu výživy lesa v přírodní lesní oblasti č. 21 Jizerské hory, Závěrečná zpráva. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.
- Finér L, Helmisaari HS., Lõhmus K. et al. 2007. Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems* **141** (3): 394-405.
- Groffman PM, Pouyat RV, McDonnell MJ, Pickett STA, Zipperer WC. 1995. Carbon pool and trace gas fluxes in urban forest soils. Pages 147-158 in Lal R, Kimble J, Levine E,

- Stewart BA, editors. *Advances in Soil Science: Soil Management and Greenhouse Effect*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Hanáková Bečvářová P. 2022. Vliv managementových opatření na půdní prostředí lesních ekosystémů [DSc. Thesis]. Katedra ekologie a životního prostředí PřF UP v Olomouci, Olomouc.
- Hruška J, Cienciala E. 2001. Dlouhodobá acidifikace a nutriční degradace lesních půd – limitující faktor současného zemědělství. Ministerstvo životního prostředí, Praha.
- Huber Ch, Baumgarten M, Göttlein A, Rotter V. 2004. Nitrogen Turnover and Nitrate Leaching after Bark Beetle Attack in Mountainous Spruce Stands of the Bavarian Forest National Park. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* **4**: 391-414
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ. 1999. Biomass, carbon and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* **80** (6): 1892-1907.
- Ilg K, Wellbrock N, Lux W. 2009. Phosphorus supply and cycling at long-term forest monitoring sites in Germany. *European Journal of Forest Research* **128**: 483-492.
- Johnson KD, Harden J, McGuire D et al. 2011. Soil carbon distribution in Alaska in relation to soil-forming factors. *Geoderma* **167-168**: 71-84.
- Knoke T, Stimm B, Ammer C, Moog M. 2005. Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept. *Forest Ecology and Management* **213**: 102–116.
- Komprdová K, Vašát R, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sáňka M, Sáňka O, Fadrhonsová V, Čechmánková J. 2021. Chemické vlastnosti svrchních minerálních vrstev lesních půd a ohrožení lesních půd acidifikací a nutriční degradací. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady.
- Kozák et al. 2009. Atlas půd České republiky. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Kučera M, Adolt R. 2019. Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky druhého cyklu 2011–2015. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem.
- Kuneš I. 2003. Prosperity of spruce plantation after application of dolomitic limestone powder. *Journal of Forest Science* **49** (5): 220-228.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* **220**: 242–258.
- Lawrence GB, Burns DA, Riva-Murray K. 2016. A new look at liming as an approach to accelerate recovery from acidic deposition effects. *Science of the Total Environment* **562**: 35-46.

- Lomský B, Novotný R, Šrámek V. 2011. Změny ve výživě fosforem v mladých smrkových porostech. Zprávy lesnického průzkumu **56** (2): 83-93.
- McDonnell MJ, Pickett STA, Groffman P, Bohlen P, Pouyat RV, Zipperer WC, Parmelee RW, Carreiro MN, Medley K. 1997. Ecosystem processes along an urban to rural gradient. *Urban Ecosystem* **1** (1): 21-36.
- Novotný R, Lomský B, Šrámek V. 2017. Changes in the nutrition and health status of young Norway spruce stands in the Krkonoše Mts. in a 17-year period. *Journal of Forest Science* **63** (8): 344-354
- Novotný R, Lomský B, Šrámek V. 2018. Changes in the phosphorus and nitrogen status and supply in the young spruce stands in the Lužické, the Jizerské and the Orlické Mts. in the Czech Republic during the 2004–2014 period. *European Journal of Forest Research* **137**: 879–894.
- Olsson MT, Erlandsson M, Lundin L, Nilsson T, Nilsson Å, Stendahl J. 2009. Organic carbon stocks in Swedish Podzol soils in relation to soil hydrology and other site characteristics. *Silva Fennica* **43** (2): 209–222.
- Ostrowska A, Porebska G, Kanafa M. 2010. Carbon accumulation and distribution in profiles of forest soils. *Polish Journal of Environmental Studies* **19** (6): 1307–1315.
- Pavlů L, Borůvka L, Nikodem A, Rohořková M, Penížek V. 2007. Altitude and Forest Type Effects on Soils in the Jizera Mountains Region. *Soil & Water Research* **2** (2): 35-44.
- Pavlů L. 2018. Základy pedologie a ochrany půdy. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Prescott CE. 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology* **22**: 1193-1200.
- Prietzl J, Christophel D, Traub C, Kolb E, Schubert A. 2015. Regional and site-related patterns of soil nitrogen, phosphorus, and potassium stocks and Norway spruce nutrition in mountain forests of the Bavarian Alps. *Plant and Soil* **386** (1-2): 151-169.
- Pykalová P. 2021. Příčiny úbytku přístupného fosforu v horských lesních půdách [BSc Thesis]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Reich PB, Oleksyn J, Modrzyński J, Mrozinski P, Hobbie SE, Eissenstat DM, Chorover J, Chadwick OA, Hale CM, Tjoelker MG. 2005. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters* **8** (8): 811–818.
- Sáňka M, Materna J. 2014. Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. *Edice PLANETA*. 2004, **XII** (11/2004).

- Sáňka M, Vácha R, Poláková Š, Fiala P. 2018. Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Ministerstvo životního prostředí, Praha.
- Shaw CH, Banfield E, Kurz WA. 2008. Stratifying soils into pedogenically similar categories for modeling forest soil carbon. *Canadian Journal of Soil Science*. **88** (4): 501-516.
- Schrijver AD, Geudens G, Augusto L, Staelens J, Mertens J, Wuyts K, Gielis L, Verheyen K. 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia* **153**: 663–674
- Siepel H, Bobbink R, van de Reijt BP, van den Burg AB, Jongejans E. 2019. Long-term effects of liming on soil physico-chemical properties and micro-arthropod communities in Scotch pine forest. *Biology and Fertility of Soils* **55**: 675–683
- Slodičák M et al. 2004. Lesnické hospodaření v Jizerských horách. Projekt Grantové služby LČR. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Jíloviště-Strnady.
- Spielvogel S, Prietzel J, Leide J, Reidel M, Zemke J, Kögel-Knabner I. 2014. Distribution of cutin and suberin biomarkers under forest trees with different root systems. *Plant and Soil* **381**: 95–110
- Strand LT, Callesen I, Dalsgaard L, de Wit HA. 2016. Carbon and nitrogen stocks in Norwegian forest soils - the importance of soil formation, climate, and vegetation type for organic matter accumulation. *Canadian Journal of Forest Research* **46** (12): 1459-1473.
- Šantrůčková H, Cienciala E, Kaňa J, Kopáček J. 2019. The chemical composition of forest soils and their degree of acidity in Central Europe. *Science of the Total Environment* **687**: 96–103.
- Šimek M et al. 2019. Živá půda. Academia, Praha.
- Šrámek V, Fadrhonsová V, Jurkovská J. 2014a. Ca/Al ratio in Norway spruce fine roots on monitoring plots in the Czech Republic. *Journal of Forest Science* **60** (3): 121-131.
- Šrámek V, Fadrhonsová V, Neudertová-Hellebrandová K, Čechmánková J, Borůvka L, Sáňka M, Novotný R. 2020. Kontrola kvality dat v rozsáhlých databázích chemických vlastností lesních půd: certifikovaná metodika. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i.
- Šrámek V, Fadrhonsová V. 2018. Srovnání obsahů a zásob prvků v humusové vrstvě porostů buku lesního, smrku ztepilého a ve smíšených porostech těchto dřevin v České republice. *Zprávy lesnického výzkumu* **63**: 61-72.

- Šrámek V, Hellebrandova K, Fadrhonsová V. 2019. Interception and soil water relation in Norway spruce stands of different age during the contrasting vegetation seasons of 2017 and 2018. *Journal of Forest Science* **65** (2): 51-60
- Šrámek V, Jurkovská L, Fadrhonsová V, Neudertová-Hellebrandová K. 2013. Chemismus lesních půd ČR podle typologických kategorií – výsledky monitoringu lesních půd v rámci projektu „Biosoil“. *Zprávy lesnického výzkumu* **58** (4): 314-323
- Šrámek V, Lomský B, Novotný R. 2009. Hodnocení obsahu a zásoby živin v lesních porostech – literární přehled. *Zprávy lesnického výzkumu* **54**: 307–315.
- Šrámek V, Novotný R, Bednářová E, Uhlířová H. 2007. Monitoring of Ozone Risk for Forests in the Czech Republic: Preliminary Results. *The Scientific World Journal* **7**: 78-83.
- Šrámek V, Fadrhonsová V, Jurkovská L. 2014b. Metodika výběru ploch pro vápnění lesních půd – certifikovaná metodika. *Lesnický průvodce 7*. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, Strnady.
- Šrámek V, Novotný R, Fiala P, Neudertová-Hellebrandová K, Reininger D, Samek T, Čihák T, Fadrhonsová V. 2014c. Vápnění lesů v České republice. Ministerstvo zemědělství a Výzkumný ústav lesního hospodářství, v. v. i., Praha
- Šrámek V, Vejpustnová M, Novotný R, Hellebrandová K. 2008. Yellowing of Norway spruce stands in the Silesian Beskids – damage extent and dynamics. *Journal of Forest Science* **54** (2): 55-63.
- Tan ZX, Lal R, Smeck NE, Calhoun FG. 2004. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma* **121** (3-4): 187-195.
- Thomas FM, Krug K, Zoldan J, Schröck HW. 2019. Long-term effects of liming on the species composition of the herb layer in temperate Central-European forests. *Forest Ecology and Management* **437**: 49-58.
- Tomášek M. 2003. Půdy České republiky. Česká geologická služba, Praha.
- Tomlinson GH. 2003. Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth. *Biogeochemistry* **65**: 51-81.
- Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem. 2020. Oblastní plán rozvoje lesů Přírodní lesní oblast 21 – Jizerské hory a Ještěd – Analýza stavu a vývoje. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem – pobočka Jablonec nad Nisou.
- Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Průzkum výživy lesa (1996–2011). Available from: <https://eagri.cz/public/web/ukzuz/portal/hnojiva-a-puda/publikace/pruzkum->

[lesnich-pud-publikace/pruzkum-vyziivy-lesnich-porostu-publikace/pruzkum-vyziivy-lesa-96-2011/](#) (accessed February 2023)

- Vacek S, Hůnová I, Vacek Z, Hejcmanová P, Podrázský V, Král J, Putalová T, Moser WK. 2015. Effects of air pollution and climatic factors on Norway spruce forests in the Orlické hory Mts. (Czech Republic), 1979–2014. *European Journal of Forest Research* **134**: 1127–1142.
- Vacek S, Lepš J. 1996. Spatial dynamics of forest decline: the role of neighbouring trees. *Journal of Vegetation Science* **7**: 789-798.
- Vacek S, Zingari PC, Jeník J, Vančura K, Simon J, Smejkal J. 2003. Mountain forests of the Czech Republic. Ministry of Agriculture of the Czech Republic, p 320.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press, Praha.
- Vašát R, Komprdová K, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sáňka M, Sáňka O, Fadrhonsová V, Čechmánková J. 2021b. Zásoby prvků v nadložním organickém horizontu lesních půd a zásoby uhlíku v celém půdním profilu. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i, Strnady.
- Vašát R, Neudertová-Hellebrandová K, Šrámek V, Borůvka L, Sáňka M, Sáňka O, Vacek O, Penížek V, Čechmánková J. 2021a. Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady.
- Vitousek PM, Poder S, Houlton BZ, Chadwick OA. 2010. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications* **20** (1): 5-15.
- Von Lüpke B, et al. 2004. Silvicultural strategies for conversion. Pages 121-164 in Spiecker H, Hansen J, Klimo E, Skofsgaard JP, Sterba H, Von Teuffel K editors. Norway spruce conversion: options and consequences. European Forest Institute Research Report **18**. Koninklijke Brill NV, Leiden.
- Zádorová T, Penížek V. 2020. Základy půdní klasifikace I. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Lesnatost v roce 2015 (ÚHÚL 2020).....	22
Obrázek 2 Zastoupení porostů v Jizerských horách dle systému CORINE (Borůvka et al. 2020)	23
Obrázek 3 Zastoupení lesních vegetačních stupňů v PLO Jizerské hory a ČR v roce 2018 (%) (ÚHÚL 2020).....	23
Obrázek 4 Základní monitorovací plochy ICP Forests v ČR (Buriánek et al. 2019).....	25
Obrázek 5 Odhad zásob celkového C v organickém horizontu lesních půd ČR (kg/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	30
Obrázek 6 Odhad zásob celkového C v minerální vrstvě hloubky 0-30 cm lesních půd ČR (kg/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	30
Obrázek 7 Odhad zásob celkového C v minerální vrstvě hloubky 30-80 cm lesních půd ČR (kg/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	31
Obrázek 8 Odhad zásob celkového C v minerálních vrstvách hloubky 0-80 cm lesních půd ČR (kg/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	31
Obrázek 9 Odhad zásob celkového C v organickém horizontu a minerálních vrstvách hloubky 0-80 cm lesních půd ČR (kg/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	32
Obrázek 10 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (organický horizont) (Vašát et al. 2021a).....	32
Obrázek 11 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (minerální horizont 0-30 cm) (Vašát et al. 2021a).....	33
Obrázek 12 Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách (minerální horizont 30-80 cm) (Vašát et al. 2021a).....	34
Obrázek 13 Odhad zásob celkového Ca v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	35
Obrázek 14 Obsah výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021).....	36
Obrázek 15 Odhad zásob celkového K v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	36
Obrázek 16 Obsah výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021).....	37
Obrázek 17 Odhad zásob celkového Mg v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	37
Obrázek 18 Obsah výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021).....	38
Obrázek 19 Odhad zásob celkového P v organickém horizontu lesních půd ČR (g/m ²) (Vašát et al. 2021b).....	38
Obrázek 20 Obsah přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0-30 cm) (Komprdová et al. 2021).....	39
Obrázek 21 Průměrná zásoba uhlíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (kg/m ²).....	40
Obrázek 22 Průměrná zásoba vápníku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m ²).....	40
Obrázek 23 Průměrná zásoba hořčíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m ²).....	41
Obrázek 24 Průměrná zásoba draslíku v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m ²).....	42
Obrázek 25 Průměrná zásoba fosforu v organickém a minerálním horizontu 0-30 cm v lesních vegetačních stupních (g/m ²).....	42

Obrázek 26 Průměrná zásoba uhlíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (kg/m^2).....	43
Obrázek 27 Průměrná zásoba celkového vápníku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2).....	44
Obrázek 28 Průměrná zásoba celkového hořčíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2).....	44
Obrázek 29 Průměrná zásoba celkového draslíku v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2).....	45
Obrázek 30 Průměrná zásoba celkového fosforu v listnatých a jehličnatých lesích v různých půdních vrstvách (g/m^2).....	45
Obrázek 31 Průměrná zásoba uhlíku v Jizerských horách a v průměru ČR 2000-2020 (kg/m^2)	48
Obrázek 32 Průměrná zásoba vápníku v Jizerských horách a v průměru ČR 2000-2020 (g/m^2)	48
Obrázek 33 Průměrná zásoba hořčíku v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m^2)	49
Obrázek 34 Průměrná zásoba draslíku v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m^2)	50
Obrázek 35 Průměrná zásoba fosforu v Jizerských horách a v průměru ČR v roce 2000-2020 (g/m^2)	50

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Limitní obsahy prvků v asimilačních orgánech stromů podle ICP Forests (Šrámek et al. 2009 - upraveno).....	7
Tabulka 2 Obsahy přístupných forem prvků v minerálním horizontu pod jehličnatými porosty (mg/kg) (Fiala et al. 2013 - upraveno).....	28
Tabulka 3 Obsahy přístupných forem prvků v minerálním horizontu pod listnatými porosty (mg/kg) (Fiala et al. 2013 – upraveno)	28
Tabulka 4 Průměrné hodnoty celkových zásob prvků 2000-2020	29
Tabulka 5 Průměrné hodnoty celkového obsahu prvků 2000-2020 (mg/kg)	29
Tabulka 6 Průměrné hodnoty výměnných zásob prvků 2000-2020	34
Tabulka 7 Průměrné hodnoty výměnného obsahu prvků 2000-2020 (mg/kg).....	34
Tabulka 8 Průměrná zásoba prvků v půdě dle druhu porostu v letech 2000-2020.....	43
Tabulka 9 Průměrný obsah výměnných (resp. přístupných) forem prvků v půdě dle druhu porostu 2000-2020 (mg/kg)	46
Tabulka 10 Průměrné zásoby prvků v Jizerských horách 2000-2018	46
Tabulka 11 Průměrný celkový obsah prvků v Jizerských horách 2000-2018 (mg/kg)	47
Tabulka 12 Průměrné zásoby prvků v Jizerských horách (JH) a v průměru ČR 2000-2020 ...	47
Tabulka 13 Průměrné hodnoty obsahu výměnných (resp. přístupných) forem prvků v Jizerských horách a v průměru ČR (mg/kg)	51

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

°C – stupně Celsia

Al – hliník

C – uhlík

C:N – poměr uhlíku ku dusíku

Ca – vápník

cm – centimetr

CO₂ – oxid uhličitý

ČR – Česká republika

Fe – železo

g/m² – gram na metr čtvereční

Ha – hektar

JH – Jizerské hory

K – draslík

KCL – chlorid draselný

kg/m – kilogram na metr

kg/m² – kilogram na metr čtvereční

km – kilometr

LVS – lesní vegetační stupeň

m – metr

m n.m. – metr nad mořem

Mg – hořčík

mg/ha – miligram na hektar

mg/kg – miligram na kilogram

N – dusík

org – nadložní organický horizont

P – fosfor

PLO – přírodní lesní oblast

SO_x – oxid síry

t/ha – tuna na hektar

ÚHÚL – Ústav pro hospodářskou úpravu lesů

ÚKZÚZ – Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

VÚLHM – Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivost