

VÝZKUMNÝ ÚSTAV LESNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A MYSLIVOSTI, V.V.I.

**Zásoby prvků v nadložním organickém horizontu
lesních půd a zásoby uhlíku v celém půdním profilu**

soubor map

Radim Vašát*

Klára Komprdová, Kateřina Neudertová Hellebrandová**, Vít
Šrámek**, Luboš Borůvka*, Milan Sáňka***, Ondřej Sáňka***, Věra
Fadrhonsová**, Jarmila Čechmánková******

***Česká zemědělská univerzita v Praze**

****Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i**

***** Masarykova univerzita**

******Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.**

Specializovaná mapa s odborný obsahem

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i

Strnady 136

252 02 Jíloviště

2021



Obsah

1	ZDŮVODNĚNÍ POTŘEBY A CÍLE SPECIALIZOVANÉ MAPY.....	2
1.1	NÁZEV MAPY	2
1.2	POPIS NOVOSTI MAPY	2
1.3	INFORMACE O ROZSAHU VYUŽITÍ MAPY	2
1.4	INFORMACE O PŘÍNOSECH MAPY PRO UŽIVATELE	2
1.5	SEZNAM ODBORNÝCH PODKLADŮ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY VYPRACOVÁNÍ MAPY	2
1.6	DEDIKACE	3
1.7	OPONENTSKÉ POSUDKY	3
2	OBSAH MAPOVÉHO SOUBORU	4
3	METODIKA TVORBY MAP	4
3.1	ZDROJE DOPLŇKOVÝCH ÚDAJŮ	4
3.2	POUŽITÉ METODY.....	5
3.3	MAPY ZÁSOB K, CA, MG A P V NADLOŽNÍM HORIZONTU	5
3.4	INTERPRETACE MAP ZÁSOB CA, MG, K A P V NADLOŽNÍM HORIZONTU LESNÍCH PŮD	9
3.5	TVORBA MAP ZÁSOBY ORGANICKÉHO UHLÍKU V JEDNOTLIVÝCH PŮDNÍCH HORIZONTECH A V CELÉM PŮDNÍM PROFILU 10	
3.6	NEJVÝZNAMNĚJŠÍ VSTUPNÍ ÚDAJE DO PREDIKČNÍCH MODELŮ PRO ODHAD ZÁSOB UHLÍKU	14
4	CITOVANÁ LITERATURA.....	15
	PŘÍLOHY.....	16

1 Zdůvodnění potřeby a cíle specializované mapy

1.1 Název mapy

Zásoby prvků v nadložním organickém horizontu lesních půd a zásoby uhlíku v celém půdním profilu.

1.2 Popis novosti mapy

Do současné doby nebyly obdobné mapy k dispozici. Z dat druhého cyklu národní inventarizace lesů byla zpracována mapa zásoby oxidovatelného uhlíku ve vrstvě nadložního humusu, kde jsou pouze souhrnné údaje za jednotlivé kraje. Data z mezinárodního projektu BioSoil byla v mapách prezentována pouze jako bodové údaje pro jednotlivé plochy. Předkládaný mapový výstup využívá unikátní agregovanou databázi chemických analýz lesních půd, která v sobě zahrnuje data získaná v rámci NIL2, typologického průzkumu (obojí ÚHÚL), půdních průzkumů BioSoil a ICP Forests (obojí VÚLHM) a průzkumu půd a výživy lesů v oblastech postižených imisemi (ÚKZÚZ). Tato data nebyla doposud společně vyhodnocována. Data byla zpracována novými postupy matematicko- statistického modelování a digitálního mapování půd.

1.3 Informace o rozsahu využití mapy

Informace poskytnutá v mapách je široce využitelná pro státní správu (reporting bilance uhlíku v protokolu LULUCF v rámci Kjótského protokolu; využití v rámci Národního plánu adaptace ke změnám klimatu – opatření o 2_5.2; aplikace koncepce státní lesnické politiky – bod A.3). Dále je významná pro definování současného stavu lesních půd a pro možnosti kvantifikace změn, ke kterým bude docházet v důsledku požadovaných změn druhové, věkové i prostorové skladby lesních porostů i vlivem probíhajících změn klimatu. Jako potenciálně významný považujeme tento výstup i pro vlastníky a správce lesních porostů, kterým v kombinaci s dalšími dokumenty umožní konkrétněji vnímat problematiku zásoby živin i uhlíku v horizontech nadložního humusu, které mohou být nejsnáze ovlivněny volbou postupů hospodaření v lesích. Výstup je rovněž využitelný pro další vědeckou a vzdělávací činnost v rámci oborů lesnické pedologie a ekologie lesa. Může být využit také pro spolupráci v rámci mezinárodních programů a projektů (např. Global Soil Partnership, GlobalSoilMap aj.).

1.4 Informace o přínosech mapy pro uživatele

U mapových výstupů nepředpokládáme přímé ekonomické využití ve smyslu tržního zhodnocení. Nicméně jak vyplývá z rozsahu jejich využití, nepřímé ekonomické efekty pro sektor lesního hospodářství i celou společnost mohou být značné.

Předpokládané přínosy mapy spočívají ve zpřístupnění informací pro vlastníky a správce lesních majetků i státní správu.

1.5 Seznam odborných podkladů, které předcházely vypracování mapy

Mapa vznikla na základě zpracování výsledků chemických analýz lesních půd z databází Výzkumného ústavu lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů a Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského z let 2000 – 2019.

Zpracování mapy předcházely tyto odborné publikace:

- 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. Typ výsledku Nmet – certifikovaná metodika*

- 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 Q2, doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00286. Typ výsledku Jimp*
- Vašát R., Neudertová Hellebrandová K., Šrámek V., Borůvka L., Sáňka M., Sáňka O., Vacek O., Penížek V., Čechmánková J., 2021: *Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách. Typ výsledku Nmap – specializovaná mapa s odborným obsahem*

1.6 Dedikace

Mapové dílo bylo zpracováno v rámci řešení projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum č. QK1920163, „Vývoj a verifikace prostorových modelů vlastností lesních půd v České republice“.

1.7 Oponentské posudky

Oponentský posudek oponenta z oboru zpracoval prof. Ing. Jiří Kulhavý, CSc.

Pracoviště: Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno

Oponentský posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy zpracoval Ing. Václav Zouhar

Pracoviště: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, Pobočka Brno, Vrázova 1, 616 00 Brno – Žabovřesky

2 Obsah mapového souboru

Soubor map obsahuje následné mapové listy:

1. Odhad zásob celkového Ca v organickém horizontu lesních půd ČR
2. Odhad zásob celkového K v organickém horizontu lesních půd ČR
3. Odhad zásob celkového Mg v organickém horizontu lesních půd ČR
4. Odhad zásob celkového P v organickém horizontu lesních půd ČR
5. Odhad zásob celkového C v organickém horizontu lesních půd ČR
6. Odhad zásob celkového C v minerálních vrstvách hloubky 0 – 30 cm lesních půd ČR
7. Odhad zásob celkového C v minerálních vrstvách hloubky 30 – 80 cm lesních půd ČR
8. Odhad zásob celkového C v minerálních vrstvách hloubky 0 – 80 cm lesních půd ČR
9. Odhad zásob celkového C v organickém a minerálních vrstvách hloubky 0 – 80 cm lesních půd ČR

3 Metodika tvorby map

Základem pro tvorbu map jsou výsledky chemických analýz lesních půd z databází Výzkumného ústavu lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů a Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského z let 2000 – 2019. Tato data byla v rámci projektu „Vývoj a verifikace prostorových modelů vlastností lesních půd v České republice“ shromážděna do jednotné databáze, následně verifikována a přepočítána pro tři vrstvy půdy: organický horizont, minerální vrstva 0 – 30 cm a minerální vrstva 30 – 80 cm.

Výsledky různých analytických metod stanovení jednotlivých půdních charakteristik byly přepočteny s využitím přepočtových koeficientů získaných ze srovnávacích analýz. Vytvořená databáze byla očištěna od zjištěných chyb a nesrovnalostí podle metodiky Šrámek et al. (2020).

Sjednocená databáze, ve které jsou údaje z více než 6400 lokalit, byla použita k vytvoření prostorových modelů rozložení uhlíku a celkového (pseudototálního) obsahu živin (P, K, Ca, Mg) v lesních půdách České republiky.

3.1 Zdroje doplňkových údajů

Pro tvorbu modelů pro prostorový odhad půdních vlastností byly získány pro všechny lokality v databázi následující doplňkové údaje z uvedených zdrojů:

- Údaje o reliéfu - digitální výškový model ArcČR® 500 s rozlišením 200 metrů (ARCDATA PRAHA, ZÚ, ČSÚ, 2016).
- Odvozené charakteristiky reliéfu - výpočet pomocí nástroje Terrain Analysis Toolbox v programu SAGA GIS 2.1.4 (Conrad et al., 2015).
- Údaje o půdách (půdní typy a subtypy podle Taxonomického klasifikačního systému) - databáze půdního informačního systému PUGIS v měřítku 1:250 000 (Kozák et al., 1996).
- Průměrné roční srážky a teploty byly - databáze WorldClim.org v rozlišení 1 km (Fick, Huijmans, 2017).
- Údaje o využití půdy (land cover/land use), zejména druh lesa (v kategoriích listnatý, smíšený, jehličnatý) - databáze CORINE Land Cover 2018 (EEA, 2018) s rozlišením 250 m.
- Lesotypologické údaje (Viewegh et al., 2003, Viewegh, 2005) (lesní vegetační stupně (LVS), soubory lesních typů (SLT) a edafické kategorie (EK)) - mapy lesnické typologie v měřítku 1:10 000 (ÚHÚL, 2019).
- Přírodních lesní oblast (PLO) – mapa PLO (ÚHÚL).

- Strukturovaný porostní typ (SPT) – mapy druhové skladby (ÚHÚL, 2020).

Tyto doplňkové údaje: charakteristiky terénu (nadmožská výška, sklon, orientace svahu, horizontální zakřivení, vertikální zakřivení, index konvergence, celková sběrná plocha, topografický vlhkostní index, LS faktor, úroveň údolnice, vzdálenost k údolnici, hloubka údolí, Intenzita dopadajícího slunečního záření – analytical hillshade a relativní poloha na svahu), údaje o klimatu (průměrné roční teploty a srážky), informace o půdním typu (sdružený půdní typ) a další stanovištní charakteristiky (druh porostu, edafické kategorie, smíšenost lesa, soubory lesních typů a lesní vegetační stupně), byly zároveň použity jako vysvětlující proměnné vstupující do prostorových modelů.

3.2 Použité metody

Při tvorbě map celkových zásob prvků a uhlíku byly společně uplatněny dva koncepčně rozdílné přístupy, a to jednak techniky prediktivního prostorového modelování půd založené na vztahu mezi cílovou (mapovanou) proměnnou a faktory prostředí, a dále také geostatistické metody založené na prostorové závislosti (autokorelaci) sledované půdní proměnné.

Pro kalibraci modelů digitálního mapování byly použity algoritmy strojového učení (machine learning), jmenovitě náhodné lesy (*random forests* – RF), metoda podpůrných vektorů (*support vector machines* -SVM) a *multivariate adaptive regression splines* (MARS).

Prostorová závislost sledované půdní proměnné byla modelována za použití semivariogramu, který byl následně použit pro prostorovou interpolaci pomocí metody běžného krigingu (ordinary kriging). Protože tato metoda spoléhá čistě na prostorovou autokorelaci sledované proměnné a nevyžaduje použití dalších vysvětlujících proměnných, je vhodným kontrastem k metodám digitálního mapování půd při tvorbě modelu společného učení.

Přesnost předpovědi jednotlivých predikčních přístupů byla testována metodou křížové validace při rozdělení vstupních dat do 5 podsouborů (*5-fold cross-validation*) a byla vyjádřena pomocí ukazatelů úspěšnosti predikce, a to indexu determinace (R²) vyjadřujícího podíl (popř. procento) vysvětlené variability závislé proměnné a odmocniny průměru čtverce chyby (root mean square error - RMSE) vyjadřující průměrnou chybu odhadu (čím menší, tím přesnější odhad).

Konečná mapa je výsledkem expertního posouzení jednotlivých modelů. Je vybrán nejlepší model s nejvyšší přesností; pokud se modely vhodně doplňují, je výsledkem vážený průměr odhadů testovaných metod (tzv. *ensemble* modely).

Výsledné mapy byly vypočteny pomocí vybraného modelu pro lesní půdy celé ČR v pravidelné síti bodů 500 x 500 m.

3.3 Mapy zásob K, Ca, Mg a P v nadložním horizontu

Zásoby prvků v nadložním horizontu byly určeny z obsahů (koncentrací) těchto prvků (mg/kg) a hmotnosti nadložních horizontů (kg/m²). Výsledné hodnoty zásob celkových živin jsou uvedeny v g/m².

Hmotnost nadložních organických horizontů byla určena nebo odhadnuta následujícím způsobem:

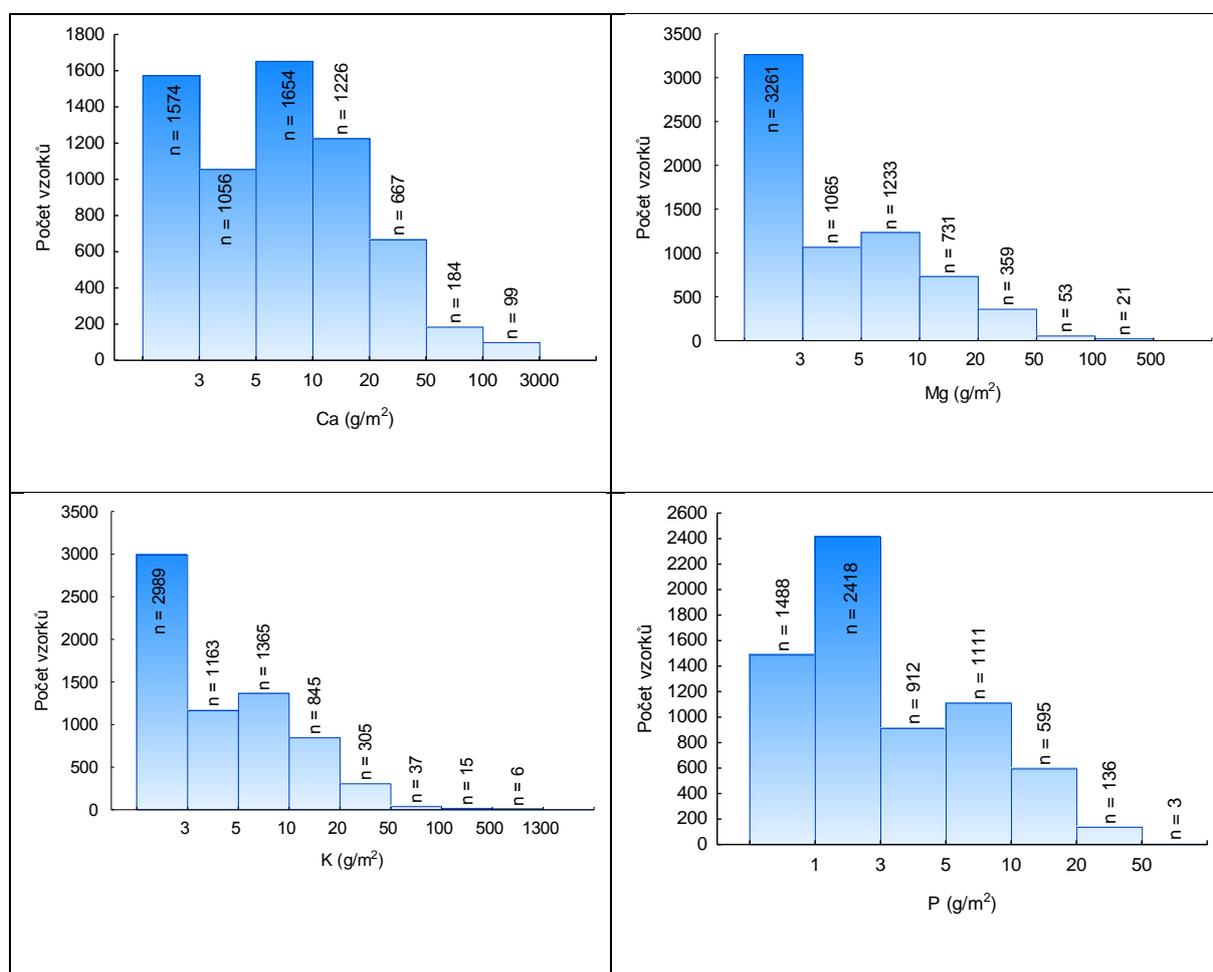
- Pokud byly k dispozici výsledky kvantitativního odběru nadložních horizontů (část dat z VÚLHM – 416 lokalit), byly tyto výsledky přímo použity;
- Pokud nebyly k dispozici výsledky kvantitativního odběru ani mocnosti nadložních horizontů, byly hmotnosti odhadnuty formou regresního stromu tak, že byly jednotlivým lokalitám přiřazeny aritmetické průměry hmotností nadložních horizontů (po odstranění extrémních hodnot) ve skupinách lokalit vytvořených podle LVS, druhu lesa (jehličnatý - J, listnatý - L, smíšený – M), sdruženého půdního typu, případně edafických kategorií (EK); tyto skupiny byly

členěny různě podrobně tak, aby bylo ve skupině vždy alespoň několik lokalit se známými hmotnostmi z kvantitativního odběru (viz Tabulka 1);

- Pokud nebyly k dispozici výsledky kvantitativního odběru, ale byly uvedeny mocnosti nadložních horizontů, byl aritmetický průměr skupiny podle předchozího bodu upraven na známou mocnost na dané lokalitě vydělením aritmetického průměru hmotnosti průměrnou mocností ve skupině a vynásobením známou mocností na dané lokalitě.

Po otestování různých metod pro predikci (MARS, SVM, RF) byla jako nejspěšnější vyhodnocena metoda Random Forests, neboť dokáže velmi dobře pracovat i s kategoriálními proměnnými, které obsahují větší množství kategorií (např. PLO, půdní typy).

Distribuce zásob má výrazně log-normální rozdělení (obr. 1). Před statistickou analýzou byly odstraněny extrémní hodnoty. Modely pomocí RF byly vytvořeny pro netransformované i logaritmicky transformované hodnoty zásoby prvků a byla porovnána přesnost jejich předpovědi.

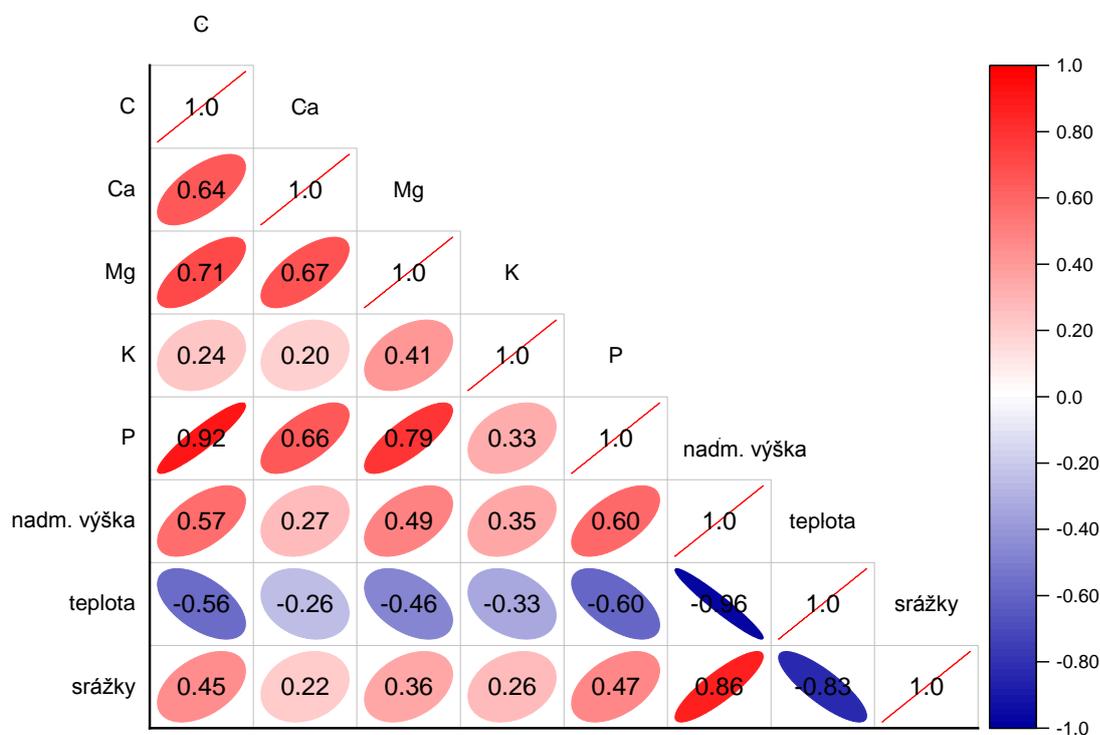


Obr. 1: Statistické rozložení četností zásob jednotlivých prvků v nadložním horizontu.

Tabulka 1: Sumární statistika zásob celkových obsahů prvků v nadložním horizontu

Prvek	N	Průměr	Medián	Min.	Max.	25%	75%	5%	95%	1%	99%
Ca (g/m ²)	6460	13.78	6.42	0.002	2237.8	3.06	13.04	0.86	45.82	0.32	121.92
Mg (g/m ²)	6720	6.94	3.15	0.003	448.3	1.56	7.23	0.59	23.37	0.28	55.73
K (g/m ²)	6722	7.33	3.54	0.003	1243.6	1.66	7.71	0.51	20.73	0.19	46.28
P (g/m ²)	6663	4.29	2.30	0.023	54.0	1.10	5.63	0.30	14.10	0.13	26.73

Byla spočítána neparametrická Spearmanova korelace mezi zásobami jednotlivých prvků a také s průměrnými ročními srážkami, teplotou a nadmořskou výškou. Kromě zásob K, které mají spíše mírnou korelaci se zásobami ostatních prvků, je mezi zásobami C, P a Mg střední až vysoká pozitivní korelace (obr. 2). Zásoby prvků také obecně pozitivně korelují s nadmořskou výškou a srážkami a negativně s teplotou (což je ovšem dáno rovněž vzájemnou korelací těchto parametrů).



Obr. 2: Spearmanova korelace zásob prvků v nadložním horizontu a průměrných ročních srážek, teplot a nadmořské výšky; všechny hodnoty korelací jsou statisticky významné pro $p < 0.05$; C je zásoba celkového uhlíku v nadložním horizontu.

Nejvýznamnější proměnné (z metody RF) pro zásoby prvků se vztahovaly zejména k půdním vlastnostem lokality (sdruženému půdnímu typu), druhovému složení porostů a nadmořské výšce (Tab. 2). Jejich vzájemnou kombinací vznikl finální model. Některé proměnné mohou být navzájem zástupné (např. lesní vegetační stupně a nadmořská výška, průměrné roční srážky a teploty). V případě metody *Random Forests* není zástupnost parametrů problémem, ale výhodou, neboť umí velmi dobře využít korelované proměnné. Vždy byl vybrán nejjednodušší model vysvětlující největší množství variability a jeho přesnost byla určena na trénovacím souboru (vzorky použité pro tvorbu modelu) a testovacím souboru (vzorky použité pouze pro verifikaci modelu).

Tabulka 2: Nejvýznamnější proměnné pro tvorbu modelu zásob prvků v nadložním horizontu v pořadí podle významnosti (hodnoceno pomocí metody RF)

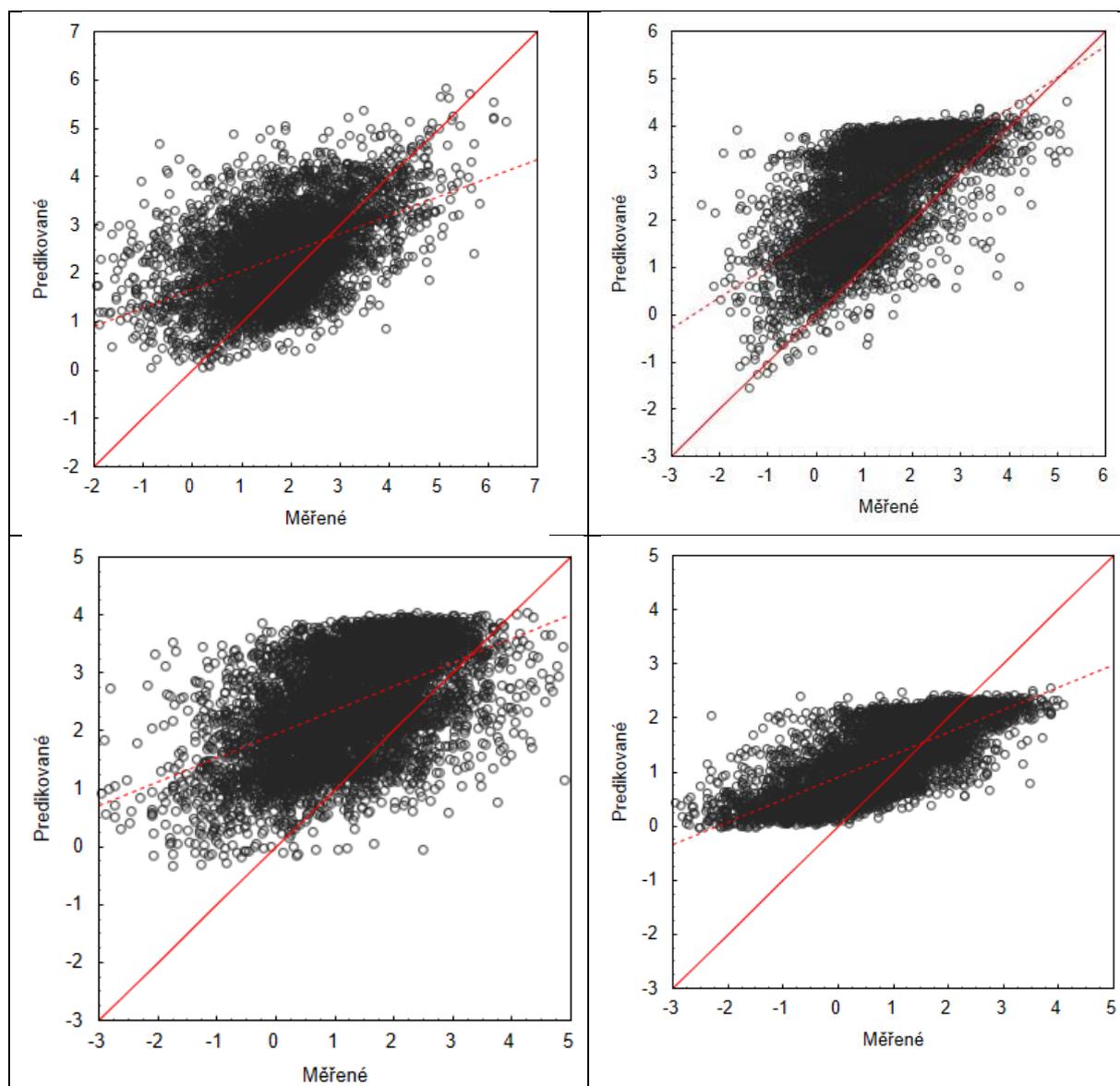
Ca	Mg	K	P
přírodní lesní oblast (soubor lesních typů)	přírodní lesní oblast (soubor lesních typů)	přírodní lesní oblast (soubor lesních typů)	lesní vegetační stupeň
lesní vegetační stupeň	lesní vegetační stupeň	výška základní úrovně údolnice	sdružený půdní typ
celková sběrná plocha	nadmořská výška	nadmořská výška	edafické kategorie
nadmořská výška	výška základní úrovně údolnice	průměrná roční teplota	smíšenost
edafické kategorie	sdružený půdní typ	lesní vegetační stupeň	intenzita dopadajícího slunečního záření
průměrná roční teplota	průměrné roční srážky	průměrné roční srážky	celková sběrná plocha
průměrné roční srážky	průměrná roční teplota	sdružený půdní typ	výška základní úrovně údolnice
intenzita dopadajícího slunečního záření	edafické kategorie	edafické kategorie	celková sběrná plocha

Celková přesnost na validačním souboru pro nejlepší modely zásob v nadložním horizontu byla 28 % pro Ca, 25 % pro Mg, 24 % pro K, 23 % pro P z metody RF (tab. 3). Tato nízká vyčerpaná variabilita je dána mimo jiné rozložením hodnot zásob. Hodnoty zásob mezi minimem a maximem se liší o několik řádů, přičemž v nízkých/vysokých hodnotách je často nízký počet vzorků pro natrénování modelu. Další nejistoty jsou způsobeny slučováním hodnot z databází s různými odběrovými a analytickými metodami, nejistotou v odhadu hmotnosti nadložních horizontů na jednotlivých lokalitách, a nejistotami v samotných GIS vrstvách použitých pro predikci. Zásoby prvků jsou také pro velkou část území poměrně homogenní.

Tabulka 3: Validace map zásob prvků v nadložním horizontu z modelu RF

Prvek	R^2_{cv}	RMSE _{cv} (g/m ²)
Ca	0.28	24.7
Mg	0.25	10.3
K	0.24	3.8
P	0.23	4.12

Ze vztahu mezi měřenými a pozorovanými hodnotami je patrné, že modely podhodnocují vyšší hodnoty zásob a naopak nadhodnocují nižší hodnoty zásob (obr. 3).



Obr. 3: Graf predikovaných hodnot (logaritmovaných) vynesenes oproti měřeným hodnotám (logaritmovaným) pro zásobu Ca, Mg, K a P v nadložním horizontu

3.4 Interpretace map zásob Ca, Mg, K a P v nadložním horizontu lesních půd

U všech sledovaných prvků se projevila statisticky významná kladná korelace s nadmořskou výškou a srážkami a naopak záporná korelace s teplotou (čím vyšší teplota, tím nižší zásoby prvků, včetně C). To jednoznačně souvisí s mocností nadložních organických horizontů, která je obecně tím vyšší, čím je vyšší nadmořská výška a srážky a obecně nižší, čím vyšší je teplota. Celková hmotnost nadložního horizontu ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) je tedy přirozeně v horských podmínkách vyšší než v teplejších polohách nížin, čímž je dána vyšší celková zásoba prvku (i když koncentrace prvku může být nižší).

Ze sledovaných proměnných pro tvorbu modelu se tedy jako nejvýznamnější u všech prvků projevily přírodní lesní oblast a lesní vegetační stupeň, u fosforu pak ještě sdružený půdní typ.

V posloupnosti jednotlivých vegetačních stupňů mají zásoby všech prvků stoupající tendenci až do 7 LVS, v 8. a 9. LVS dochází opět k poklesu. Rozhodujícím faktorem pro tento trend je zřejmě vzrůstající mocnost nadložního horizontu, který v 6. a 7. LVS dosahuje maxima (surový humus horských smrčín). Podobně jsou nejvyšší obsahy zjišťovány u edafických kategorií s předpokládanou vysokou mocností

nadložního organického horizontu. Jedná se zejména o kategorie J – obohacená humusem, R – rašelinná a T – podmáčená s glejem.

Z dalších proměnných zasáhl do torby modelu významně ještě sdružený půdní typ a to zřejmě kombinací chemismu půd a mocnosti nadložního horizontu. Takto jsou nejvyšší zásoby zjišťovány u podzolů, kryptopodzolů, organozemí a glejů. Paradoxně jsou u všech sledovaných makroelementů zjišťovány nejnižší zásoby u půd na černozemích, hnědozemích a u rendzin, což je však dáno minimální mocností nadložního horizontu, případně až jeho absencí.

Uvedené vztahy mezi zásobami a proměnnými (LVS, edafické kategorie a sdružený půdní typ) se promítají i do závislostí na přírodních lesních oblastech (PLO). Prakticky u všech prvků jsou nejvyšší zásoby zjišťovány u těchto PLO: 1 (Krušné hory), 3 (Karlovarská vrchovina), 4 (Doupovské hory), 13 (Šumava), 14 (Novohradské hory), 16 (Českomoravská vrchovina), 21 (Jizerské hory a Ještěd), 25 (Orlické hory), 27 (Hrubý Jeseník).

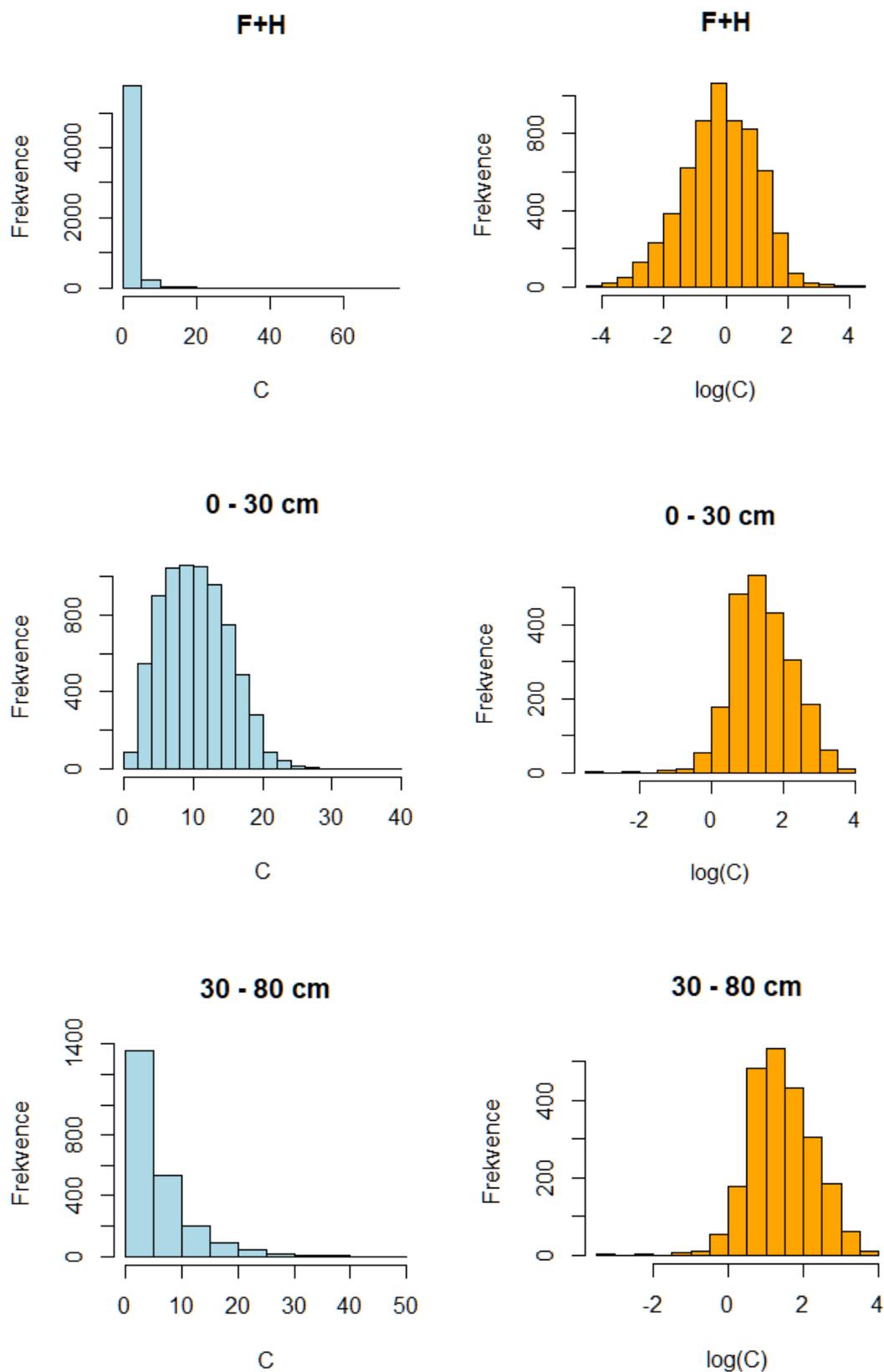
3.5 Tvorba map zásoby organického uhlíku v jednotlivých půdních horizontech a v celém půdním profilu

Zásoby organického uhlíku v nadložním horizontu (F+H) a minerálních horizontech lesních půd byly určeny z obsahu organického uhlíku (%) a hmotnosti jednotlivých horizontů (kg/m²). Výsledné hodnoty zásob organického uhlíku jsou uvedeny v kg/m². Hmotnosti nadložních organických půdních horizontů byly stanoveny postupem uvedeným v kapitole 3.3. Hmotnost minerálních vrstev byla vypočtena z jejich mocnosti a objemové hmotnosti. Pro odhad objemové hmotnosti (BD) minerálních vrstev byl použit výpočet podle Honeysett a Ratkowsky (1989): $BD = 1 / (0,564 + 0,0556 * OM)$ (g/cm³), kde OM je obsah organické hmoty vypočtený z obsahu uhlíku pomocí Welteho koeficientu ($OM = 1,724 * C$).

Pro zásoby celkového obsahu organického uhlíku byl vytvořen soubor celkem pěti-šesti mapových podkladů, a to jednak mapy pro jednotlivé půdní horizonty, tj. nadložní organický horizont, minerální vrstvy 0 – 30 cm a 30 – 80 cm, a dále mapy znázorňující celkové zásoby v celém půdním profilu (tj. součet v organickém horizontu a obou minerálních vrstvách) a v celém minerálním profilu lesních půd (tj. součet dvou minerálních vrstev).

Pro kalibraci predikčních modelů byla stejně jako v případě odhadů zásob prvků (K, Ca, Mg, K a P) použita metoda strojového učení *Rrandom forest* (RF) (česky náhodné lesy). Vlastní kalibraci predikčních modelů předcházela statistická analýza vstupních dat. Byl hodnocen charakter rozdělení hodnot (pomocí histogramu), identifikovány odlehle hodnoty, a sledován vztah ke sledovaným vysvětlujícím proměnným (prediktorům) vstupujícím do predikčních modelů. Byla spočítána neparametrická Spearmanova korelace (z důvodu rozdílné velikosti vstupních datových souborů) s průměrnými ročními srážkami, teplotou a nadmořskou výškou.

Ověření přesnosti predikčních modelů bylo provedeno metodou křížové validace (angl. *cross validation*) při rozdělení datového souboru do 10 podsouborů (n fold = 10). Poté byly z dvojic měřených a predikovaných hodnot vypočteny ukazatele úspěšnosti predikce, a to *Root mean squared error* (RMSE) vyjadřující průměrnou chybu odhadu (čím menší, tím přesnější odhad), a index determinace (R²) vyjadřující těsnost vztahu mezi měřenými a predikovanými hodnotami. Index determinace lze také interpretovat jako podíl vysvětlené variability z celkové variability závislé proměnné. Pro grafické znázornění úspěšnosti predikce byly měřené vs. predikované hodnoty vyneseny do grafu.



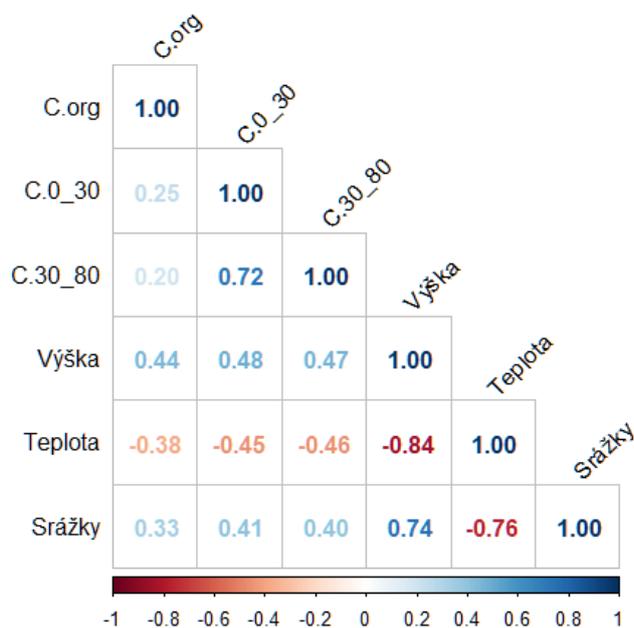
Obr. 4: Statistické rozložení četností zásob uhlíku v nadložním horizontu (F+H) a minerálních horizontech 0 – 30 a 30 – 80 cm v původních hodnotách (kg/m³, vlevo) a po logaritmické transformaci (vpravo).

Statistické rozdělení hodnot zásob organického uhlíku má výrazně lognormální charakter (obr. 4), a proto byly před vlastní kalibrací predikčních modelů odstraněny extrémní hodnoty, a data byla modifikována pomocí logaritmické transformace. Predikční modely byly následně vytvořeny pro data originální data bez transformace a logaritmicky transformovaná data zásoby uhlíku a byla porovnána přesnost jejich předpovědi.

Kromě výpočtu základních statistických ukazatelů (tab. 4) byla spočítána korelace mezi zásobou organického uhlíku, nadmořskou výškou, ročním úhrnem srážek a průměrnou teplotou (obr. 5). U zásob organického uhlíku (ve všech horizontech) byla zjištěna významná kladná korelace s nadmořskou výškou a ročnímu úhrnem srážek, a významná negativní korelace s průměrnou roční teplotou. Významná kladná korelace byla také zjištěna navzájem mezi zásobami uhlíku v minerálních horizontech. Naproti tomu vztah zásob uhlíku v nadložním organickém horizontu k zásobám v obou minerálních horizontech byl vyhodnocen jen jako slabý.

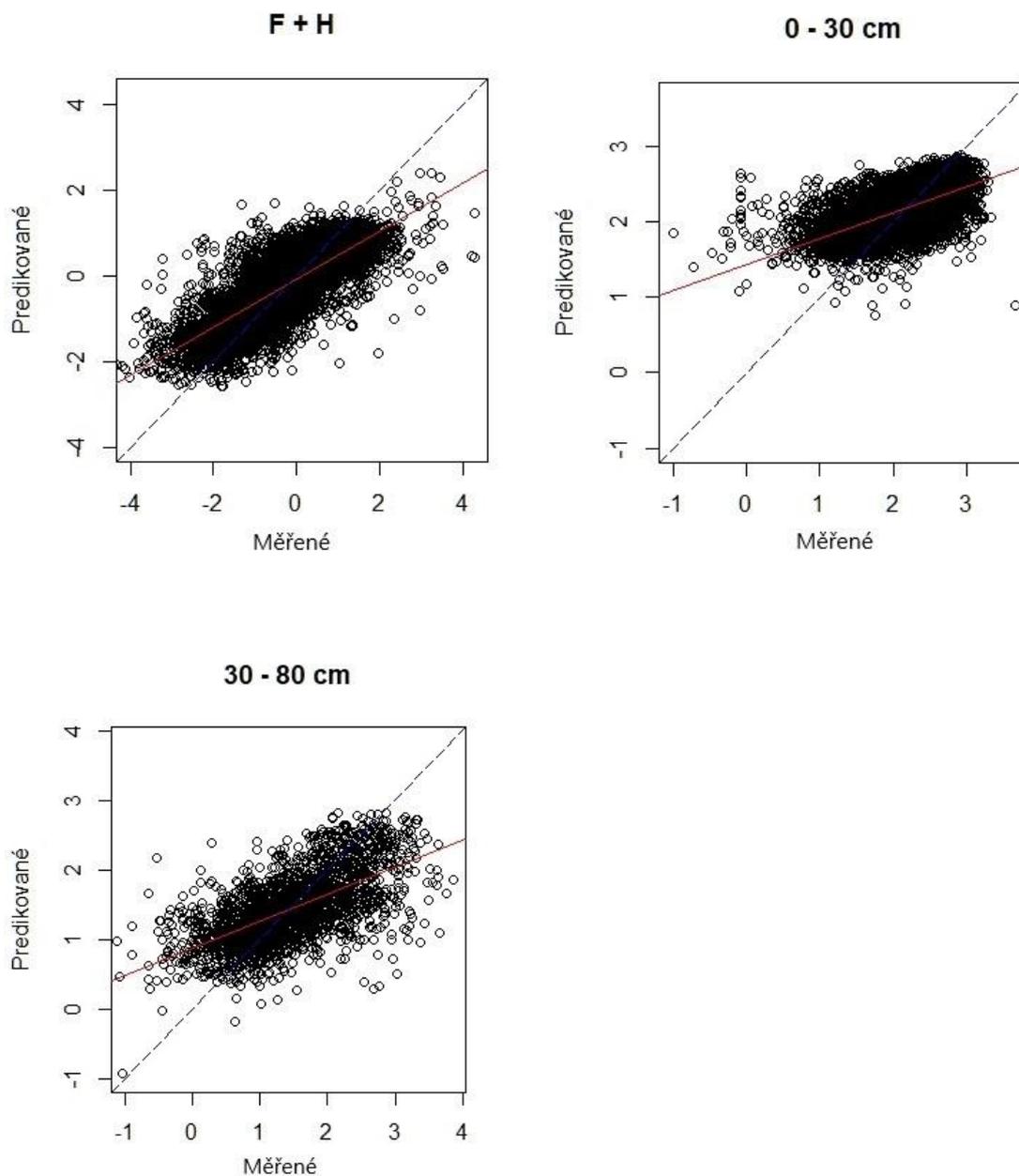
Tabulka 4: Základní statické ukazatele zásoby organického uhlíku (kg/m²)

Vrstva	N	Průměr	Medián	Min.	Max.	25%	75%	5%	95%	1%	99%
F+H	6060	1,6	0,86	0,01	72,2	0,39	1,98	0,12	4,96	0,04	9,8
0 – 30	7358	10,3	10,1	0,07	38,6	6,5	13,6	3,32	18,3	1,89	21,5
30 – 80	2252	5,86	3,86	0,04	47,1	2,37	7,34	1,18	16,9	0,67	26,1



Obr. 5: Spearmanova korelace zásob organického uhlíku (v organickém nadložním horizontu a v minerálních vrstvách 0 – 30 a 30 – 80 cm) a průměrných ročních srážek, teplot a nadmořské výšky; všechny hodnoty korelací jsou statisticky významné na $p < 0.05$.

Z charakteru vztahu mezi měřenými a predikovanými hodnotami (zejména z tvaru korelačního pole) je zřejmé, že použitím predikčních modelů došlo k významné redukci rozpětí hodnot, kdy modely podhodnocují vyšší hodnoty zásob a naopak nadhodnocují nižší hodnoty zásob (obr. 6). Je zde patrný efekt vyhlazení rozsahu hodnot, kdy jsou redukovány extrémní hodnoty, a to jak ve smyslu minimálních, tak i maximálních hodnot.



Obr. 6: Graf predikovaných hodnot (logaritmovaných) vynesných oproti měřeným hodnotám (logaritmovaných) pro zásobu uhlíku v jednotlivých půdních horizontech

Tabulka 5: Odhad úspěšnosti predikčních modelů pro zásoby organického uhlíku

Vrstva	R^2_{cv}	RMSE _{cv} (kg/m ²)
F + H	0,23	7,66
0 – 30 cm	0,4	3,66
30 – 80 cm	0,32	4,55

Celková úspěšnost predikčních modelů hodnocena pomocí křížové validace pro nejlepší modely zásob uhlíku byla 40 % u vrstvy minerálního horizontu 0 – 30 cm, 32 % pro vrstvu půdy 30 – 80 cm a 23 % pro

nadložní organický horizont (Tabulka 5). Tato nízká vyčerpaná variabilita je dána mimo jiné rozložením hodnot zásob. Hodnoty zásob mezi minimem a maximem se liší o několik řádů, přičemž v nízkých/vysokých hodnotách je často nízký počet vzorků, což snižuje efektivitu trénování modelu. Další nejistoty jsou způsobeny slučováním hodnot z databází s různými odběrovými a analytickými metodami, nejistotou v odhadu hmotnosti nadložních horizontů na jednotlivých lokalitách, přepočtem hodnot z minerálních horizontů na jednotné hloubky a nejistotami v samotných GIS vrstvách použitých pro predikci. Zásoby prvků jsou také pro velkou část území poměrně homogenní.

3.6 Nejvýznamnější vstupní údaje do predikčních modelů pro odhad zásob uhlíku

Ze sledovaných vysvětlujících proměnných pro tvorbu modelu se tedy jako nejvýznamnější projeví nadmořská výška, edafické kategorie, průměrná roční teplota, lesní vegetační stupeň, a u vrstvy nadložního organického horizontu také smíšenost lesa. U všech horizontů se také uplatnil sdružený půdní typ (Tabulka 6). Mezi vysvětlující proměnné popisující charakter terénu, které se významnou měrou uplatnily při tvorbě modelu, patří dále LS faktor (nadložní horizont a horizont 30 – 80 cm), celková sběrná plocha (minerální horizonty), horizontální zakřivení terénu a intenzita dopadajícího slunečního záření (nadložní organický horizont).

Tabulka 6: Nejvýznamnější proměnné pro tvorbu modelu zásob organického uhlíku pro jednotlivé půdní horizonty v pořadí podle významnosti (hodnoceno pomocí metody RF)

Půdní vrstva		
F +H	0 – 30 cm	30 – 80 cm
Smíšenost	Edafické kategorie	Nadmořská výška
Edafické kategorie	Průměrná roční teplota	Edafické kategorie
Lesní vegetační stupeň	Nadmořská výška	Sdružený půdní typ
Sdružený půdní typ	Výška základní úrovně údolnice	Výška základní úrovně údolnice
LS faktor	Sdružený půdní typ	Průměrná roční teplota
Horizontální zakřivení	Intenzita dopadajícího slunečního záření	Průměrné roční srážky
Přírodní lesní oblast (Soubor lesních typů)	Celková sběrná plocha	LS faktor
Intenzita dopadajícího slunečního záření	Průměrné roční srážky	Celková sběrná plocha

4 Citovaná literatura

ARCDATA PRAHA, ZÚ, ČSÚ (2016): ArcČR 500 - digitální geografická databáze, version 3.3. www.arcdata.cz (cit. 23. 10. 2020).

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J.: System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991–2007, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>, 2015.

EEA (2019): CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 20, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Accessed from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-accounting-layers> on 2020-10-23.

Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.

Honeysett, J.L., Ratkowsky, D.A., 1989. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *European Journal of Soil Science* 40 (2): 299-308.

Kozák, J., Němeček, J., Jetmar, M. (1996). The database of soil information system - PUGIS. *Rostlinná Výroba* 42: 529-534.

Němeček, J., et al. (2011): Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. ČZU, Praha, 94 s., ISBN 80-238-8061-6.

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 (Nmet). Ministerstvo zemědělství ČR.

ÚHÚL (2019): Typologická mapa 2019. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Available from: <http://geoportal.uhul.cz/>

Viewegh J. (2005): Czech Forest (Site) Ecosystem Classification. Česká zemědělská univerzita v Praze, 170 p..

Viewegh J., Kusbach A., Mikeska M. (2003): Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science* 49: 85-93.

PŘÍLOHY

