



SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu

WP B2 Biogeochemická odezva lesních ekosystémů

WA B2.1 Biogeochemické cykly ekologicky významných prvků a evoluce půd

Geochemická reaktivita hornin a rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace pro území ČR (soubor map)

SS02030018-V20

Oulehle F.¹, Svoboda J.¹, Chuman T.¹

¹Česká geologická služba

2024

**T A
Č R**

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou
Technologické agentury ČR a Ministerstva životního
prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život.**

www.ta.cz www.mzp.cz

Geochemická reaktivita hornin a rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace pro území ČR (soubor map)

SS02030018-V20

Specializovaná mapa s odborným obsahem

1. Úvod

Mapy rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace vycházejí z a) modelovaných acido-bazických vlastností lesních půd a z modelovaných b) stechiometrických poměrů živin v lesních půdách (poměry mezi uhlíkem, dusíkem a fosforem – C:N:P). Modelování půdních charakteristik je založeno na využití extenzivní databáze půdního chemismu (Kapitola 2) a informací o lesním prostředí (klíma, upravená geochemická reaktivita hornin, složení lesa, soubory lesních typů, depozice síry a dusíku) potřebných pro prostorovou extrapolaci metodu strojového učení Random Forest (Kapitola 3 a 4). Vybrané půdní proměnné jsou následně transformovány metodou PCA (Principal Component Analysis, Kapitola 5) tak, aby výsledné hodnoty hlavních komponent reprezentovaly chemismus lesních půd z hlediska gradientu acido-bazických vlastností (pH, bazická saturace, obsah bazických kationtů) a z hlediska gradientu přístupnosti dusíku (C:N poměr) a fosforu (N:P poměr).

PCA analýza a následná klastrová analýza byla aplikována na jednotlivé půdní horizonty zvlášť. Byly vymezeny tzv. Třídy půdního chemismu (Třída 1-4). Konečná mapa rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace (Kapitola 6) vychází z kombinace náchylnosti lesních půd k acidifikaci, schopnosti retence N a dostupnosti P a je rozdělena do šesti skupin, dle specifických charakteristik – A, B, C, E, O a M – tzv. Skupiny lesních půd (SLP).

2. Databáze půdních vlastností

Vybrané půdní vlastnosti byly modelovány z databáze publikované v Neudertová Hellebrandová et al. (2024) (<https://doi.org/10.1186/s13595-024-01225-y>). Data pochází ze čtyř subdatabází spravovaných třemi různými institucemi (ÚHUL, VÚLHM a ÚKZÚZ) z nichž každá používala odlišnou metodiku odběru vzorků a analytické postupy. Jednotlivá bodová měření jsou rozdělena do tří různých horizontů: Nadložní humusový horizont (FH), 0–30 cm a 30–80 cm. Každý z těchto horizontů byl modelován zvlášť. V tabulce níže jsou uvedeny všechny modelované proměnné s počtem vzorků zahrnutých do modelování (Tabulka 1). Uvedené počty vzorků nemusí nutně odpovídat celkovému počtu vzorků publikovaných v původní databázi. V některých případech byly pro modelování použity jen vzorky, jejichž půdní vlastnosti byly stanoveny jen vybranými metodami, pokud se ukázala nekonzistentnost v originálních datech.

Tabulka 1. Přehled modelovaných půdních proměnných, počet vzorků zahrnutých do predikčního modelu a metody stanovení půdních parametrů ve zdrojové databázi.

Půdní proměnná	horizont	počet vzorků	Metoda
pH _w	FH	6872	vodný výluh
	0–30	8049	vodný výluh
	30–80	2259	vodný výluh
pH _{ex}	FH	6874	KCl nebo CaCl ₂ výluh
	0–30	8051	KCl nebo CaCl ₂ výluh
	30–80	2260	KCl nebo CaCl ₂ výluh
Ca _{ex} (mg/kg)	FH	2193	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	0–30	3502	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	30–80	1950	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh

Mg _{ex} (mg/kg)	FH	2193	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	0–30	3502	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	30–80	1947	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
K _{ex} (mg/kg)	FH	2193	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	0–30	3500	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
	30–80	1951	0.1M BaCl ₂ nebo 1M NH ₄ Cl výluh
TEA (meq/kg)	FH	729	1M KCl
	0–30	1509	1M KCl
	30–80	1187	1M KCl
C _{org} (%)	FH	1595	spalovací metoda
	0–30	6433	spalovací metoda nebo NIRS (near infra-red spectroscopy)
	30–80	1824	spalovací metoda
N _{org} (%)	FH	1595	spalovací metoda
	0–30	6442	spalovací metoda nebo NIRS (near infra-red spectroscopy)
	30–80	1824	spalovací metoda
P _{tot} (mg/kg)	FH	1543	20% HCl extrakt
	0–30	2656	20% HCl extrakt
	30–80	1736	20% HCl extrakt
P _{ex} (mg/kg)	FH	1992	Mehlich III
	0–30	7257	Mehlich III
	30–80	1637	Mehlich III

3. Modelování půdních vlastností

3.1. Proměnné použité pro prostorové modelování půdních vlastností

Pro modelování bylo využito 16 proměnných, které byly k dispozici pro celé modelované území (lesní porosty ČR) (Tabulka 2). Průnikem lokalit bodových záznamů půdních vlastností a prostorových proměnných byl vytvořen soubor dat použitý k modelování. Z původně jedné kategoriální proměnné: třída ekologické řady v rámci Souboru Lesních Typů (SLT) bylo odvozeno šest binárních proměnných pro šest ze sedmi kategoriálních

hodnot této proměnné. Pro nejčastěji zastoupenou třídu ekologické řady SLT: "Kyselá", nebyla odvozena proměnná, protože její přítomnost v místě vzorku byla odvoditelná nepřítomností jakékoliv jiné třídy SLT (hodnota 0) v místě odběru vzorku. Další kategoriální proměnnou byla míra zastoupení jehličnatých porostů. Tato proměnná dosahovala tří odlišných hodnot, kterým byla přiřazena číselná hodnota: 0 pro listnatý les, 0,5 pro smíšený les a hodnota 1 pro jehličnatý les.

Celkem pět proměnných bylo odvozeno z výškového modelu terénu Shuttle Radar

Topography Mission (SRTM) v rozlišení přibližně 30 m (3 úhlové vteřiny obvodu Země). Kromě vlastní výšky terénu dle SRTM se jedná o tyto proměnné: Směrodatná odchylka výšky v okolí 100 m od odebraného vzorku (SMODCH), Topographic Position Index (TPI), Sklonitost a Jižnost. Poslední uvedená proměnná odpovídá úhlu mezi jižním směrem a orientací svahu (jižní svahy mají hodnotu 0 a severní hodnotu 180).

Dvě proměnné představuje reaktivita hornin. Jedná se o proměnné publikované v Chuman et al. (2014) (<https://doi.org/10.1080/17445647.2013.867418>). Proměnné byly následně pro potřeby analýzy upraveny: Reaktivita absolutní, představuje hodnotu reaktivity hornin. Protože míru toho, jak hornina reaguje z okolí, ovlivňuje i její schopnost zvětrávat (rychle zvětrávající hornina reaguje více, a naopak), tak byla zahrnuta i Reaktivnost ordinální,

která vyjadřuje přibližné pořadí z hlediska reaktivity hornin s ohledem na jejich erodovatelnost (horniny s hodnotou 1 jsou velmi reaktivní a zároveň snadno erodovatelné).

Dlouhodobý vliv atmosférické depozice síry a dusíku byl zohledněn ve třech vrstvách, představujících kumulativní atmosférické depozice v letech 1960–2000, konkrétně se jedná o: depozici dusíku na volné ploše (bulk), depozici síry na volné ploše (bulk) a depozici síry podkorunové (celková). Tyto hodnoty byly převzaty z databáze publikované v Oulehle et al. (2022), on-line aplikace: <https://centrumdivland.users.earthengine.app/view/depozice>. Přehled všech proměnných přírodního prostředí použitých k predikci půdních vlastností je uveden v Tabulce 2 a zobrazen v Příloze 1. V Příloze 1 je i mapa Geochemické reaktivity hornin, specificky upravená pro potřeby projektu DivLand.

Tabulka 2. Proměnné prostředí použité k predikci chemických vlastností lesních půd.

Proměnná	Původní zdroj dat	Hodnoty vrstvy
Extrémnní [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Glejová [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Obohacená humusem [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Obohacená vodou [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Oglejená [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Rašelinná [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Živná [Ekologická řada SLT]	ÚHÚL (Lesní typ)	[0, 1]
Zastoupení jehličnatého porostu (ZJP) [Smíšenost]	ÚHÚL	[0, 0.5, 1]
Průměrné srážky 1960–2000 [mm] [Klima]	ČHMÚ	<434, 1425>
Průměrné teploty 1960–2000 [°C] [Klima]	ČHMÚ	<0.93, 10.196>
Výška [m n. m.] [Reliéf]	SRTM	<49, 1 573>
Směrodatná odchylka výška (kruh poloměr 100 m) [m] [Reliéf]	SRTM	<0, 116>
TPI (3 x 3) [m] [Reliéf]	SRTM	<-81, 90>
Sklonitost [°][Reliéf]	SRTM	<0, 75>

Jižnost [°][Reliéf]	SRTM	<0, 181>
Kumulativní „bulk“ depozice dusíku 1960–2000 [kg/ha] [Atmosférická depozice]	Oulehle et al. 2022	<235, 922>
Kumulativní celková depozice síry 1960–2000 [kg/ha] [Atmosférická depozice]	Oulehle et al. 2022	<364, 4836>
Kumulativní „bulk“ depozice síry 1960–2000 [kg/ha] [Atmosférická depozice]	Oulehle et al. 2022	<161, 1171>
Reaktivita ordinální kategorie [Geochemická reaktivita hornin]	ČGS	[1, 2, 3 ... 29]
Reaktivita [Geochemická reaktivita hornin]	ČGS	<10, 2000>
JTSK_X [m] [Souřadnice S-JTSK]	Neudertová Hellebrandová et al. 2024	< 935 999, 1 226 499>
JTSK_Y [m] [Souřadnice S-JTSK]	Neudertová Hellebrandová et al. 2024	< 432 278, 903 278>

3.2. Tvorba modelů půdních vlastností

Modelování probíhalo v prostředí Python (3.11.8) a byla použita metoda Random Forest (RF) regression z knihovny Scikit-learn (1.5.0). RF je vhodná pro modelování v případě, že je k dispozici vyšší množství proměnných určených k modelování. Dále RF nevyžaduje transformaci vstupních dat a nevyžaduje splnění předpokladů, jako je linearita vztahů nebo normální rozdělení proměnných, což jej činí robustním pro širokou škálu aplikací.

Pro vyhledání ideálních parametrů byl využit Random Search o celkem 1000 iteracích. Počet náhodných stromů (trees - ve smyslu uzlů v metodě RF) při iteraci se pohyboval v intervalu 80–700. Počet proměnných, ze kterých se vybírá práh pro rozdělení větví, byla stanovena v intervalu 1–22. Počet vzorků, ze kterých se vytvářely jednotlivé stromy, byl hledán v intervalu 0–100 % z celkového počtu vzorků. Maximální hloubka stromů byla v intervalu 10–2000. Tento interval je takto široký, protože počet vzorků u jednotlivých modelovaných půdních vlastností sahal od 729 do 8051. Minimální velikost větve, která se směla ještě rozdělit, byla stanovena na 1–12 vzorků. Ve stejném intervalu byla i hodnota minimální velikosti větve pro rozdělení.

Celkový počet vzorků byl rozdělen na tréninkový a testovací soubor dat v poměru 9 : 1. Tyto soubory dat byly vytvořeny tak, aby relativní zastoupení tříd

z ekologické řady bylo v tréninkovém i testovacím souboru totožné (stratifikovaný výběr vzorků dle proměnné třída ekologické řady SLT). Jako nejlepší kombinace „hyperparametrů“ byla vybrána ta, která dle testovacího souboru dat dosáhla nejnižší mediánové absolutní odchylky. Průměrná absolutní odchylka nebyla pro tento účel použita, protože některé modelované proměnné dosahovaly u některých vzorků značně vyšších odlehklých hodnot oproti zbytku souboru. Tyto vzorky tak mohly absolutní průměrnou odchylku neproporčně ovlivnit (viz rozdíl průměr a medián). Kombinace vybraná dle průměrné absolutní odchylky by mohla dobře odpovídat vzorkům s odlehklými hodnotami, zatímco jiná kombinace by většinu ostatních vzorků odpovídala lépe. Testovací soubor dat nebyl zcela nezávislý, protože byl využit i při ladění „hyperparametrů“. Výsledky validace modelu tedy mohou být částečně zkresleny. Kvůli omezenému množství dat nebyl z původní databáze vyčleněn nezávislý validační soubor, což může zvýšit riziko přetrénování modelu.

3.3. Interpolace půdních vlastností z připravených modelů

Po vytvoření modelů, byly hodnoty modelovány do pravidelného zrna (gridu) s krokem 500 m vytvořeného pro účely modelování. Jednotlivé proměnné byly buňkám v gridu přiřazeny několika

způsoby. Vzhledem k nízkému rozlišení rastrů teplot a srážek a depozic, byla hodnota buňky převzata z nejbližšího středu pixelu těchto proměnných. Ostatní proměnné byly odvozovány z jejich překryvu se zalesněnou částí buňky. Výšky, rastry odvozené z výšek a reaktivita hornin byly většinou buňkám přiřazeny jako průměrná hodnota vyskytující se uvnitř zalesněné části buňky. U kategoriálních proměnných jako jsou jednotlivé třídy ekologické řady SLT, nebo ordinální pořadí reaktivity hornin, byla převzata majoritní (modus) hodnota vyskytující se v zalesněné části buňky. Míra zastoupení jehličnatých porostů byla určena jako vážený průměr v rámci buňky. Pokud například jedna třetina území byla listnatá (0), druhá smíšená (0,5) a třetí jehličnatá (1), tak výsledná hodnota byla 0,5, protože každá kategorie zabírala stejně velkou část území. Výsledná hodnota byla následně zaokrouhlena na jednu z tří hodnot: 0, 0,5 a 1, aby hodnota v buňce odpovídala hodnotám ze souboru pro modelování. Tyto způsoby přiřazování proměnných jednotlivým buňkám nemusí být vždy reprezentativní. Pokud například půlka buňky je

zabrána čistě jehličnatým a druhá čistě listnatým lesem, tak výsledná hodnota bude 0,5, přestože se v buňce žádný smíšený les nenachází. Stejně tak může nejvíce zastoupená třída z hlediska ordinálního pořadí reaktivity hornin zabírat jen malou část zalesněného území buňky a větší část může zabírat vícero horniny s velmi odlišnou reaktivitou. Také je nutné vzít v potaz, že v buňce rastru o rozloze 25 ha (za předpokladu kompletního zalesnění) mohou být hodnoty půdních proměnných velmi variabilní a je komplikované určit reprezentativní referenční hodnotu půdní proměnné, která by mohla být porovnána s výsledným vymodelovaným rastrem.

3.4. Odvozené půdní vlastnosti

Z vrstev vygenerovaných z modelů pro celou ČR (Tabulka 1) byly vypočteny vrstvy odvozených půdních vlastností (Tabulka 3). U každé vlastnosti byly vygenerovány vrstvy pro všechny tři horizonty (FH, 0–30 cm, 30–80 cm).

Tabulka 3. Odvozené půdní charakteristiky

Půdní vlastnost	Vzorec
C/N (w/w)	Hmotnostní poměr
C/P _{tot} (w/w)	Hmotnostní poměr
C/P _{ex} (w/w)	Hmotnostní poměr
N/P _{tot} (w/w)	Hmotnostní poměr
N/P _{ex} (w/w)	Hmotnostní poměr
SBC (Ca + Mg + K) [meq/kg]	Suma ekvivalentních koncentrací
Cation Exchange Capacity (CEC) [meq/kg]	SBC + TEA
Base saturation (BS) [%]	SBC/CEC*100

4. Modelované charakteristiky půdního chemismu

4.1. Validace modelovaných půdních proměnných

Celková validace jednotlivých půdních charakteristik byla provedena na celém souboru dat pomocí lineární regrese a metodou standardní chyby odhadu (RMSE). RMSE (Root Mean Square Error) je statistická metoda používána k hodnocení přesnosti predikčních modelů. Vypočítává se jako druhá odmocnina průměru čtvercových chyb mezi

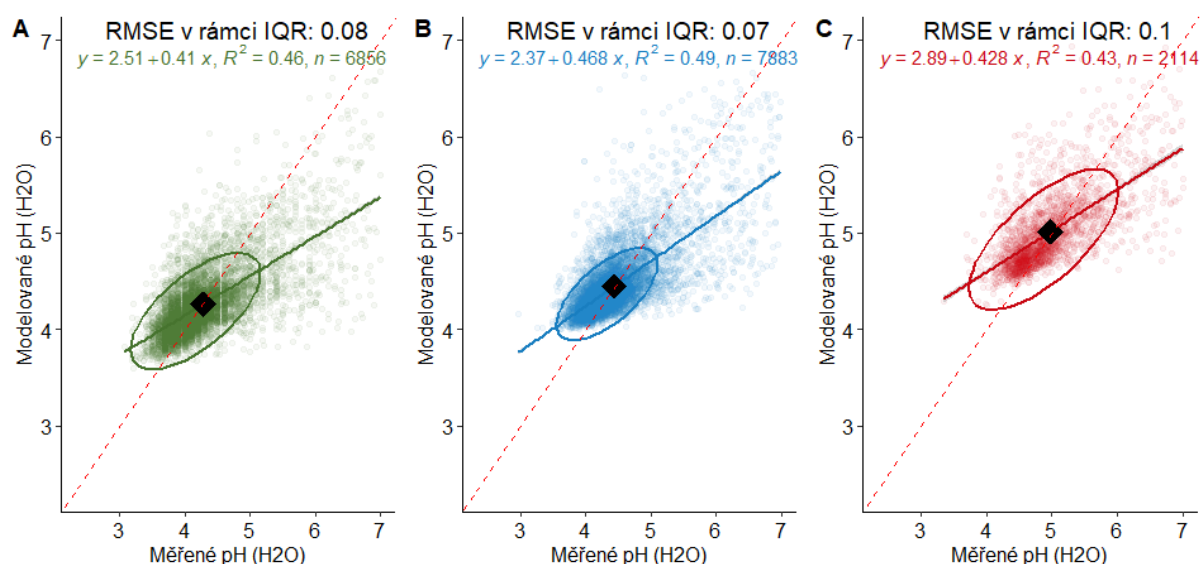
skutečnými a předpovězenými hodnotami. Tento ukazatel nám poskytuje informaci o průměrném stupni odchylky predikovaných hodnot od skutečných měření, přičemž je měřen ve stejných jednotkách jako predikovaná veličina. V rámci interpretace RMSE platí, že čím nižší hodnota RMSE, tím lepší je shoda mezi predikcemi modelu a skutečnými daty. V ideálním případě by RMSE mělo být co nejbližší nule, což by znamenalo, že model predikuje hodnoty velmi přesně. Naopak vyšší hodnoty RMSE ukazují na větší odchylky a slabší výkon modelu. Je důležité si uvědomit, že RMSE je citlivý na odlehlé hodnoty, což znamená, že velké

chyby mají výrazný vliv na celkový výsledek. To může být výhodné, pokud se zaměřujeme na minimalizaci velkých chyb, ale zároveň to může také zkreslovat hodnocení modelu, pokud se v datech nacházejí odlehlé hodnoty. Právě z tohoto důvodu je v našem případě RMSE počítáno pro výběr dat v rámci IQR. IQR, neboli interkvartilní rozsah, je statistická míra variability, která znázorňuje rozsah mezi prvním a třetím kvantilem dat. První kvartil (Q1) je hodnota, pod kterou leží 25 % dat, zatímco třetí kvartil (Q3) je hodnota, pod kterou leží 75 % dat. IQR se tedy vypočítává jako rozdíl mezi Q3 a Q1. IQR slouží k měření rozptýlenosti centrální části dat a je tak užitečný pro identifikaci odlehlých hodnot. Odlehlé hodnoty jsou obvykle definovány jako hodnoty, které jsou více než 1,5násobek IQR nad třetím kvantilem nebo pod prvním kvantilem. Důležitou výhodou používání IQR je, že je méně citlivý na extrémní hodnoty než jiné ukazatele variability, jako je rozsah/rozptyl nebo standardní

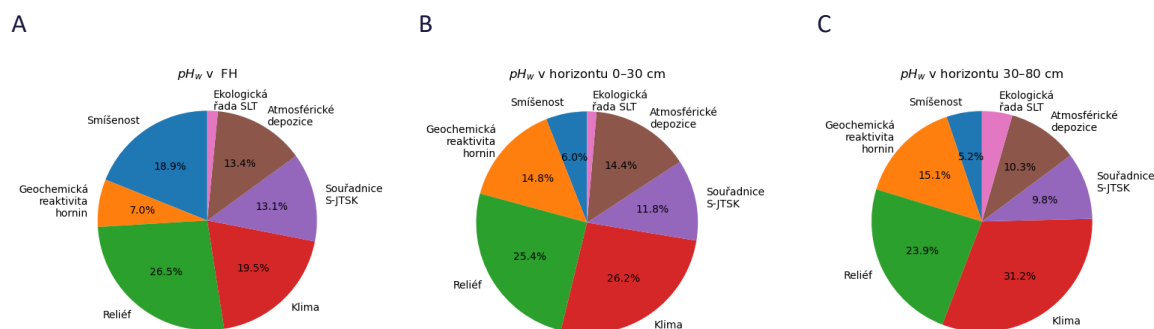
odchylka. Tato statistika je užitečná zejména v situacích, kdy se chceme zaměřit na rozptyl hodnot bez vlivu výrazných odlehlých hodnot, což nám umožňuje lépe pochopit variabilitu ve střední části datového souboru. RMSE je použito ve spojení s dalšími metrikami, jako R^2 , aby poskytlo komplexnější pohled na výkon RF modelu.

4.2. Mapa pH_w lesních půd

Distribuce modelovaného pH ve vodném výluhu (pH_w) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze II. Chyba modelovaných dat v rámci IQR se pohybuje pod 0.1 jednotky pH (Obrázek 1). Pro predikci pH v FH horizontu byl významný parametr smíšenosti porostu (jehličnatý/smíšený/listnatý les) a klimatické a reliéfové charakteristiky. V minerální půdě pak nabývá významu Geochemická reaktivita hornin (Obrázek 2).



Obrázek 1. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným pH a modelovaným pH pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR).

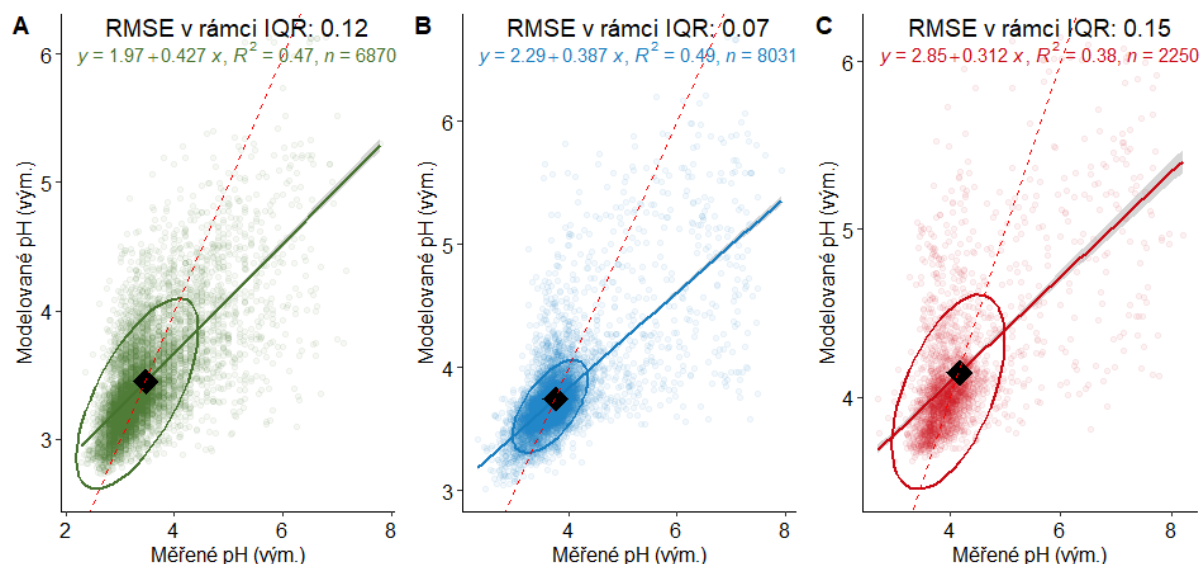


Obrázek 2. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci pH v půdním horizontu.

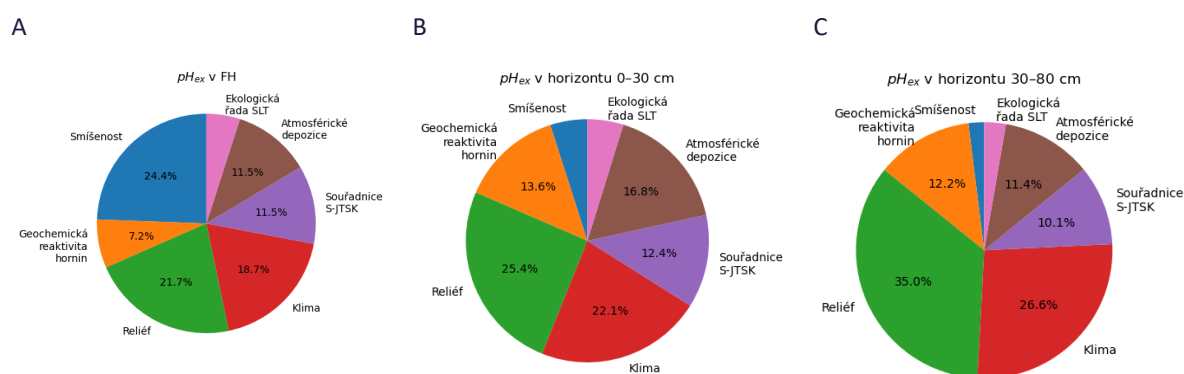
4.3. Mapa výměnného pH_{ex} lesních půd

Distribuce modelovaného výměnného pH (pH_{ex}) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v rámci IQR se pohybuje od 0.07 do 0.15 jednotky pH

(Obrázek 3). Nejnižší odchylka modelovaných hodnot je u horizontu 0-30 cm. Podobně jako u pH ve vodě, i pro predikci výměnného pH je významný typ porostu v FH horizontu. V minerální půdě pak nabývají na významu charakteristiky spjaté s klimatem a reliéfem (Obrázek 4).



Obrázek 3. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným výměnným pH a modelovaným výměnným pH pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR).

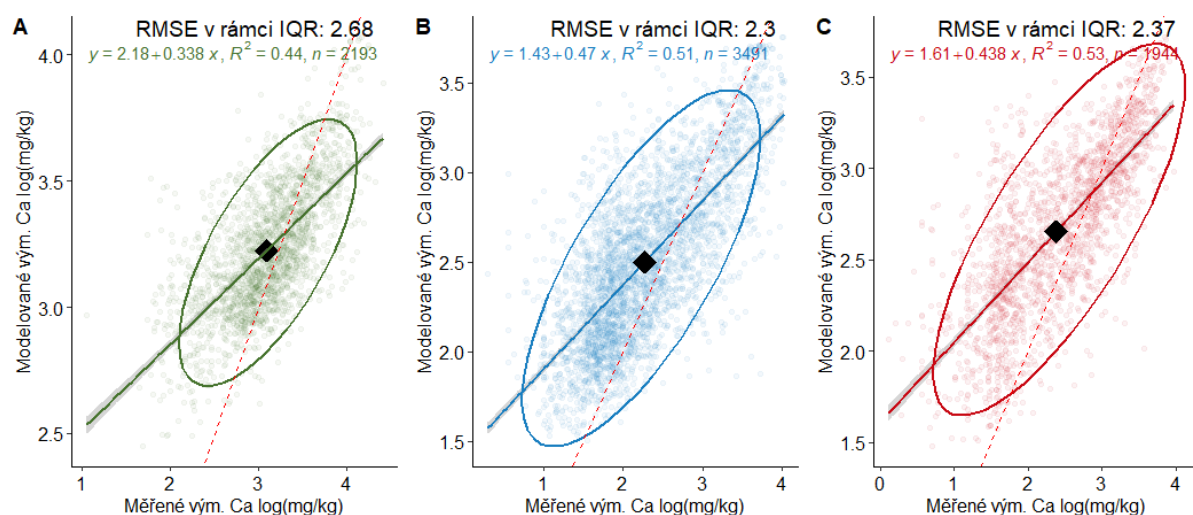


Obrázek 4. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci výměnného pH v půdním horizontu.

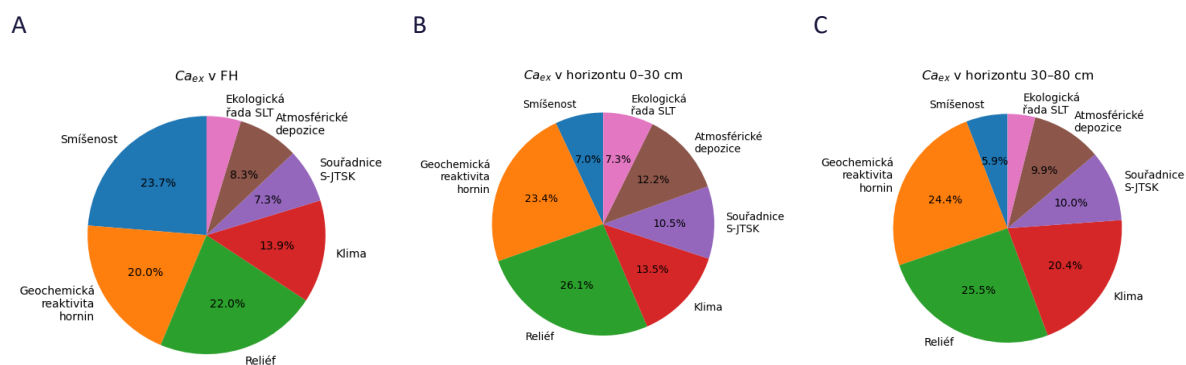
4.4. Mapa výměnného vápníku (Ca_{ex}) lesních půd

Distribuce modelovaného výměnného vápníku v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v

rámci IQR se pohybuje od 199 mg/kg v horizontu 0-30 cm do 479 mg/kg v horizontu FH (Obrázek 5). Geochemická reaktivita hornin je významná proměnná pro predikci výměnného Ca v lesních půdách. V organickém FH horizontu je to ještě typ porostu (Obrázek 6).



Obrázek 5. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným výměnným Ca a modelovaným výměnným Ca pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

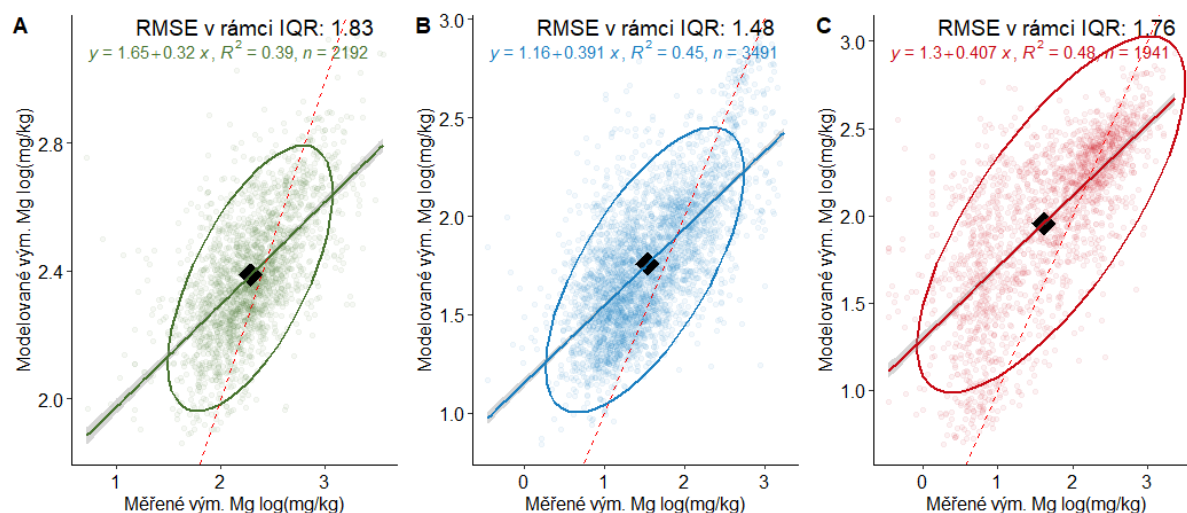


Obrázek 6. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci výměnného vápníku (Ca) v půdním horizontu.

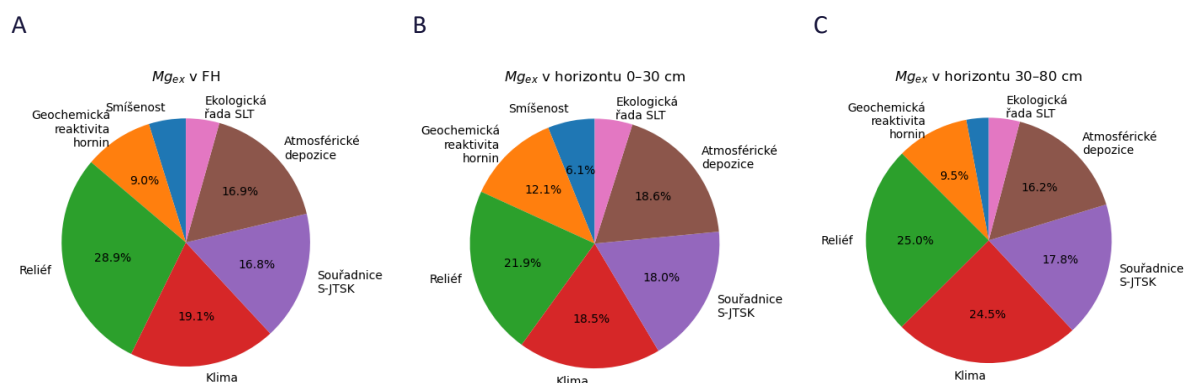
4.5. Mapa výměnného hořčíku (Mg_{ex}) lesních půd

Distribuce modelovaného výměnného hořčíku v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v

rámci IQR se pohybuje od 30 mg/kg v horizontu 0-30 cm do 68 mg/kg v horizontu FH (Obrázek 7). Vedle klimatických a reliéfových charakteristik, pro predikci výměnného Mg jsou důležité parametry atmosférické depozice a polohy (Obrázek 8).



Obrázek 7. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným výměnným Mg a modelovaným výměnným Mg pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

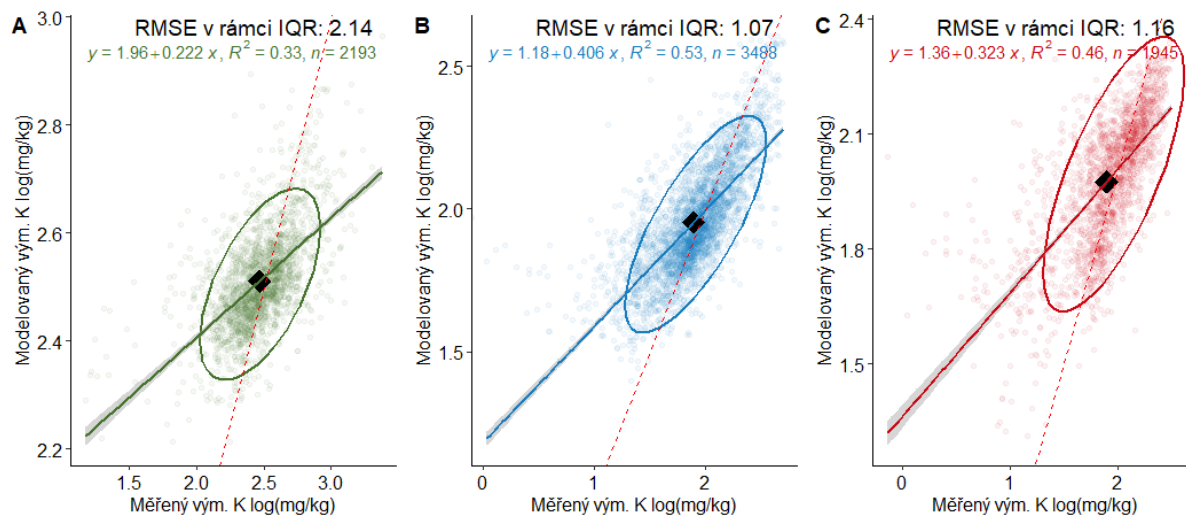


Obrázek 8. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci výměnného hořčíku (Mg) v půdním horizontu.

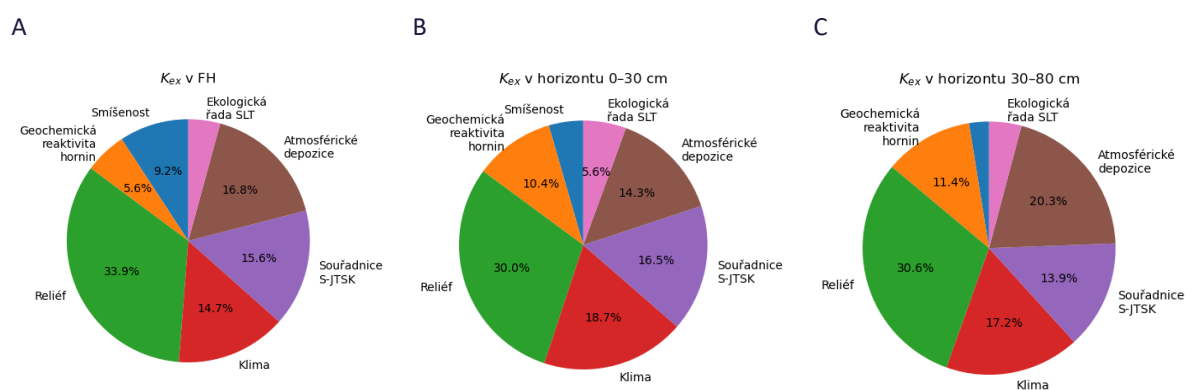
4.6. Mapa výměnného draslíku (K_{ex}) lesních půd

Distribuce modelovaného výměnného draslíku v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna V Příloze 2. Chyba modelovaných dat

v rámci IQR se pohybuje od 12 mg/kg v horizontu 0-30 cm do 138 mg/kg v horizontu FH (Obrázek 9). Pro predikci výměnného K jsou významné charakteristiky spjaté s klimatem, reliéfem, atmosférickou depozicí. V organickém horizontu se přidává i typ porostu (Obrázek 10).



Obrázek 9. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným výměnným K a modelovaným výměnným K pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

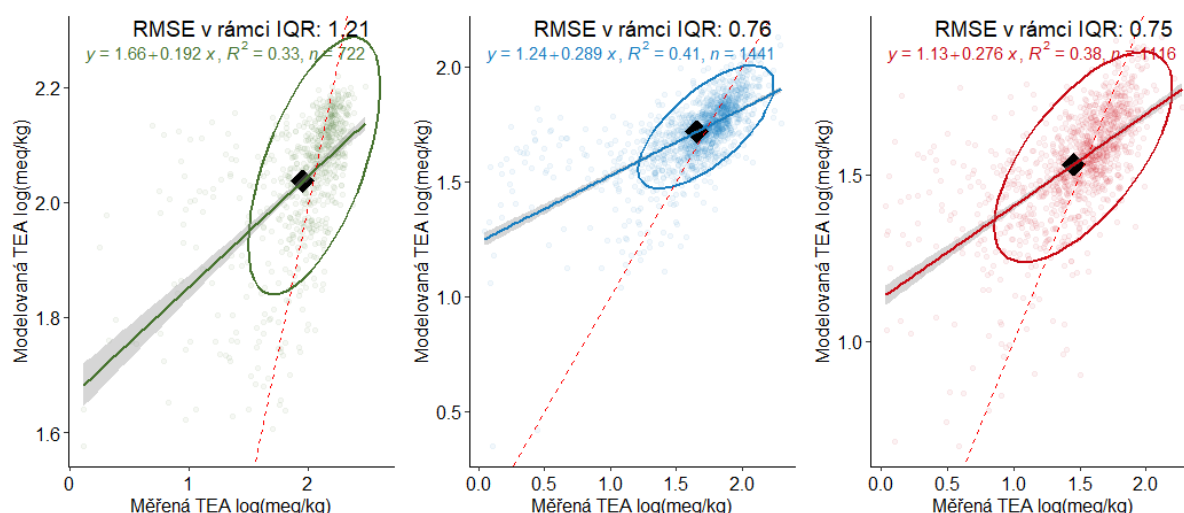


Obrázek 10. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci výměnného draslíku (K) v půdním horizontu.

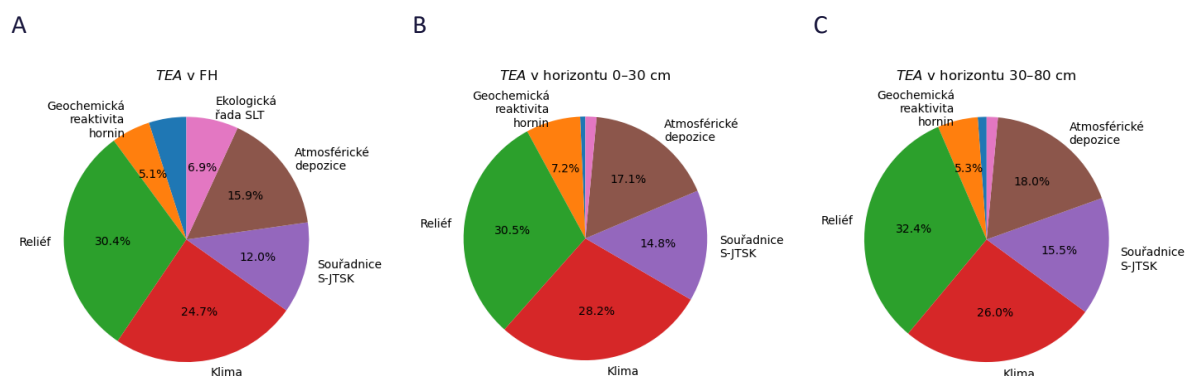
4.7. Mapa celkové výměnné acidity (TEA) lesních půd

Distribuce modelované celkové výměnné acidity v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v rámci IQR se pohybuje okolo 5.5 meq/kg

v horizontu 0-30 a 30-80 cm a je 16 meq/kg v horizontu FH (Obrázek 11). Vedle klimatických a reliéfových charakteristik jsou pro predikci TEA důležité charakteristiky prostředí závislé na atmosférické depozici a také živná řada (B) v rámci SLT pro FH horizont (Obrázek 12).



Obrázek 11. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřenou celkovou výměnnou aciditou (TEA) a modelovanou TEA pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

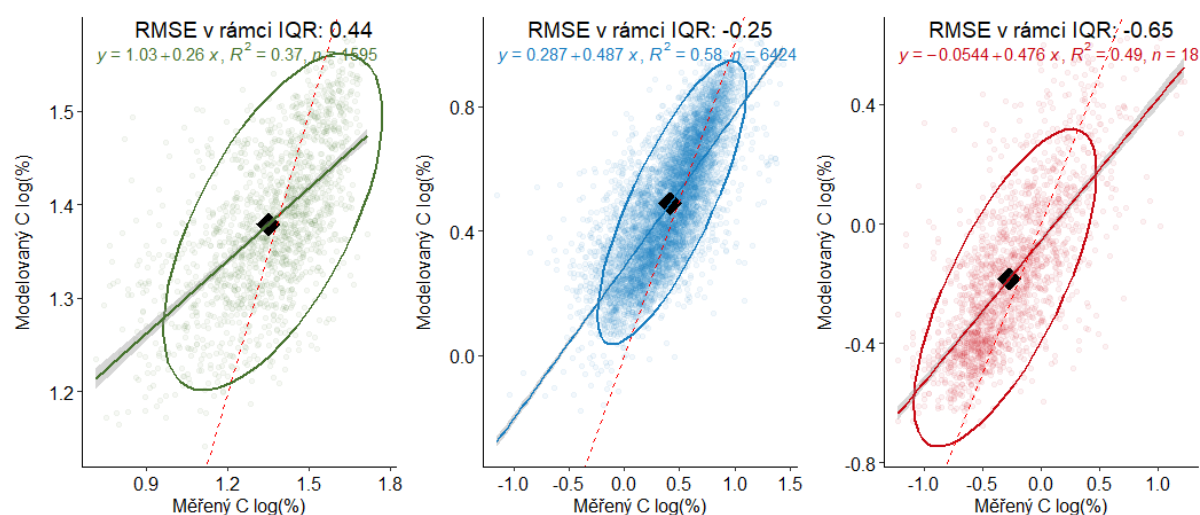


Obrázek 12. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci celkové výměnné acidity (TEA).

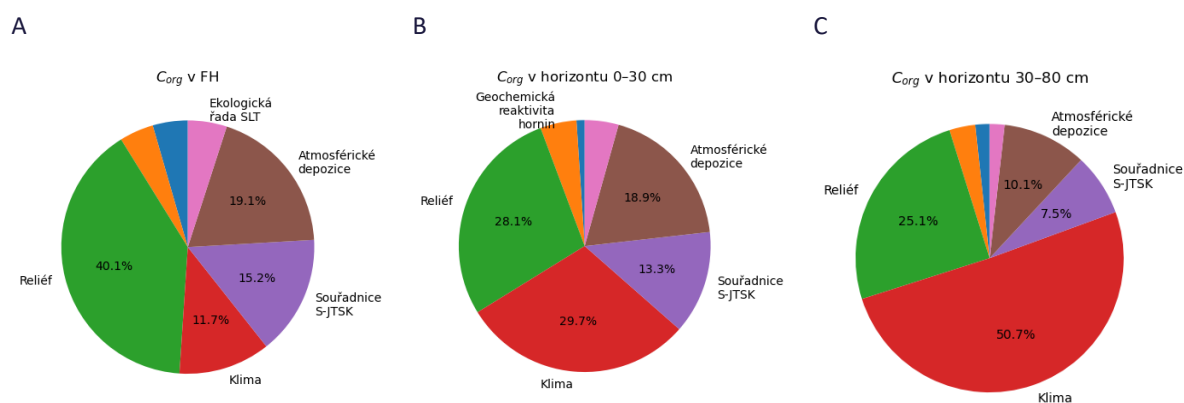
4.8. Mapa celkového organického uhlíku (C_{org}) lesních půd

Distribuce modelovaného celkového organického (oxidovatelného) uhlíku (C_{org}) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze II. Chyba modelovaných dat v rámci IQR je nejnižší v horizontu 30-80 cm (0.22 %), v horizontu 0-30 cm činí 0.56 % a v FH horizontu je 2.8 % (Obrázek 13).

Modelované chyby jsou úměrné absolutní koncentraci v půdních horizontech. Pro koncentraci organického C v FH horizontu jsou důležité charakteristiky prostředí spjaté s reliéfem (nadmořská výška) a atmosférickou depozicí (celková depozice síry). V minerální půdě pak roste význam proměnných spojených s klimatem, zejména s množstvím srážek (Obrázek 14).



Obrázek 13. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným celkovým organickým uhlíkem (C_{org}) a modelovaným C_{org} pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

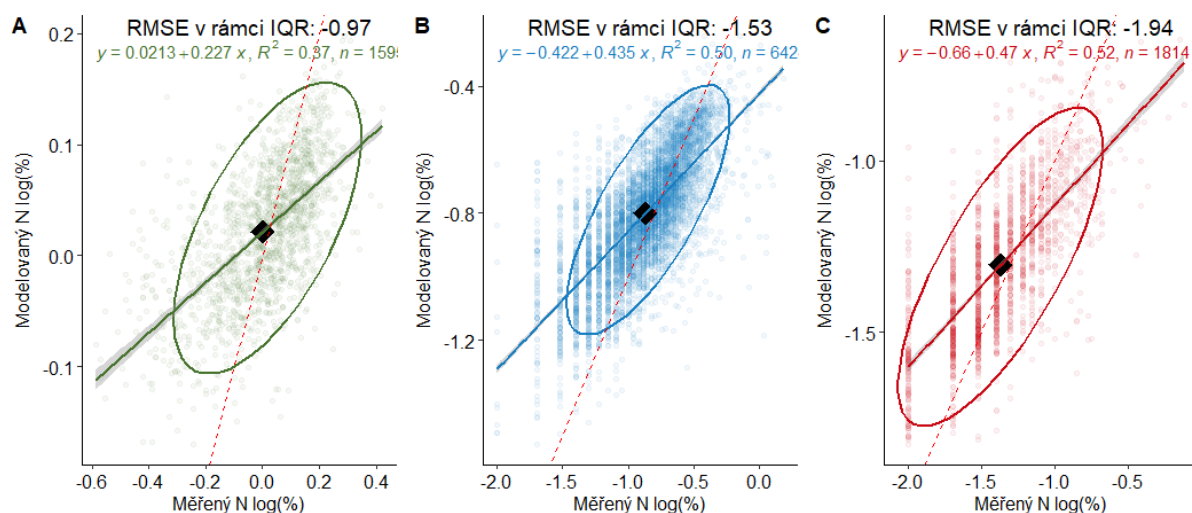


Obrázek 14. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci koncentrace organického (oxidovatelného) uhlíku (C).

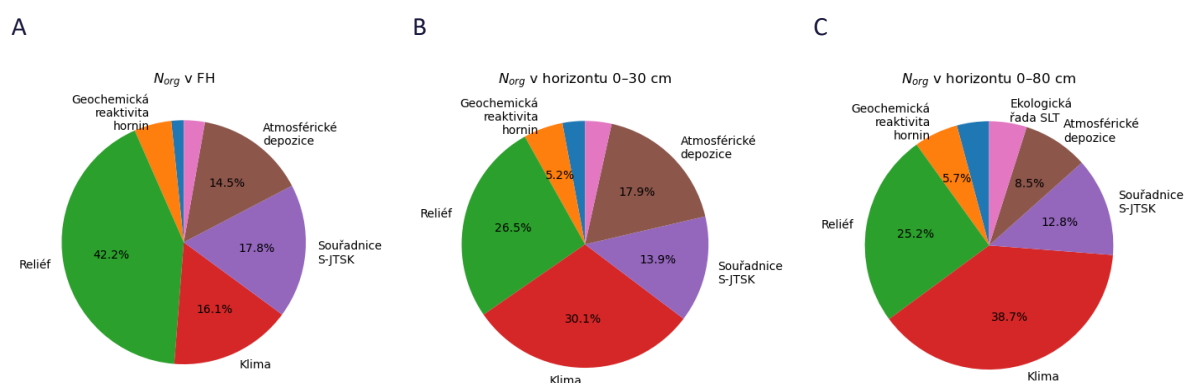
4.9. Mapa celkového organického dusíku (N_{org}) lesních půd

Distribuce modelovaného celkového organického dusíku (N_{org}) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v rámci IQR je nejnižší v horizontu 30-80 cm, 0.01 %, v horizontu 0-30 cm

činí 0.03 % a v FH horizontu je 0.11 % (Obrázek 15). Modelované chyby jsou úměrné absolutní koncentraci v půdních horizontech. Klimatické a reliéfové charakteristiky, společně s depozicí pro FH a svrchní minerální horizont, dominují ve významu pro predikci koncentrace organického N (Obrázek 16).



Obrázek 15. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným celkovým organickým dusíkem (N_{org}) a modelovaným N_{org} pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

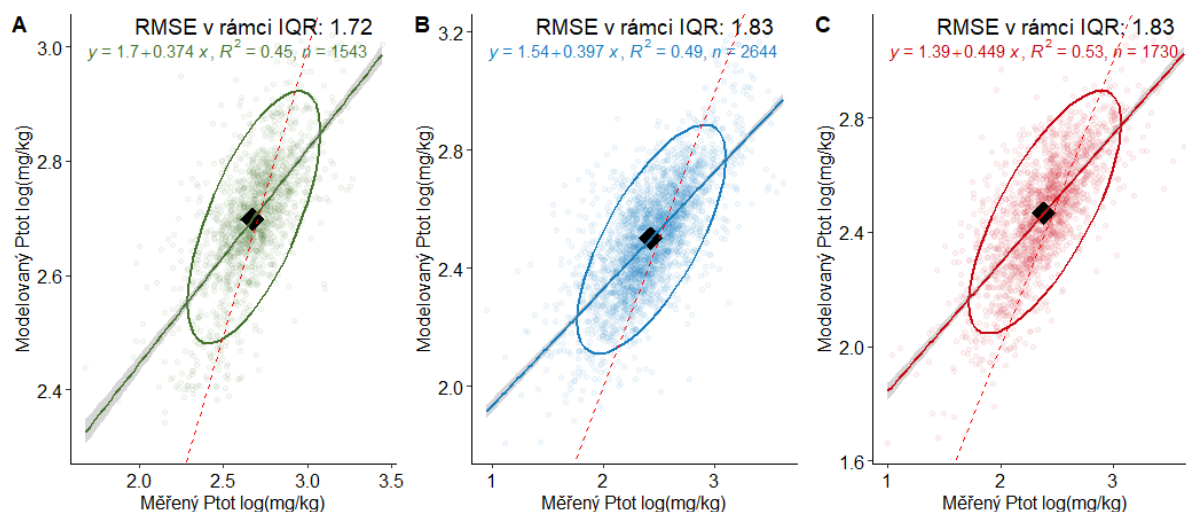


Obrázek 16. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci koncentrace organického (oxidovatelného) dusíku (N).

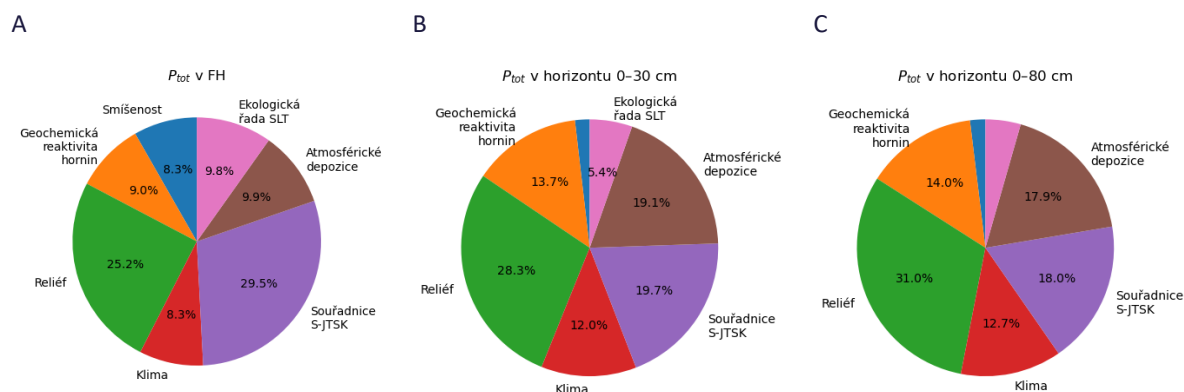
4.10. Mapa celkového fosforu (P_{tot}) lesních půd

Distribuce modelovaného celkového (pseudototálního) fosforu (P_{tot}) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze II. Jedná se o výluh 20 % HCl, který nereprezentuje

celkový obsah v půdě, ale spíše koncentraci pevně vázaného P. Chyba modelovaných dat v rámci IQR je srovnatelná v minerálních horizontech (68 mg/kg) a nižší v FH horizontu (52 mg/kg) (Obrázek 17). Vedle polohy je pro predikci celkového P významný faktor geochemické reaktivity a atmosférické depozice (Obrázek 18).



Obrázek 17. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným celkovým (pseudototálním) fosforem (P_{tot}) a modelovaným P_{tot} pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.

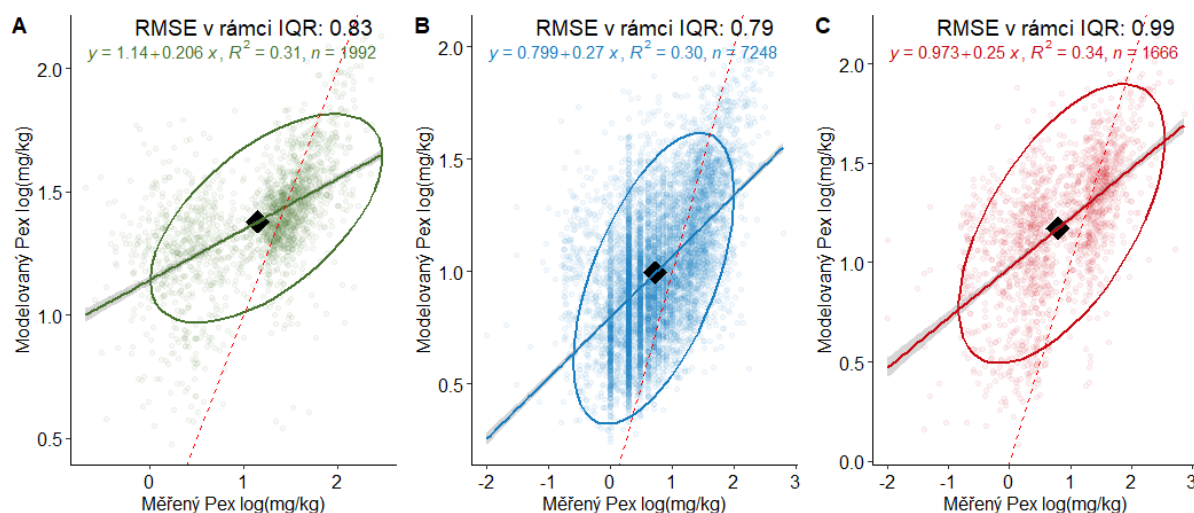


Obrázek 18. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci koncentrace celkového fosforu (P).

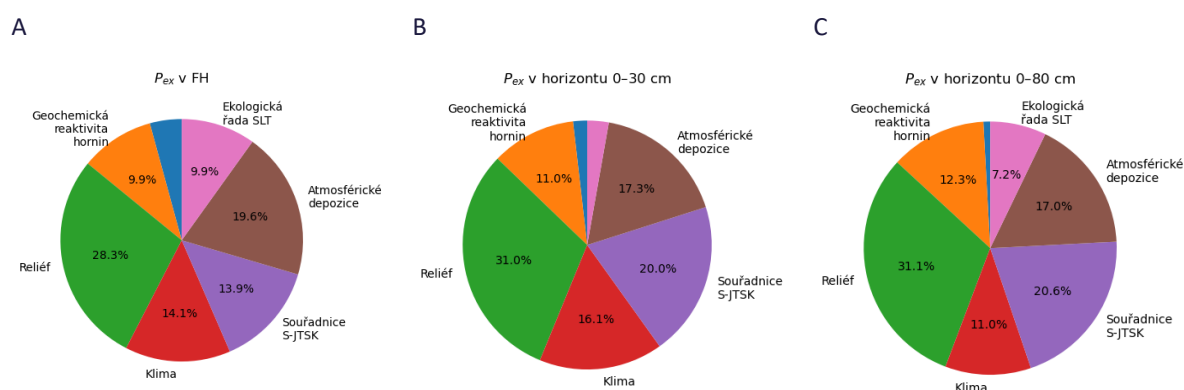
4.11. Mapa přístupného fosforu (P_{ex}) lesních půd

Distribuce modelovaného přístupného fosforu (P_{ex}) v lesních půdách pro FH, 0-30 cm a 30-80 cm je znázorněna v Příloze 2. Chyba modelovaných dat v rámci IQR je 6.2 mg/kg v horizontu 0-30 cm, 6.8 mg/kg v FH horizontu a 9.8 mg/kg v horizontu 30-

80 cm (Obrázek 19). Geochemická reaktivita hornin společně s atmosférickou depozicí patří, vedle popisu reliéfu, k významným charakteristikám prostředí při predikci koncentrace přístupného P v lesních půdách. Důležitým parametrem pro predikci jsou též řady SLT, zejména P, B, J (Obrázek 20).



Obrázek 19. Na obrázku jsou znázorněny tři grafy, které ilustrují vztah mezi měřeným přístupným fosforem (P_{ex}) a modelovaným P_{ex} pro různé vrstvy půdy, konkrétně pro FH horizont (A), 0-30 cm (B) a 30-80 cm (C). Červená přerušovaná čára představuje ideální linii, po které by se měly hodnoty pohybovat, pokud by nebyly žádné odchylky. Všechny grafy zahrnují také elipsy, které indikují 95 % interval spolehlivosti pro predikce na základě modelu. Každý graf uvádí RMSE (Root Mean Square Error) v rámci interkvartilního rozsahu (IQR). Hodnoty jsou logaritmovány.



Obrázek 20. Agregovaný význam jednotlivých proměnných pro predikci koncentrace přístupného fosforu (P).

4.12. Odvozené mapy ze základního souboru

Ze základního souboru modelovaných charakteristik lesních půd byly odvozeny hodnoty pro sumu bazických kationtů ($SBC = Ca + Mg + K$,

meq/kg), kationtovou výměnnou kapacitu ($SBC + TEA$, meq/kg) a bazickou saturaci (BS , %). Živiny N a P byly vyjádřeny jako hmotnostní poměry vůči C_{org} (C/N , C/P_{tot} , C/P_{ex}) a vůči sobě navzájem (N/P_{tot} a N/P_{ex}).

5. Postup tvorby rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace pro území ČR

Rajonizace lesních půd z hlediska nutriční degradace vychází z modelovaných charakteristik půdního prostředí zahrnující pH_w , pH_{ex} , TEA, SBC, CEC, BS, C/N, C/P_{ex} a N/P_{ex}. Tyto parametry byly redukovány analýzou hlavních komponent (PCA) tak, aby nejlépe charakterizovaly a) acido-bazické vlastnosti, b) dostupnost dusíku a c) dostupnost fosforu.

Analýza hlavních komponent (PCA) je statistická technika používaná pro redukcí dimenzionality, která transformuje velký soubor korelovaných proměnných na menší soubor nekorelovaných proměnných, tzv. hlavní komponenty (RC). Tyto komponenty zachycují největší rozptyl v datech a zároveň zjednodušují soubor dat. Aplikovali jsme analýzu PCA s varimaxovou rotací s cílem zjednodušit interpretaci komponent maximalizací rozptylu čtvercových zátěží, což usnadňuje určení, které proměnné mají největší vliv na jednotlivé komponenty. Skóre PCA pro nejvýznamnější tři RC byly extrahovány a následně použity k určení optimálního počtu shluků v souboru dat pomocí shlukování K-means. Tento algoritmus rozdělí data do odlišných skupin na základě podobností s určeným počtem shluků. K-means shlukování je aplikováno na první tři RC, tak aby se vytvořily čtyři různé shluky (Třídy). Počet tříd byl určen na základě analýzy „Elbow“, běžná technika používaná k určení optimálního počtu shluků pro algoritmus shlukování k-means. Vynesením počtu shluků do grafu v závislosti na WSS (total within-cluster sum of squares) můžeme vizuálně identifikovat „loketní bod“ – proto Elbow metoda – v grafu. Tento bod naznačuje optimální hodnotu (k), kdy přidávání dalších shluků/tříd již nezlepšuje hodnotu WSS.

Analýza využívá několik R balíčků: psych pro provádění analýzy hlavních komponent (PCA) s různými možnostmi, včetně rotačních metod, jako je Varimax, což zlepšuje interpretaci rozptylu dat; a stats, základní balíček R, který obsahuje základní statistické funkce, zejména funkci kmeans() pro rozdělení skóre PCA do jednotlivých shluků/tříd.

Pro vitalitu lesních ekosystémů jsou determinující především půdní horizonty FH a svrchní minerální horizont (0-30 cm). Dekompozicí opadu v FH horizontu se uvolňují (mineralizují) živiny potřebné pro zdárný růst lesa, jedná se především o dusík a fosfor.

Dusík nemá zdroj ve zvětrávacích procesech a jeho akumulace v ekosystémech je závislá na

dlouhodobé retenci N z atmosféry. Do půd se dostává jednak fixací vzdušného N_2 – hlavně v podmínkách nízké dostupnosti N v půdách – a pak také atmosférickou depozicí anorganického N ($N-NH_4$ a $N-NO_3$). Depozice N je úměrná antropogenním emisím N z průmyslu, dopravy a zemědělství. Při vysokých depozicích N může docházet k saturaci ekosystému projevující se sníženou schopností dusík zadržovat. Dusík pak může opouštět ekosystém ve formě dusičnanu (NO_3), kdy je vyplavován do povrchových a podzemních vod a je také uvolňován v plynné formě (N_2O a N_2) při procesu nitrifikace (N_2O) a denitrifikace (N_2O a N_2). Oxid dusný (N_2O) je významným skleníkovým plynem. Dusičnan v půdních vodách zase má potenciál acidifikovat půdy, podobně jako síran v éře kyselých dešťů. Ve studii z roku 2021 (Oulehle et al. 2021) jsme na základě izotopových technik ($\delta^{15}N$) a N bilancí ukázali, že ztráta NO_3 vyplavováním a plynných forem N je úměrná nerovnováze mezi dusíkem a uhlíkem společně s fosforem v nadložním horizontu lesních půd. Vše konzistentně podmíněné přítomným mikrobiálním společenstvem (Tahovská et al. 2023). Tyto výzkumy v České republice ukazují možnosti využití map stechiometrie C:N:P v půdě pro modelování retence dusíku v lesích, případně emisí plynného N. Silná korelace mezi poměrem C:N:P v lesním půdním profilu a ztrátami N (rozpuštěného i plynného), naznačuje, že oblasti se specifickými stechiometrickými charakteristikami mají větší či menší pravděpodobnost zadržení deponovaného dusíku. Konkrétně vyšší poměry N:P v lesní půdě, které znamenají limitaci P, byly spojeny s většími ztrátami dusíku. Integrací prostorově explicitních údajů o stechiometrii C:N:P v půdě je tedy možné zvýšit přesnost modelů předpovídajících zadržování N v českých lesích. Tento přístup by mohl být přínosný pro lesní hospodaření a snahy o ochranu lesů tím, že by lépe předpovídal oblasti, které jsou náchylné k saturaci N a s tím spojených negativních environmentálních důsledků.

Na rozdíl od biogenních prvků, jsou acidobazické vlastnosti půd – půdní kyselost a s ní související obsah bazických kationtů (vápník, hořčík a draslík) – určovány především pufrací schopností půdotvorného substrátu (geologické podloží) a mírou přirozeného a antropogenně podmíněného vyplavování bazických kationtů, která je určována srážkovým úhrnem a koncentrací organických kyselin a silných minerálních kyselin v půdních vodách. Acidobazické vlastnosti je tedy nejlépe hodnotit ve svrchním minerálním horizontu, kde tyto procesy jsou nejintenzivnější a kde také probíhá příjem bazických kationtů kořeny stromů.

5.1. Rozdělení lesních půd v horizontu nadložního humusu (FH)

Tři hlavní komponenty (RC) vysvětlují 91.5 % variability v modelovaných datech půdního chemismu pro FH horizont (Tabulka 4). První komponenta (RC1) je primárně spjatá s acidobazickými vlastnostmi půd, pozitivní korelace s pH, SBC, BS, negativní s celkovou

kyselostí (TEA). Druhá komponenta souvisí s koncentrací přístupného fosforu (P_{ex}) a jeho poměru vůči C a N. Pozitivní vztah znamená čím vyšší RC2 hodnota, tím vyšší P limitace (nižší C:P, N:P poměr). Třetí komponenta vyjadřuje míru dostupnosti dusíku, vyjádřenou v poměru k C. Čím vyšší hodnota RC3, tím vyšší C:N poměr, tedy vyšší limitace N.

Tabulka 4. „Loading“ představují korelaci mezi původními proměnnými a komponentami. Vysoká absolutní hodnota „Loading“ naznačuje silný vztah s danou proměnnou. Celková variabilita udává podíl celkového rozptylu datového souboru vysvětlený každou komponentou.

Loading	RC1	RC2	RC3
pH_w	0.879	-0.218	-0.321
pH_{ex}	0.884	-0.229	-0.326
TEA	-0.785	0.409	
SBC	0.945	-0.160	-0.158
CEC	0.876		-0.188
BS	0.883	-0.346	
C:N	-0.271	0.197	0.927
C: P_{ex}	-0.216	0.946	0.205
N: P_{ex}	-0.233	0.957	
Celková variabilita	0.532	0.783	0.915

Analýza podobnosti hlavních komponent (RC1, RC2 a RC3) pomocí algoritmu k-means rozdělila databázi půdního chemismu do 4 tříd (Obrázek 21, Obrázek 22):

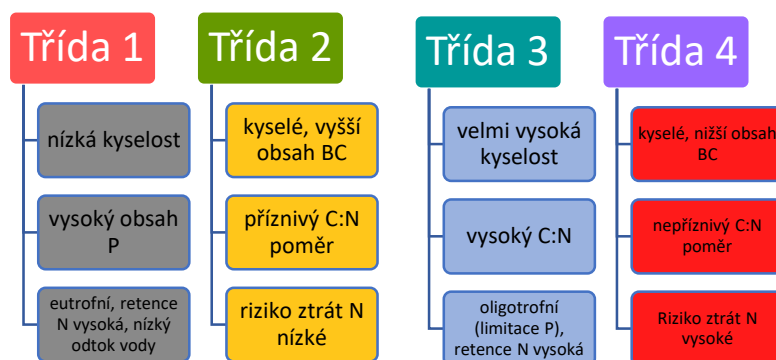
Třída 1: Půdy na rozloze 3433 km², 13 % rozlohy lesů. Tyto půdy se nachází převážně v nízkých nadmořských výškách, vykazují vysokou bazickou saturaci (medián = 83 %), příznivé pH (medián pH_{ex} = 4.5). Přestože mají relativně nízký poměr C:N (medián = 21), tak vykazují nejpříznivější poměr přístupného fosforu vůči dusíku, medián N: P_{ex} = 206. Jedná se tedy o půdy živinově bohaté, s vysokým produkčním potenciálem. Riziko vyplavování dusičnanů existuje (C:N poměr pod kritickou hodnotou 25), nicméně v důsledku dostupnosti fosforu pro mikrobiální procesy je toto riziko minimalizováno a dusík může být účinně imobilizován v půdách ve formě organického dusíku.

Třída 2: Půdy na rozloze 9825 km², 38 % rozlohy lesů. Půdy s kyselým FH horizontem (medián pH_{ex} = 3.4), nicméně s relativně příznivým obsahem bazických kationtů a bazickou saturací (medián BS = 61 %). Poměr C:N je příznivý (medián C:N = 24) a dostupnost fosforu můžeme očekávat relativně příznivou (medián N: P_{ex} = 383). Jedná se o půdy převážně středních poloh s vyváženou koncentrací dusíku a fosforu. Riziko vyplavování dusičnanů je nízké až střední.

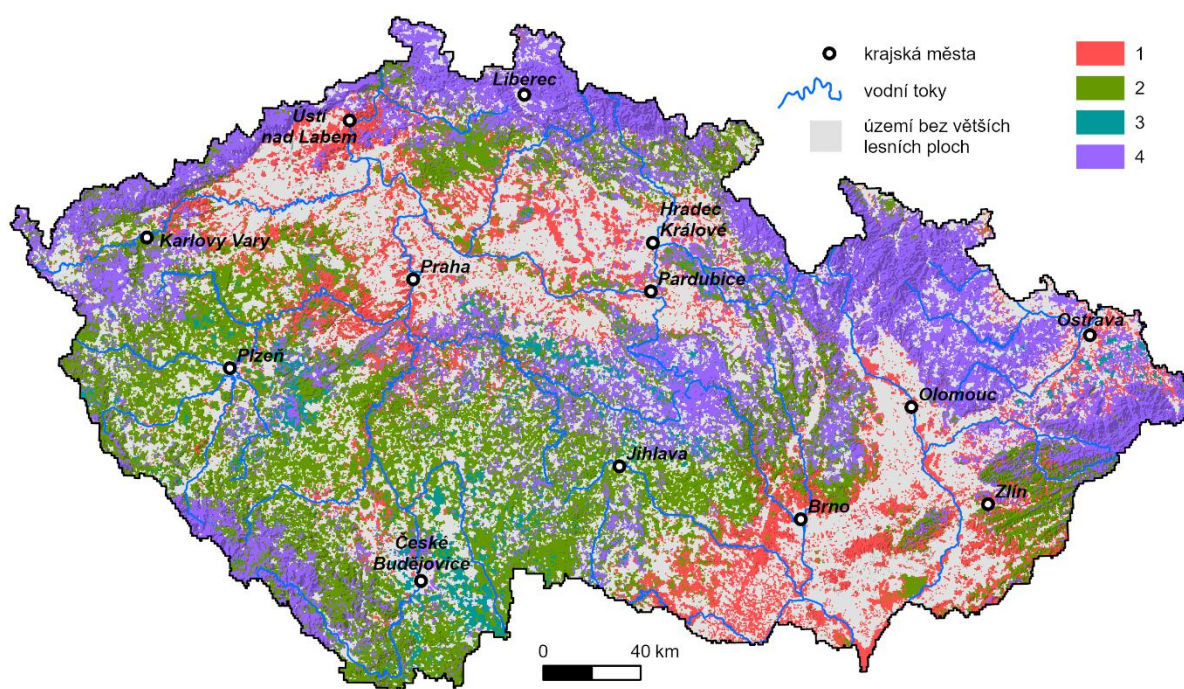
Třída 3: Půdy na rozloze 1104 km², 4.3 % rozlohy lesů. Plošně relativně omezené půdy, velmi kyselé (medián pH_{ex} = 3.2). Půdy mají relativně vysokou koncentraci C a N v FH horizontu, s C:N poměrem mezi 24-26. Zároveň vykazují velmi nízkou koncentraci přístupného fosforu a tedy nepříznivý poměr N: P_{ex} (medián = 1383), jedná se tedy o půdy silně fosforem limitované. Můžeme zde očekávat nízký produkční potenciál. Často se jedná o půdy ovlivněné vodou, pravděpodobně časté budou anoxické podmínky.

Třída 4: Půdy na rozloze 11331 km², 44 % rozlohy lesů. Podobně jako u půd Tříd 3 je FH horizont kyselý (medián pH_{ex} = 3.4), ale vykazuje nižší obsah bazických kationtů a v důsledku i nižší bazickou saturaci (medián BS = 50 %). Jde o půdy s nízkým

poměrem C:N (medián C:N = 22) a podobným poměrem N:P_{ex} jako u Tříd 3. Díky relativně nízkému C:N poměru je ale riziko vyplavování dusičnanů vysoké. Jde o půdy středních a vyšších poloh.



Obrázek 21. Zjednodušená charakterizace Tříd FH horizontu na základě acido-bazických a stechiometrických vlastností.



Obrázek 22. Mapa jednotlivých Tříd (1-4) pro FH horizont lesních půd.

5.2. Rozdělení lesních půd v horizontu 0-30 cm

Tři hlavní komponenty (RC) vysvětlují 91 % variability v modelovaných datech půdního chemismu pro horizont 0-30 cm (Tabulka 5). První komponenta (RC1) je primárně spjatá s acidobazickými vlastnostmi půd, pozitivní

korelace s pH, SBC, BS a s CEC. Druhá komponenta souvisí s koncentrací přístupného fosforu (P_{ex}) a jeho poměru vůči C a N a také s TEA. Pozitivní vztah znamená čím vyšší RC2 hodnota, tím vyšší P limitace (nižší C:P, N:P poměr) a vyšší TEA. Třetí komponenta vyjadřuje míru dostupnosti dusíku, vyjádřenou v poměru k C. Čím vyšší hodnota RC3, tím vyšší C:N poměr, tedy vyšší limitace N.

Tabulka 5. „Loading“ představují korelaci mezi původními proměnnými a komponentami. Vysoká absolutní hodnota „Loading“ naznačuje silný vztah s danou proměnnou. Celková variabilita udává podíl celkového rozptylu datového souboru vysvětlený každou komponentou.

Loading	RC1	RC2	RC3
pH_w	0.946	-0.178	-0.111
pH_{ex}	0.938		
TEA	-0.627	0.622	
SBC	0.966	-0.143	
CEC	0.900	0.126	-0.117
BS	0.866	-0.359	-0.116
C:N	-0.147		0.983
C: P_{ex}		0.952	0.205
N: P_{ex}		0.969	
Celková variabilita	0.521	0.793	0.911

Analýza podobnosti hlavních komponent (RC1, RC2 a RC3) pomocí algoritmu k-means rozdělila databázi půdního chemismu do 4 tříd (Obrázek 23, Obrázek 24):

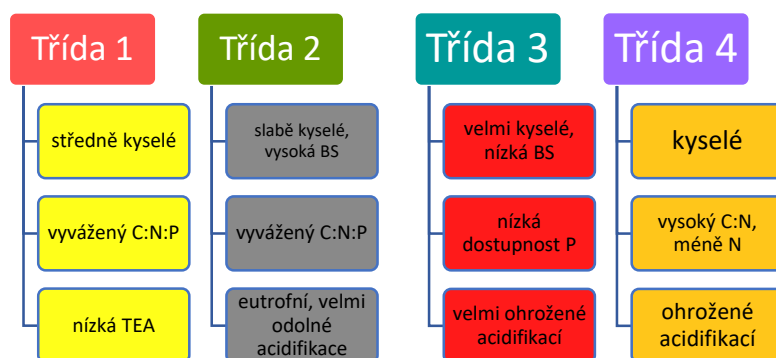
Třída 1: Půdy na rozloze 14477 km², 56 % rozlohy lesů. Tyto půdy se nachází převážně ve středních nadmořských výškách, s bazickou saturací pohybující se mezi 26 až 48 % (medián = 37%), s kyselým pH (medián pH_w = 4.5). Přestože mají relativně nízký poměr C:N (medián = 18), tak vykazují příznivý poměr přístupného fosforu vůči dusíku, medián N: P_{ex} = 79. Přestože se jedná o kyselé půdy, relativně nízká výměnná kyselost (medián = 50 meq/kg), kombinovaná s relativně příznivým pH vymezují tyto půdy jako příznivé z hlediska rozpouštění toxického hliníku (Al).

Třída 2: Půdy na rozloze 1838 km², 7.1 % rozlohy lesů. Plošně relativně omezené půdy, nekyselé (medián pH_w = 5.5), bazická saturace nad 74 %. Půdy mají nízký C:N, zároveň vykazují vysokou koncentraci přístupného fosforu a tedy příznivý

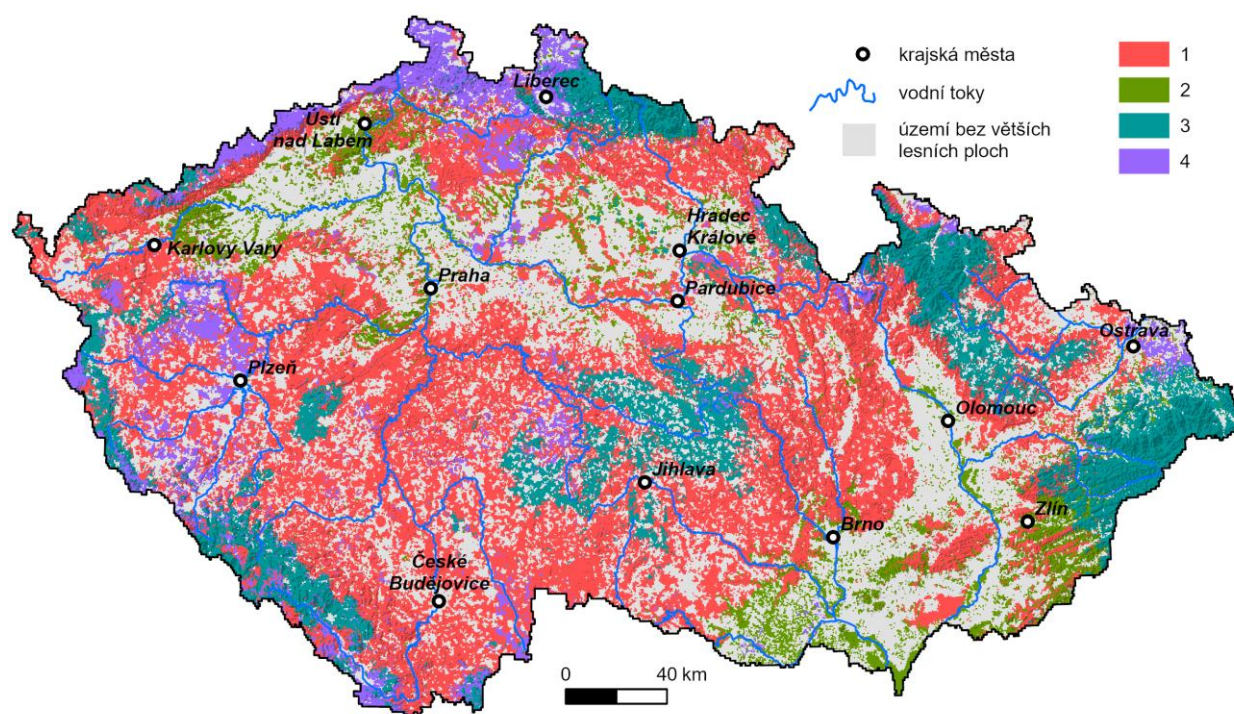
poměr N: P_{ex} (medián = 80). Jedná se o úživné minerální půdy nížin a alkalických hornin.

Třída 3: Půdy na rozloze 6272 km², 24 % rozlohy lesů. Půdy s velmi kyselým pH (medián = 4.35, vysokou celkovou kyselostí (medián = 65 meq/kg) a nízkou bazickou saturací (medián = 18 %). Poměr C:N je nízký (medián C:N = 19) a dostupnost fosforu limitovaná (medián N: P_{ex} = 322). Jedná se o půdy velmi kyselé s nízkým potenciálem retence dusíku, tedy o půdy velmi citlivé k acidifikaci.

Třída 4: Půdy na rozloze 3106 km², 12 % rozlohy lesů. Podobně jako u půd Třídě 3 se jedná o minerální půdy s nízkým pH (medián pH_{H_2O} = 4.4), ale s nižší výměnnou kyselostí a vyšším obsahem bazických kationtů. Bazická saturace je tedy příznivější než u půd Třídě 3 (medián BS = 30 %). Tyto půdy vykazují nejvyšší poměr C:N v minerální půdě (medián = 26) a to především díky nižšímu obsahu dusíku. Díky tomu je zde také mnohem příznivější poměr mezi N a P_{ex} (medián = 124).



Obrázek 23. Zjednodušená charakterizace Tříd v minerálním 0-30 cm horizontu na základě acido-bazických a stechiometrických vlastností.



Obrázek 24. Mapa jednotlivých Tříd (1-4) v horizontu 0-30 cm lesních půd.

5.3. Rozdělení lesních půd v horizontu 30-80 cm

Tři hlavní komponenty (RC) vysvětlují 90 % variability v modelovaných datech půdního chemismu pro horizont 30-80 cm (Tabulka 6). První komponenta (RC1) je primárně spjatá s acidobazickými vlastnostmi půd, pozitivní

korelace s pH, SBC, BS a s CEC. Druhá komponenta souvisí s koncentrací přístupného fosforu (P_{ex}) a jeho poměru vůči C a N. Pozitivní vztah znamená čím vyšší RC2 hodnota, tím vyšší P limitace (nižší C:P, N:P poměr). Třetí komponenta vyjadřuje míru dostupnosti dusíku, vyjádřenou v poměru k C. Čím vyšší hodnota RC3, tím vyšší C:N poměr, tedy vyšší limitace N.

Tabulka 6. „Loading“ představují korelaci mezi původními proměnnými a komponentami. Vysoká absolutní hodnota „Loading“ naznačuje silný vztah s danou proměnnou. Celková variabilita udává podíl celkového rozptylu datového souboru vysvětlený každou komponentou.

Loading	RC1	RC2	RC3
pH_w	0.965		
pH_{ex}	0.858		0.339
TEA	-0.729	0.499	
SBC	0.932		-0.278
CEC	0.850	0.170	-0.341
BS	0.850	-0.187	-0.339
C:N	-0.128		0.939
C: P_{ex}		0.980	
N: P_{ex}		0.975	
Celková variabilita	0.503	0.751	0.898

Analýza podobnosti hlavních komponent (RC1, RC2 a RC3) pomocí algoritmu k-means rozdělila databázi půdního chemismu do 4 tříd (Obrázek 25, Obrázek 26):

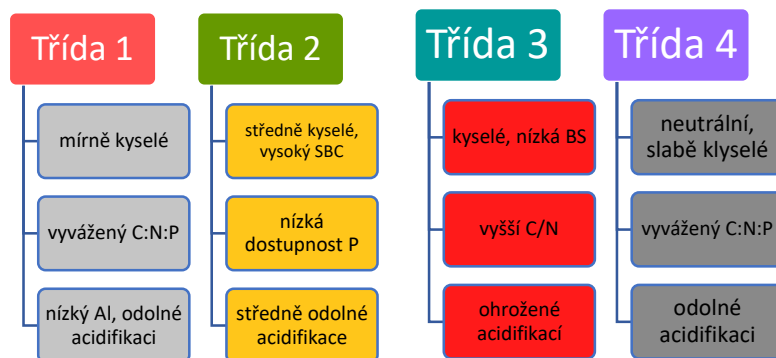
Třída 1: Půdy na rozloze 14247 km², 55 % rozlohy lesů. Půdy s příznivým pH a bazickou saturací (medián = 61 %). Půdy s vyrovnanou C:N:P stechiometrií.

Třída 2: Půdy na rozloze 1409 km², 5.5 % rozlohy lesů. Plošně relativně omezené půdy (Beskydy), mírně kyselé (medián pH_{H_2O} = 4.99), bazická saturace s poměrně širokým rozpětím, ale půdy s vyšším obsahem bazických kationtů než u půd v Třídě 3. Půdy vykazují nízký obsah výměnného

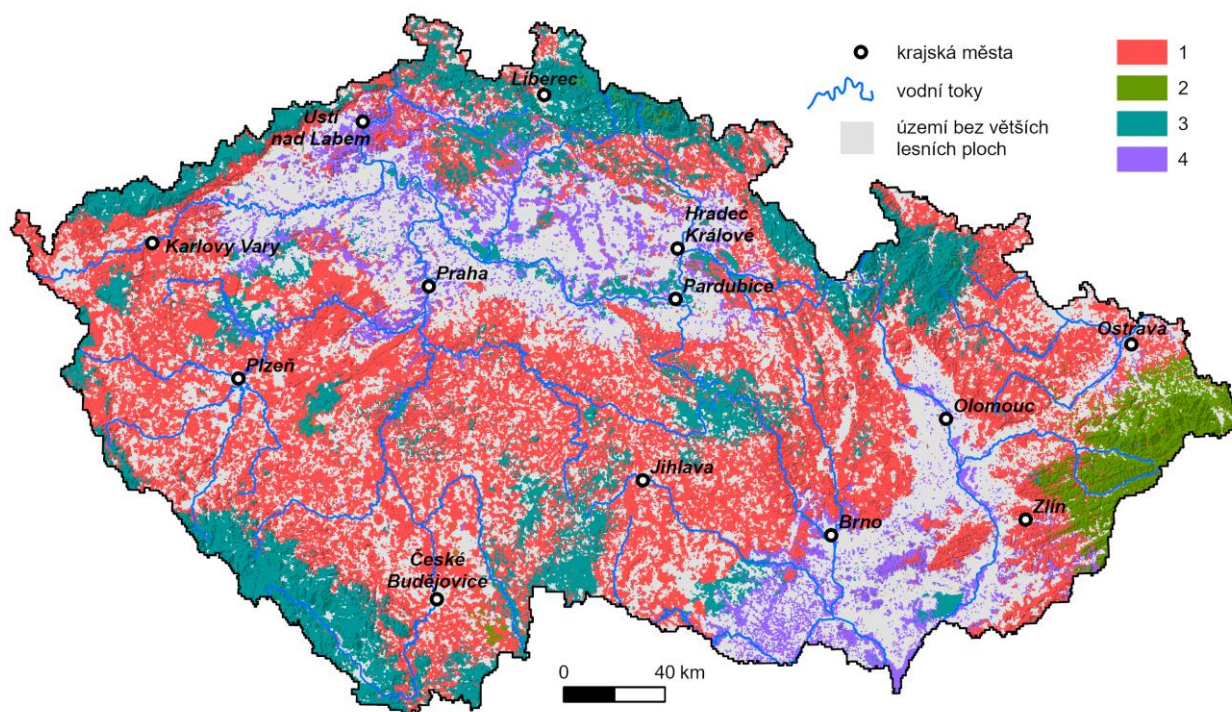
fosforu, tedy vysoký poměr N: P_{ex} (medián = 223). Hlubší minerální půdy tedy mají vyšší obsah kationtů, ale nízký obsah fosforu.

Třída 3: Půdy na rozloze 7999 km², 31 % rozlohy lesů. Půdy s kyselým pH (medián = 4.8), nízkým obsahem bází (medián = 16 meq/kg) a nízkou bazickou saturací (medián = 30%). Poměr C:N je relativně vysoký (medián C:N = 17), pravděpodobně v důsledku výskytu spodických horizontů. Jedná se o půdy kyselé, velmi citlivé k acidifikaci.

Třída 4: Půdy na rozloze 2038 km², 7.9 % rozlohy lesů. Půdy neutrální až slabě kyselé, s vysokým obsahem bází a vysokou bazickou saturací (medián = 89 %). Půdy mají vyrovnaný C:N:P poměr.



Obrázek 25. Zjednodušená charakterizace Tříd v minerálním 30-80 cm horizontu na základě acido-bazických a stechiometrických vlastností.



Obrázek 26. Mapa jednotlivých Tříd (1-4) v horizontu 30-80 cm lesních půd.

6. Rajonizace lesních půd

Výsledný návrh rajonizace lesních půd vychází z kombinace charakteristik půdního chemismu v jednotlivých půdních horizontech (Třídy 1-4 pro horizonty FH, 0-30 cm a 30-80 cm) (Obrázek 27). Výsledná rajonizace dělí lesy do šesti Skupin Lesních Půd (SLP) – A, B, C, E, O a M (Obrázek 28).

Skupina A: Tato skupina vznikla protnutím Třídy 4 FH horizontu, Třídy 3 horizontu 0-30 cm a Třídy 3 horizontu 30-80 cm. Zaujímá 2619 km², 10.2 % lesní půdy (Obrázek 28). Tyto půdy se vyznačují vysokým rizikem vyplavování dusičnanů (nízký C/N poměr, relativně nízká dostupnost P v FH horizontu), a vysokou aciditou svrchního i spodního minerálního horizontu. V rámci všech skupin jsou tyto půdy charakteristické nízkou bazickou saturací (Obrázek 29). Skupina A reprezentuje **PŮDY EXTRÉMNĚ KYSELÉ, S NÍZKOU RETENCÍ N**.

Skupina B: Tato skupina vznikla protnutím Třídy 4 FH horizontu, Třídy 3 a 4 horizontu 0-30 cm a Třídy 2 a 3 horizontu 30-80 cm. Zaujímá 2062 km², 8 % lesní půdy (Obrázek 28). Podobně jako u Skupiny A se jedná o půdy náchylné k vyplavování dusičnanů (nízký C/N poměr, relativně nízká dostupnost P v FH horizontu), zároveň ale již méně kyselé v minerální půdě (Obrázek 29). Skupina B reprezentuje **PŮDY KYSELÉ, S NÍZKOU RETENCÍ N**.

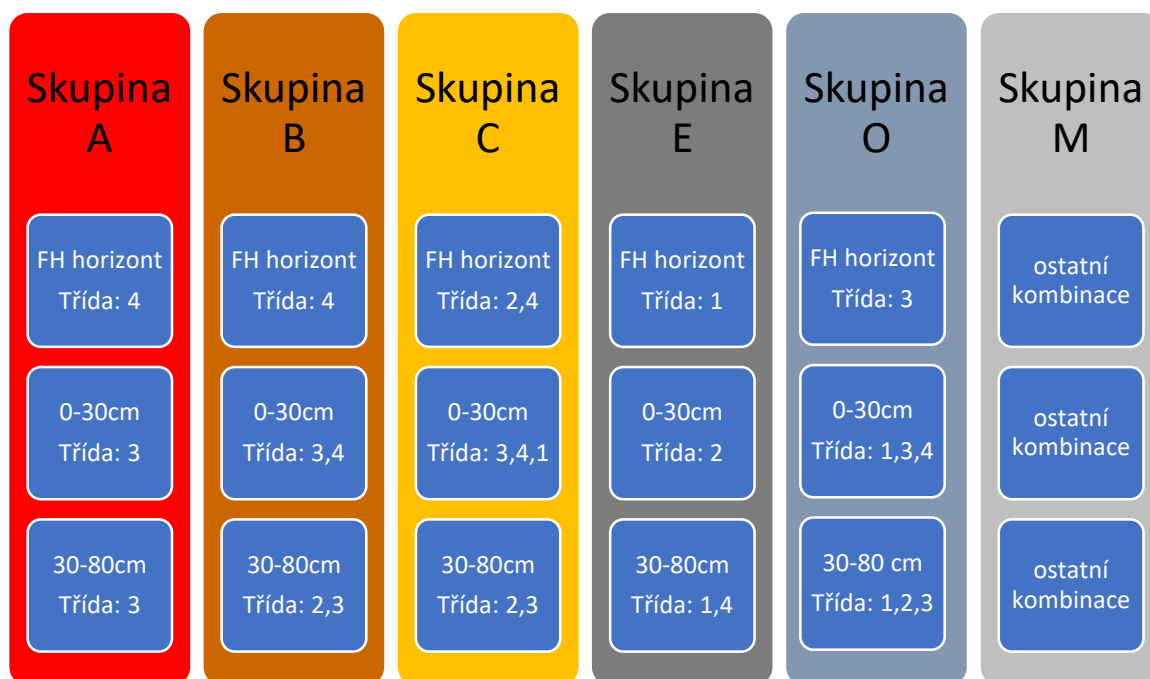
Skupina C: Tato skupina vznikla protnutím Třídy 4 a 2 FH horizontu, Třídy 1, 3 a 4 horizontu 0-30 cm a Třídy 2 a 3 horizontu 30-80 cm. Zaujímá 4240 km², 16.5 % lesní půdy. Tato Skupina zahrnuje lesní půdy s nízkým rizikem vyplavování dusičnanů (vyšší C/N poměr, relativně vyšší dostupnost P v FH

horizontu), s půdami okyselenými v 0-30 cm a zároveň i v hlubším minerálním horizontu (podobně jako u Skupiny B). Půdy spíše azonálního charakteru (Obrázek 28). Skupina C reprezentuje **PŮDY KYSELÉ, S RELATIVNĚ VYSOKOU RETENCÍ N**.

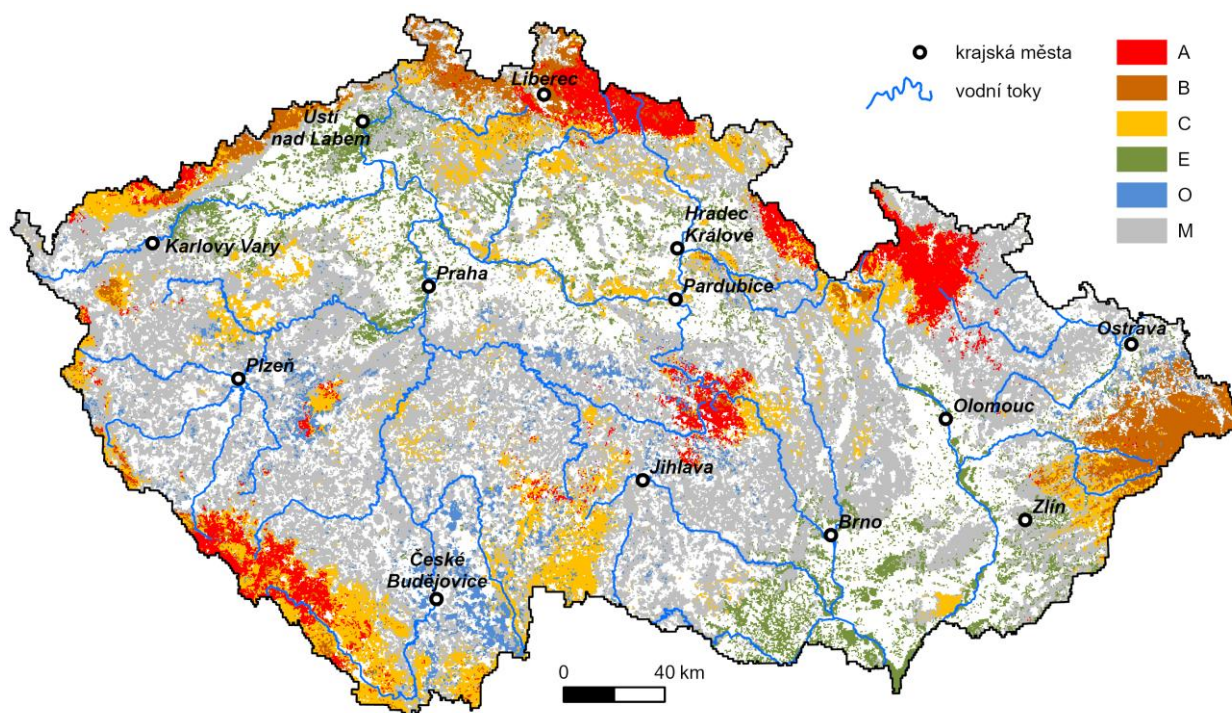
Skupina E. Tato skupina vznikla protnutím Třídy 1 FH horizontu, Třídy 2 horizontu 0-30 cm a Třídy 1 a 4 horizontu 30-80 cm. Zaujímá 1409 km², 5.5 % lesní půdy (Obrázek 28). Jedná se o půdy neutrální, popř. slabě kyselé s vysokým obsahem bází, nízkou aciditou a vysokou bazickou saturací v celém půdním profilu (Obrázek 29). Zároveň tyto půdy mají vysokou dostupnost N a P (nízký C/N a N/P_{ex} poměr v FH horizontu). Jedná se převážně o půdy nížinné, popř. o půdy vzniklé na alkalických horninách (třetihorní vulkanity či sedimenty s vysokým obsahem CaCO₃). Skupina E reprezentuje **PŮDY NEUTRÁLNÍ AŽ SLABĚ KYSELÉ, S VYSOKOU DOSTUPNOSTÍ ŽIVIN (EUTROFNÍ)**.

Skupina O. Tato skupina vznikla protnutím Třídy 3 FH horizontu, Třídy 1,3,4 horizontu 0-30 cm a všech Tříd horizontu 30-80 cm. Zaujímá 1104 km², 4.3 % lesní půdy (Obrázek 28). Jedná se především o půdy chudé na dusík a přístupný fosfor v FH horizontu (Obrázek 29). Skupina O reprezentuje **PŮDY OLIGOTROFNÍ, S NÍZKOU DOSTUPNOSTÍ DUSÍKU A FOSFORU**.

Skupina M. Tato skupina reprezentuje lesní půdy mimo výše uvedené kategorie. Zaujímá 14258 km², 55 % lesní půdy (Obrázek 28). Jedná se o půdy převážně mezotrofní, s vyváženým poměrem C:N:P. Minerální půda je slabě až středně kyselá (Obrázek 29). Skupina M reprezentuje **PŮDY SLABĚ KYSELÉ AŽ KYSELÉ**.

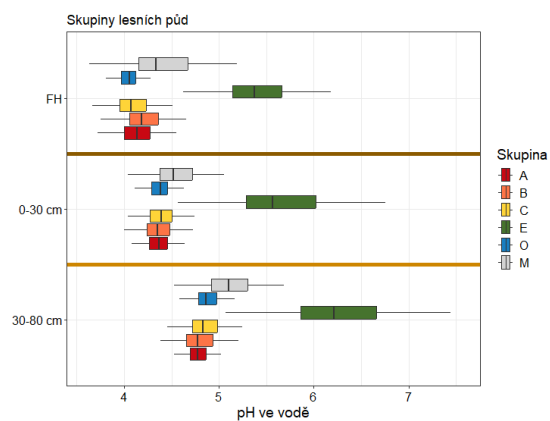


Obrázek 27. Diagram metody rozdělení lesních půd do šesti Skupin na základě protnutí jednotlivých tříd pro tři horizonty lesních půd.

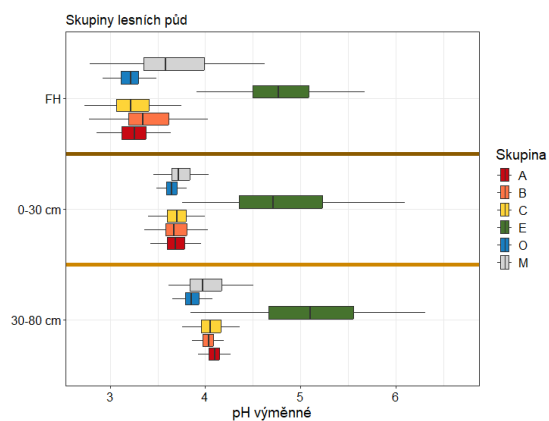


Obrázek 28. Mapa Rajonizace lesních půd – Skupiny lesních půd (SLP).

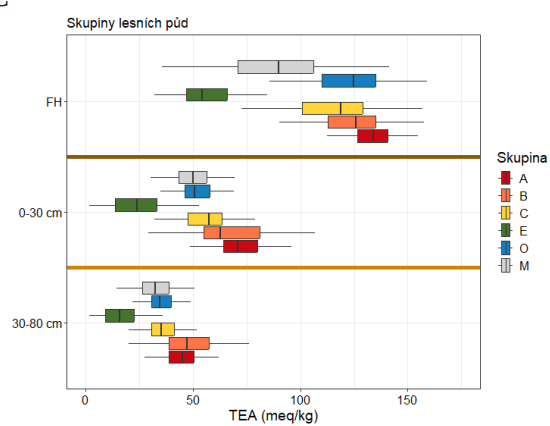
A



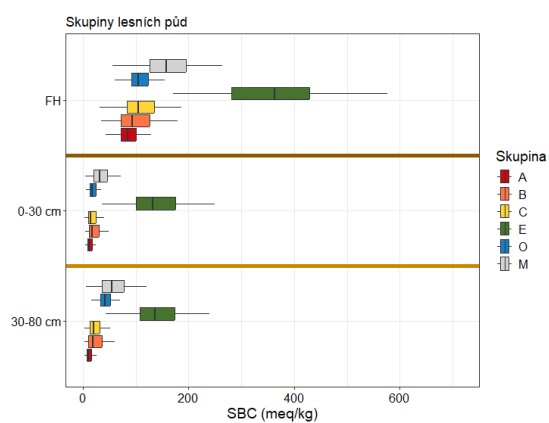
B



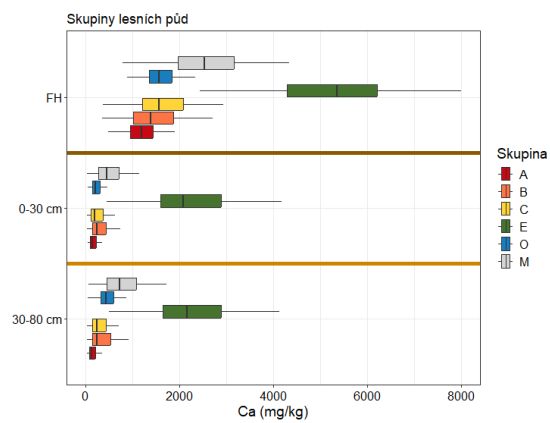
C



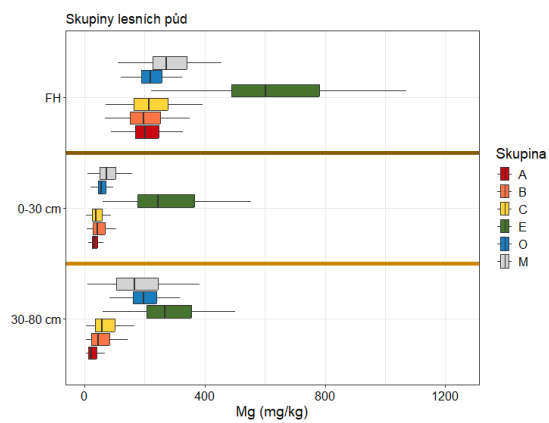
D



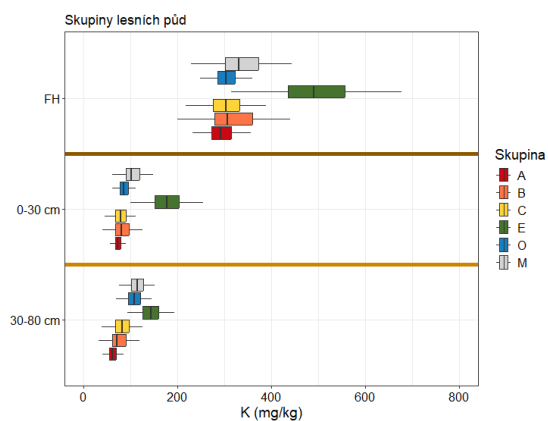
E



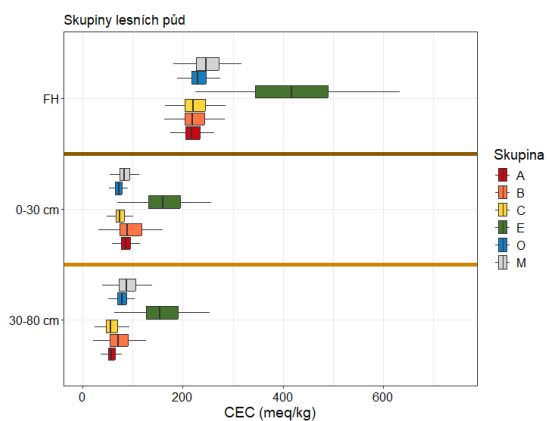
F



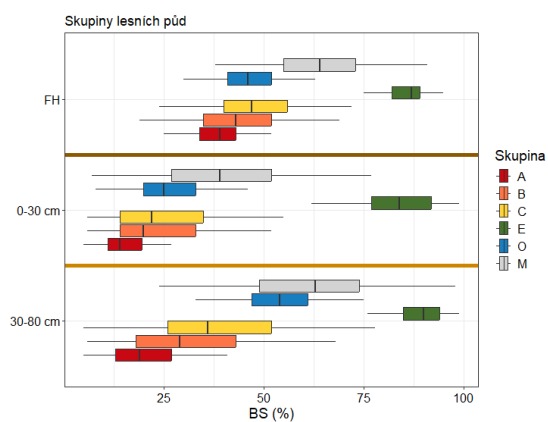
G



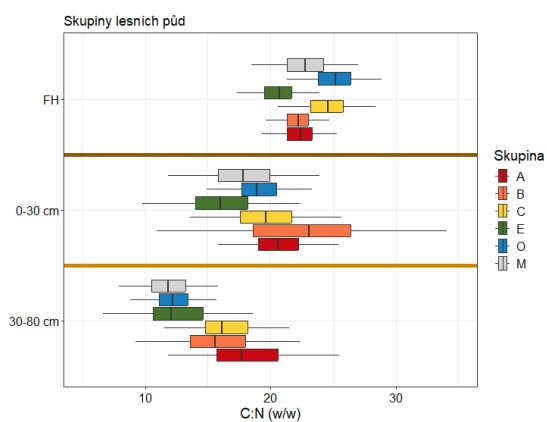
H



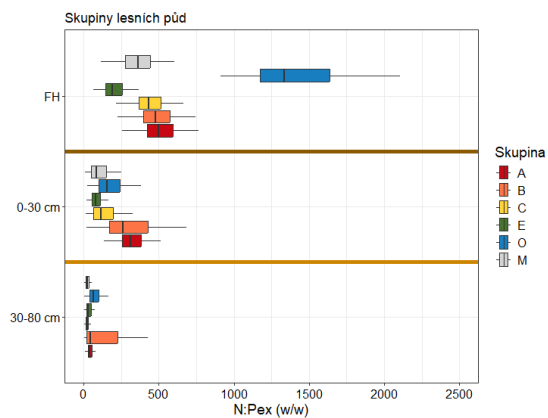
I



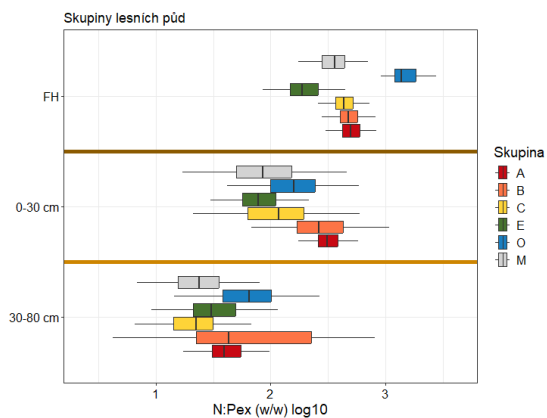
J



K



L



Obrázek 29. Krabicové grafy půdního chemismu pro jednotlivé SLP (skupiny lesních půd). Krabicový graf je omezen 25th a 75th percentilem (kvartily), s mediánovou hodnotou. Horizontální čáry reprezentují $1 * IQR$ (kde IQR je mezikvartilové rozpětí neboli vzdálenost mezi prvním a třetím kvantilem).

7. Literatura

Chuman, Tomáš, Pavla Gürtlerová, Jakub Hruška a Marie Adamová, 2014. Geochemical reactivity of rocks of the Czech Republic. *Journal of Maps* [online]. B.m.: Taylor & Francis, 10(2), 341–349 [vid. 2024-12-04]. ISSN 17445647. Dostupné z: doi:10.1080/17445647.2013.867418

Neudertová Hellebrandová, Kateřina, Věra Fadrhonsová a Vít Šrámek, 2024. Aggregated database of forest soil chemical properties in the Czech Republic based on surveys from 2000 to 2020. *Annals of Forest Science* [online]. B.m.: Springer-Verlag Italia s.r.l., 81(1), 1–11 [vid. 2024-12-04]. ISSN 1297966X. Dostupné z: doi:10.1186/S13595-024-01225-Y/TABLES/8

Oulehle, Filip, Tomáš Chuman a Jan Svoboda, 2022. *Depozice dusíku a síry na území ČR mezi lety 1950 a 2020 a překročení jejich kritických zátěží pro lesní ekosystémy.*

Oulehle, Filip, Christine L Goodale, Christopher D Evans, Tomáš Chuman, Jakub Hruška, Pavel Krám, Tomáš Navrátil, Miroslav Tesař, Alexandr AČ, Otmar Urban a Karolina Tahovská, 2021. Dissolved and gaseous nitrogen losses in forests controlled by soil nutrient stoichiometry. *Environmental Research Letters* [online]. 16(6), 064025 [vid. 2021-07-22]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/ac007b

Tahovská, Karolina, Eva Kaštovská, Michal Choma, Petr Čapek, Jiří Bárta a Filip Oulehle, 2023. Ammonia oxidation and nitrate reduction marker genes are key indicators of nitrogen losses in temperate forest catchments. *Environmental Microbiology* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 25(10), 2049–2053 [vid. 2024-12-04]. ISSN 1462-2920. Dostupné z: doi:10.1111/1462-2920.16441

Příloha 1

