

Prostorová závislost bazické saturace na zrnitostním a chemickém složení lesních půd v individuálním nebo typologickém členění

PAVEL SAMEC^{1,2}, ANNA TIŠLEROVÁ³, MATĚJ HORÁČEK¹,
GABRIELA TOMÁŠOVÁ¹, MILOŠ KUČERA⁴

¹ Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav geologie a pedologie, Brno, Česko (Mendel University in Brno, Faculty of Forestry and Wood Technology, Department of Geology and Soil Science, Brno, Czechia); e-mail: pavel.samec@mendelu.cz, matej.horacek@mendelu.cz, gabriela.tomasova@mendelu.cz

² Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Brno, Česko (Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences, Brno, Czechia)

³ Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky, Česko (Mendel University in Brno, Faculty of Forestry and Wood Technology, Department of Forest Management and Applied Geoinformatics, Brno, Czechia); xtislero@mendelu.cz

⁴ Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, Česko (Forest Management Institute Brandýs nad Labem, Czechia); Kucera.Milos@uhul.cz

ABSTRACT **The spatial dependence of base saturation on forest soil grain and chemical composition seen through individual and typological divisions** – Soil base saturation is a physicochemical property used for classifying terrestrial ecosystems. In this study, we focused on a comparison of soil base saturation and spatially related soil physical and chemical properties between individual and typological forest divisions. The dependence of soil base saturation on physical and other chemical properties was obtained through geographically weighted regression. Both soil properties and regression characteristics were divided along soil regions and associations. The similarities of soil properties between individual and typological soil division systems were assessed through quantiles from spatial models by two-tailed *t*-tests and simple linear regressions. Independent variables characterized 26–91% of soil base saturation variance, with mean geographically weighted determination coefficients (R^2) between soil regions varying from 0.40 to 0.86, and between soil associations from 0.55 to 0.83. Low significant ($p < 0.5$) differences in distributions of soil base saturation predominated in both individual and typological systems. Only loam content, P_2O_5 and pH showed unique regional effects on soil base saturation.

KEY WORDS soil sorption complex – phosphorus – forest growth conditions – geographical division – spatial regression

SAMEC, P., TIŠLEROVÁ, A., HORÁČEK, M., TOMÁŠOVÁ, G., KUČERA, M. (2023): Prostorová závislost bazické saturace na zrnitostním a chemickém složení lesních půd v individuálním nebo typologickém členění. *Geografie*, 128, 4, 437–457.

<https://doi.org/10.37040/geografie.2023.019>

Do redakce došlo v lednu 2023, přijato do tisku v září 2023.

1. Úvod a problematika

Půdní sorpce udržuje úživnost stanoviště (White 1987). Prostorová souvislost úživnosti lesních půd a členitosti půdního krytu spoluvytváří růstové podmínky lesů. Prostorové rozdíly ve vztazích mezi půdním krytem a sorpcí lesních půd slouží k rozlišení různé citlivosti růstových podmínek lesů vůči environmentálním nebo hospodářským změnám (Zhu, Moore, Burt. 2010). Nicméně prostorové vztahy půdního prostředí se sorpčními vlastnostmi v různých systémech členění růstových podmínek lesů nebyly dosud podrobně prozkoumány (Galvão a kol. 2008, Fleck a kol. 2016, Heitcamp a kol. 2020). Prostorový vztah půdní sorpce a ostatních půdních vlastností je mezi různými oblastmi půdního krytu až protichůdný (cf. Cronan, Grigal 1995; Caravaca, Lax, Albaladejo 1999; Skinner a kol. 2001). Prostorové rozdíly mezi sorpcí a ostatními vlastnostmi lesních půd jsou podmíněny podílem organické hmoty a minerálních zvětralin (Selige, Böhner, Schmidhalter 2006). Protichůdné rozdíly mezi jednotlivými oblastmi půdního krytu jsou podmíněny různými vazbami půdních vlastností s podložím a reliéfem (Ross, Matschonat, Skyllberg 2008).

Sorpční vlastnosti udržují půdní úživnost pomocí fyzikálně-chemických procesů výměny kationtů přirozeně uvolňovaných zvětráváním mezi koloidními částicemi (cca < 2 mm velkými) a půdním roztokem. Půdní roztok, koloidní částice a výměnné kationty dohromady tvoří půdní sorpční komplex. Zatímco roztok a koloidy představují aktivní část sorpčního komplexu, výměnné kationty představují pasivní část. Výměnné kationty průměrně zahrnují necelá 2 % z celkového obsahu půdních makrobiogenních látek (Szopka a kol. 2010). Koloidní částice jsou nejvíce tvořeny drobnými minerálními zvětralinami, k nimž se při tvorbě půdy přidružují organické částice z rozkladu odumřelé organické hmoty nebo bakterie. Kationty jsou zadržovány na povrchích koloidů díky převážně zápornému náboji jako důsledku zbytkové energie ze zvětrávání. Poutané kationty jsou z koloidních částic vytěsňovány jen působením jiných kationtů (Goldberg, Lebron, Svarež 2000). Zatímco povrchový náboj minerálních koloidů je stálý, náboj organických koloidů je proměnlivý. Přesto přítomnost organických koloidů výrazně zvyšuje sorpční schopnosti půd (Jiang a kol. 2018). Nicméně hodnocení půdní úživnosti je standardně zaměřeno jen na kationtovou výměnnou kapacitu a bazickou saturaci.

Kationtová výměnná kapacita společně s bazickou saturací poukazuje na stálost půdní úživnosti. Kationtová výměnná kapacita je součet koncentrací výměnných kationtů v sorpčním komplexu půdy. Bazická saturace je podíl bazicky působících kationtů z celkové kationtové výměnné kapacity. Kationtová výměnná kapacita může nabývat vysokých hodnot jak v chudých, tak v živných půdách v závislosti na převaze buď kyselinotvorných, nebo alkalických kationtů (Sumner, Miller 1996). Naproti tomu vysoká bazická saturace se zpravidla vyskytuje jen v živných půdách. Pouze společný výskyt vysoké bazické saturace a nízké kationtové

výměnné kapacity předjímá chudou půdu s vyrovnaným poměrem nízkých koncentrací kyselých i alkalických látek (Ross, Matschonat, Skjallberg 2008). Proto společné hodnocení půdní kationtové výměnné kapacity a bazické saturace naznačuje odolnost půdy vůči okyselujícím látkám. Odolnost půdy proti okyselení spočívá v neutralizaci kyselých vstupů rozpouštěním hydroxidů železa nebo hliníku, slabých organických kyselin až hydrogenuhličitanů v závislosti na pH (Cosby a kol. 2001).

Charakter vztahů mezi půdní kationtovou výměnnou kapacitou a bazickou saturací tlumící okyselení se liší mezi různými stanovišti. Obzvláště lesní půdy jsou charakteristické převahou mnoha maloplošně rozšířených typů stanovišť, které způsobují výrazné porušení normality v rozdělení hodnot fyzikálně-chemických vlastností. Převaha maloplošných typů stanovišť způsobuje, že klasifikace průměrných půdních vlastností neodpovídá charakteru nejvíce zastoupeného stanoviště uvnitř rámce růstových podmínek. Zkreslující dopady porušené normality na ekologickou půdní klasifikaci jsou částečně eliminovatelné zohledněním typologického členění růstových podmínek lesů (Samec 2009). Diferenciace rámcových růstových podmínek lesů závisí sestupně na trofické, hydrické a výškové expozici. Trofická expozice rozčleňuje lesní typy s širokými intervaly fyzikálně-chemických půdních vlastností od typů s úzkými intervaly půdních vlastností. Hydrická expozice rozčleňuje vysychavé od hydricky normálních až zamokřených lesních typů. Výšková expozice vymezuje úživnost lesních stanovišť nejméně, přesto se jeví výraznější než horizontální poloha (Samec 2014).

Rozdíly mezi prostorovými rámci růstových podmínek lesů naznačují závislost na lokální proměnlivosti půdní sorpce. Prostorové rozdělení sorpce lesních půd je přirozeně ovlivňováno rozptylem půdních vlastností a geografickou členitostí růstových podmínek lesů (Šrámek et al. 2013). Prostorová analýza půdních vlastností je zpravidla orientována na modelování obsahu organických látek nebo minerálních živin (Finke a kol. 2013, Shi a kol. 2015). Výhodou prostorové analýzy jsou přesnější výsledky získávané díky zohlednění lokálních vlivů elementárních půdních vlastností na sorpci. Naopak výhodou jednoduššího globálního modelování je odhad výskytu hodnot půdních vlastností v územních rámcích bez ohledu na četnost jejich vzorkování (Meersmans a kol. 2008). Nicméně globální modelování snižuje přesnost odhadu vztahů lokálně proměnlivých půdních vlastností až o 45 % směrodatné odchylky (Laffan, Lees 2004). Prostorová závislost půdních vlastností na systémech geografického členění lesů spočívá ve vztahu s lokální pestrostí půdních podmínek a nevyžaduje zobecnění (Ibáñez, Krasilnikov, Saldaña 2012).

Cílem naší studie bylo porovnání vlivů individuálního nebo typologického členění na odhad sorpčních vlastností lesních půd. Geografická členitost rozděluje půdní vlastnosti, takže v jednotlivých lesních oblastech odlišně ovlivňují fyzikálně-chemickou sorpci (Shi a kol. 2015). Prostorové závislosti bazické saturace se

lokálně liší více než závislosti kationtové výměnné kapacity. Významnější závislosti bazické saturace byly podmíněny symetričtějším rozdělením hodnot. Ačkoli půdní vlastnosti ovlivnily prostorové rozdělení sorpce více než reliéf, nadmořská výška jejich vlivy zvyrazňuje (Samec 2020). Z těchto důvodů bylo porovnání prostorových závislostí sorpce lesních půd soustředěno na vyhodnocení bazické saturace z korelací s vlastnostmi půdního prostředí a nadmořské výšky. Porovnání půdní sorpce mezi různými způsoby geografického členění nabízí podklady k posuzování prostorové proměnlivosti v úživnosti lesů (Skinner a kol. 2001; Seybold, Grossman, Reinsch 2005; Ross, Matschonat, Skyllberg 2008).

2. Materiál a metodika

2.1. Data

2.1.1. Bodové pole

Prostorové odhady bazické saturace byly odvozeny pomocí geograficky vážené regrese vlastností lesních půd, rozděleny mezi systémy členění půdního krytu a lineárně srovnány (Gollini et al. 2015). Regrese zahrnuje nepravidelné bodové pole poloprovozních průzkumů lesních půd v Česku (26 900 km²; 145–1 547 m n. m.). Bodové pole sestávalo z 22 014 sond v maticích oblastních plánů rozvoje lesů (1953–2000) a dvou cyklů inventarizace (2001–2015) spravovaných Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (Samec a kol. 2017). Sled horizontů v každé půdní sondě byl zúžen na diagnostický (B v hloubkách > 30 cm) nebo v případě absence na svrchní (A v hloubkách ≤ 30 cm).

Geograficky vážená regrese byla optimalizována z nejvýznamněji korelujících obsahů zrnitostních frakcí písku (0,1–2,0 mm), prášku (0,05–0,1 mm), prachu (0,01–0,05 mm) a jílu (< 0,002 mm), chemických vlastností pH/H₂O, obsahu organického uhlíku (C_{org}), celkových obsahů Al₂O₃, CaO, MgO a P₂O₅ a nadmořské výšky (Samec, Mikita, Bajer 2019). Bazická saturace byla zjištěna z poměru mezi obsahem výměnných bazí a potenciální kationtové výměnné kapacity. Kationtová výměnná kapacita byla stanovena jako součet koncentrací výměnných kationtů vytěšňovaných ze sorpčního komplexu do roku 2000 pomocí extrakce NH₄OAc při pH 7,0 (Blakemore, Metson 1960), zatímco později z extrakce v BaCl₂ při pH 7,8 (Jankovská, Štěrba 2007). Půdní reakce byla zjišťována acidometricky v souladu s vyhláškou MZe ČR 275/1998 Sb. Zrnitost byla do roku 1983 zjišťována pipetovací metodou, později sedimentograficky (Galehouse 1971). C_{org} byl do roku 1982 stanovován oxidačně-titrační metodou (Walkey, Black 1934), mezi lety 1983–2000 byl stanovován podle Nelsona a Sommerse (1982) a později instrumentálně podle ISO 10694. N_{tot} byl do roku 2000 stanovován Kjeldalzací (Houba a kol. 1989), později

Dumasovou metodou (Zbíral a kol. 2004). Obsahy celkových živin byly odhadnuty z extrakce v 20% HCl (Hraško a kol. 1962).

Nadmořská výška byla u hodnocených půdních sond zjištěna průnikem geografické polohy s digitálním modelem terénu v rozlišení 10×10 m ze základní báze geografických dat Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (Samec 2020).

2.1.2. Polygonové vrstvy

Rozdělení sond do systémů členění půdního krytu bylo provedeno pomocí průníků s polygony individuálních půdních regionů (pedoregionů) a typologických asociací. Obě polygonové vrstvy členění lesních půd byly pořízeny v rozlišení 1 : 500 000. Pedoregiony byly vymezeny podél neopakovatelných kombinací geomorfologických celků a půdotvorných substrátů. Území Česka zahrnuje celkem 339 pedoregionů uspořádaných do 13 katén podél rozdílů v topografii (Němeček, Tomášek 1983).

Naproti tomu půdní asociace jsou opakovatelná uspořádání matrice hlavní půdní jednotky a plošek doprovodných nebo doplňkových půdních jednotek na charakteristických půdotvorných substrátech. Hlavní půdní jednotky pokrývají nejméně 70 % přirozeně ohraničeného území. Doprovodné půdní jednotky pokrývají nesouvisle 10–30 % z matrice. Doplňkové půdní jednotky pokrývají nesouvisle < 10 % matrice (Sedláček a kol. 2009). Česko je pokryto 55 typy půdních asociací, z nichž se dva vyskytují výhradně mimo lesní půdy a naopak 6 téměř výhradně v lesích. Asociace smonic a černic modálních až fluvizemí se vyskytují výhradně na zemědělských pozemcích, naopak asociace organozemí, glejů a většina podzolů se vyskytují pouze v lesích (Macků, Homolová 2007).

2.2. Statistické zpracování

Rozdělení geograficky váženého regresního modelu bazické saturace do pedoregionů nebo půdních asociací bylo srovnáno pomocí zastoupení klasifikovaných intervalů průměrných hodnot a testování kvantilů. Normalita vstupních dat byla posouzena z testu šikmosti (A_1) špičatosti (E_1) (Zar 2010). Geograficky vážená regrese byla optimalizována v mnohonásobném modelu při $p < 0,05$:

$$BS_m = \beta_{m0} + \sum_{k=1}^q \beta_{mk} \cdot x_{mk} + \epsilon_m$$

kde BS_m je závislá bazická saturace v místě půdní sondy m , q je počet nezávislých půdních vlastností, k je pořadí nezávisle proměnných, x_{mk} je hodnota k -té půdní vlastnosti v místě m , β_{m0} je absolutní člen v místě m , β_{mk} je lokální sklon funkce

k -té půdní vlastnosti a ϵ_m je náhodná chyba v místě m . Parametry β byly váženy pomocí Gaussovy jádrové funkce doporučené pro modelování růstových podmínek lesů při statistické inventarizaci (Quirós-Segoria, Condéz Ruiz, Drápela 2016):

$$w_{ij} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij}}{b} \right)^2}$$

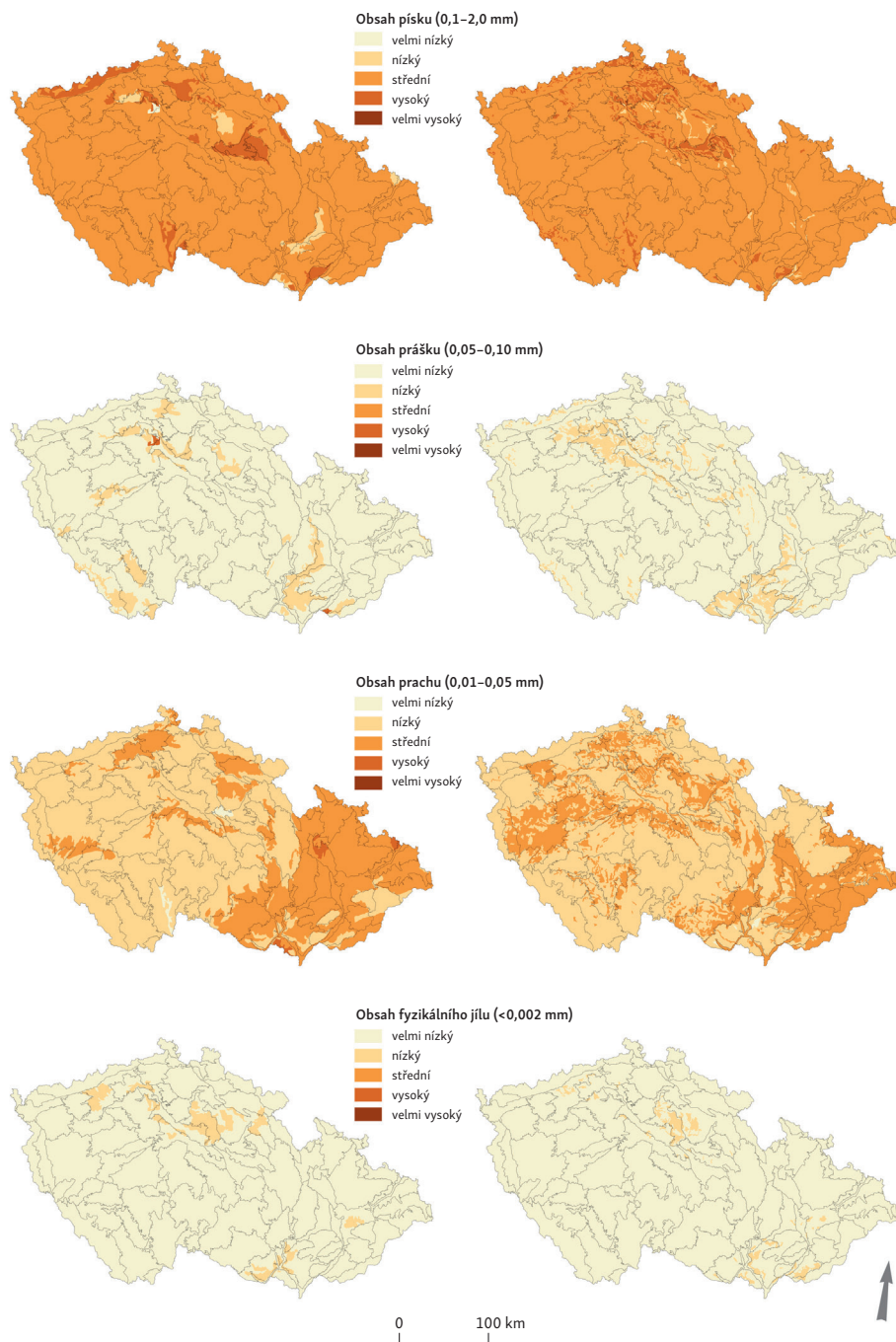
kde d_{ij} je vzdálenost mezi místy i a j a b adaptativní kvantil odpovídající počtu zahrnutých míst m podle cross-validačního skóre (Bowman 1984). Geograficky vážený model byl vypočítán v programu R (R Core Team 2022) pomocí balíčku *spgwr* (Bivand, Yu 2017).

Zrnitostní frakce byly hodnoceny v pravidelných intervalech podle kritérií Likertova škálování (obr. 1, Finstad 2010). Půdní reakce, obsahy živin a bazická saturace byly klasifikovány podle EMEP-LRTAP (obr. 2, 3). Prostorově vážené koeficienty determinace (R^2) $< 0,50$ byly vyhodnoceny jako slabě významné. $R^2 \geq 0,50$ byly klasifikovány do tří stejně četných intervalů mírné, střední a silné významnosti. Střední standardní chyby byly vypočítány průměry ze směrodatných odchylek při modelování bazické saturace v okolí každé půdní sondy do vzdálenosti d_{ij} . Střední standardní chyba byla klasifikována do pěti rovnoměrných intervalů. Půdní vlastnosti ze sond stejně jako regresní charakteristiky R^2 a střední standardní chyby byly zobrazeny jako klasifikace průměrných hodnot v polygonech obou soustav geografického členění lesních půd.

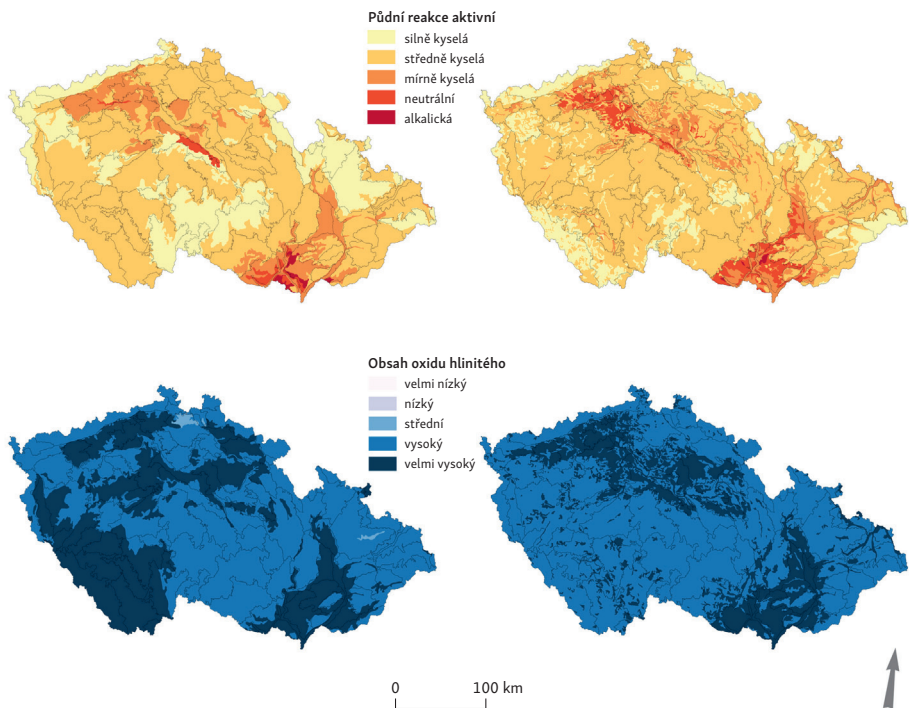
Systémy členění půdního krytu byly srovnány pomocí dvouvýběrových t -testů mezi kvantily minimch (1. kvartilů), průměrů, mediánů (3. kvartilů), průměrů \pm směrodatných odchylek, medianů \pm 25% posunů (2. a 4. kvartilů) a maxim (5. kvartilů) jednotlivých vlastností z polygonů individuálních nebo typologických jednotek. Vybrané kvantily byly srovnávány v tabulkovém procesoru MS Excel. Ověřována byla hypotéza o podobnosti půdních vlastností mezi odlišnými systémy členění růstových podmínek. Předpoklad homogenního rozptylu mezi srovnávanými množinami kvartilů byl ověřen pomocí Fischer-Snedecorova F -testu (Lepš, Šmilauer 2016). Míra podobnosti půdních vlastností mezi různými geografickými systémy byla srovnána pomocí lineární regrese a Akaikeho informačního kritéria (AIC). Na základě jednoduché lineární regrese byly půdní vlastnosti vyhodnoceny jako významně podobné při $p < 0,05$, jako mírně podobné při $p < 0,25$ a jako odlišné při $p < 0,5$.

3. Výsledky

Zastoupení hodnot vlastností lesních půd mezi pedogeografickými regiony a asociacemi jsou jen zdánlivě podobná. Příčinou rozdílných zastoupení hodnot půdních vlastností byla porušená normalita ovlivňující míru podobnosti mezi kvantily



Obr. 1 – Rozšíření obsahů zrnitostních frakcí v lesních půdách uvnitř pedoregiónů (vlevo) a půdních asociací (vpravo)

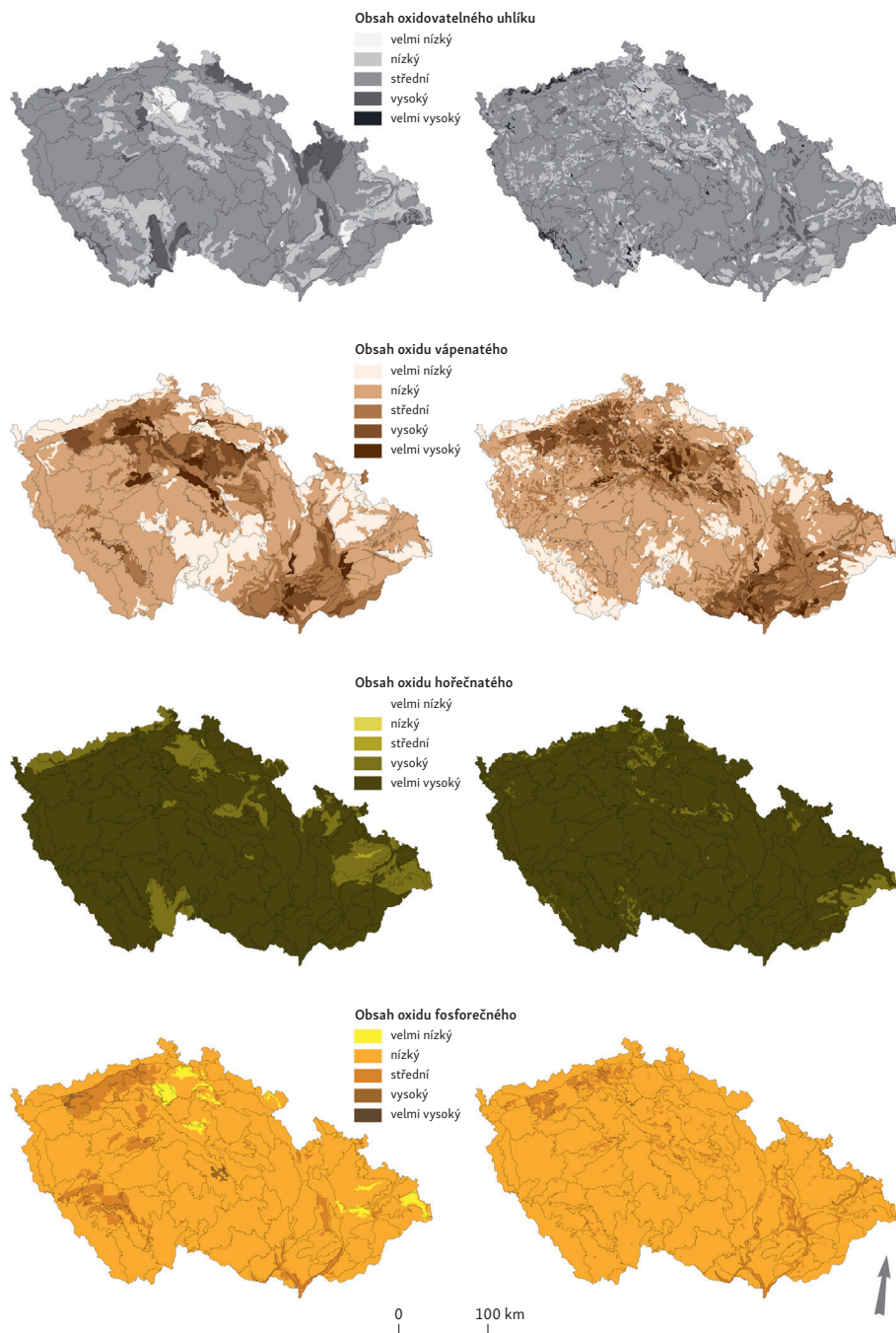


Obr. 2 – Rozšíření hodnot pH a obsahu Al_2O_3 v lesních půdách uvnitř pedoregionů (vlevo) a půdních asociací (vpravo)

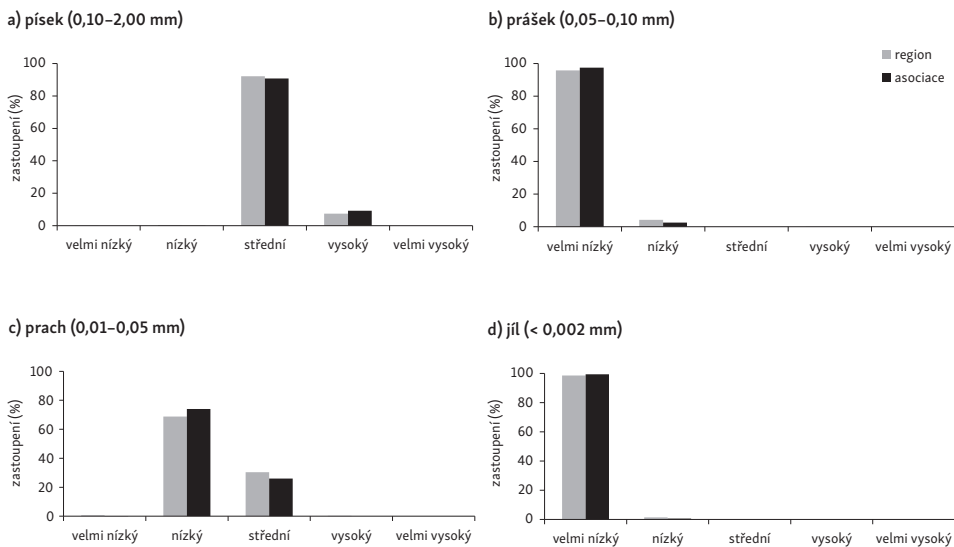
srovnávaných členění lesů. Na druhou stranu, oba způsoby členění lesních půd byly charakteristické vždy stejným nejčtenějším intervalem hodnot.

Půdní asociace se vyznačovaly převahou nejčtenějších intervalů jednotlivých vlastností výrazně více než pedoregiony. Naopak pedoregiony většinou zachytily širší intervaly hodnot vlastností lesních půd než asociace. Regionální zastoupení nejčtenějších intervalů hodnot přesahujících zastoupení v asociacích se vyskytovalo u středního obsahu písku, nízkého obsahu CaO a střední směrodatné chyby. Zastoupení frakcí písku, prášku a prachu stejně jako zastoupení obsahu Al_2O_3 , MgO a P_2O_5 byly širší v pedoregionech. Obsah jílu, pH a CaO byly stejně zastoupeny v pedoregionech jako v asociacích (obr. 4, 5). Prostorově vážený odhad půdní bazické saturace stejně jako jeho střední směrodatné chyby a prostorově vážený index determinace (GW-R^2) byly šířeji zachyceny prostřednictvím pedoregionů, i když nejčtenější intervaly mírně nenasycené bazické saturace a střední R^2 0,51–0,60 byly častěji zastoupeny v jednotlivých asociacích (obr. 6).

Půdní reakce, obsah uhlíku, CaO a bazická saturace byly zaznamenány v úplných intervalech hodnot. Jen úplné intervaly pH, CaO a bazické saturace byly



Obr. 3 – Rozšíření hodnot makrobiogenních látek v lesních půdách uvnitř pedoregionů (vlevo) a půdních asociací (vpravo)



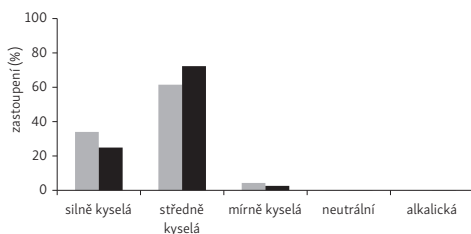
Obř. 4 – Srovnání mezi intervaly obsahů zrnitostních frakcí zastoupenými v pedoregionech a asociacích lesních půd

Tab. 1 – Statistické testy a jednoduchá lineární regrese prostorových modelů mezi individuálním a typologickým členěním lesních půd

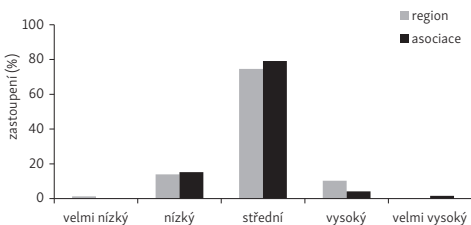
Vlastnost	A ₁	E ₁	F-test	t-test	AIC	r ²	b	a
Písek (%)	0.21	0.55	0.68	0.15	18.74	0.97	8.90	0.81
Prášek (%)	6.62	15.78	29.19	-0.75	5.85	0.75	10.12	0.16
Prach (%)	1.23	1.48	1.23	0.27	20.19	0.91	-3.95	1.06
Jíl (%)	3.16	2.31	0.85	-0.45	4.67	0.97	0.91	0.91
pH(H ₂ O) {-log[c(H ⁺)]}	3.08	2.04	1.16	-0.73	8.10	0.99	-0.19	1.07
C _{org} (%)	3.84	4.67	2.11	-0.52	7.45	1.00	-0.87	1.45
Al ₂ O ₃ (g/kg)	2.69	2.12	1.14	-0.57	18.72	0.97	0.99	1.05
CaO (g/kg)	4.76	6.87	2.40	-0.34	15.38	0.98	2.49	0.64
MgO (g/kg)	6.17	13.83	11.20	-0.63	5.69	0.86	4.11	0.28
P ₂ O ₅ (g/kg)	6.26	14.02	10.96	-1.31	8.19	0.93	0.54	0.29
Výška (m)	2.74	1.70	1.36	-0.11	54.64	0.99	-66.06	1.16
BS (%)	1.23	-0.35	0.74	-0.81	31.22	0.94	10.66	0.84
GWSE (%)	0.32	0.75	1.68	0.05	8.49	0.99	1.02	0.77
GW-R ² (1)	1.02	1.08	2.54	-0.09	10.35	0.90	0.28	0.59

Poznámky: A₁ – testové kritérium šikmosti; E₁ – testové kritérium špičatosti; F – Fischer-Snedecorův test; t – dvouvýběrový t-test (kurzivou významně porušená normalita při p < 0,05); AIC – Aikakeho informační kritérium; r² – jednoduchý koeficient determinace; b – absolutní člen; a – sklon.

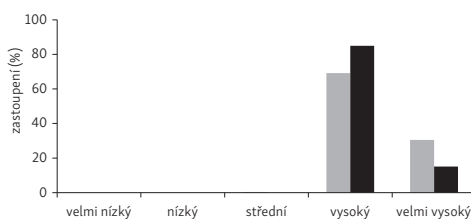
a) půdní reakce aktivní



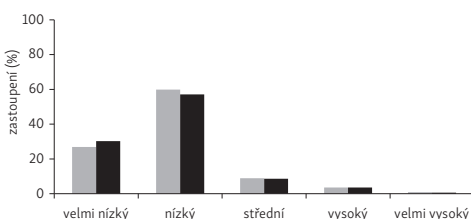
b) obsah oxidovatelného uhlíku



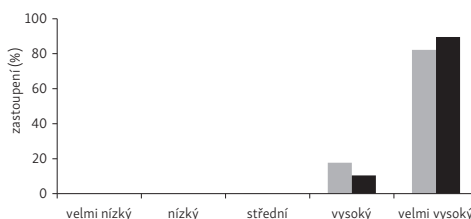
c) obsah oxidu hlinitého



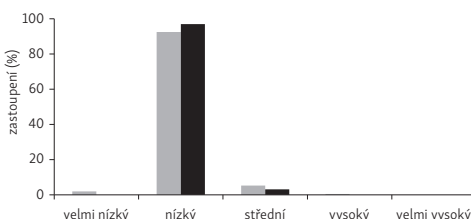
d) obsah oxidu vápenatého



d) obsah oxidu hořečnatého



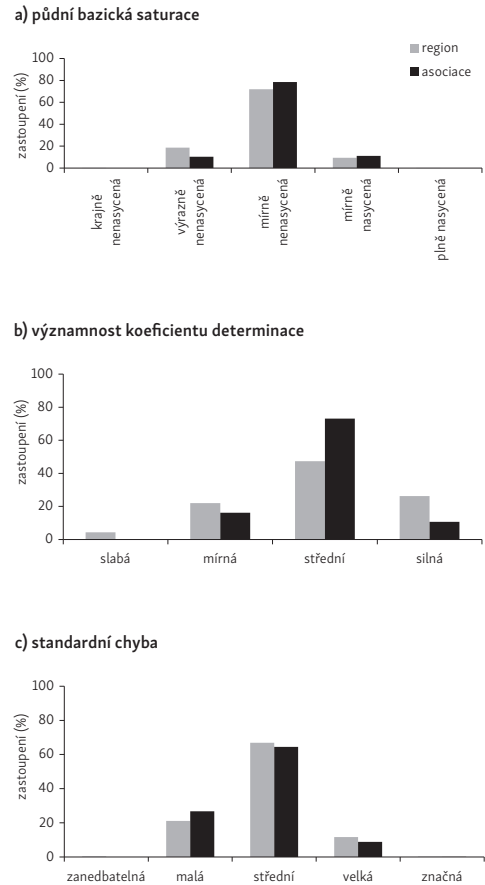
e) obsah oxidu fosforečného


Obr. 5 – Srovnání mezi intervaly pH a makrobiogenních látek zastoupenými v pedoregionech a asociacích lesních půd

zároveň zachyceny jak mezi pedoregiony, tak půdními asociacemi. Obsah C_{org} byl úplně rozvinut jen mezi půdními asociacemi. Častý výskyt širších intervalů hodnot půdních vlastností mezi pedoregiony ovlivnil i výskyt úplného intervalu R^2 a širšího intervalu střední směrodatné chyby. Ani nejužší intervaly půdních vlastností se shodně nevyskytovaly v obou členěních. Naopak úzké intervaly obsahů prášku, Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 a bazické saturace byly soustředěny mezi půdními asociacemi, kdežto obsah jílu byl podobně úzký v obou půdních členěních.

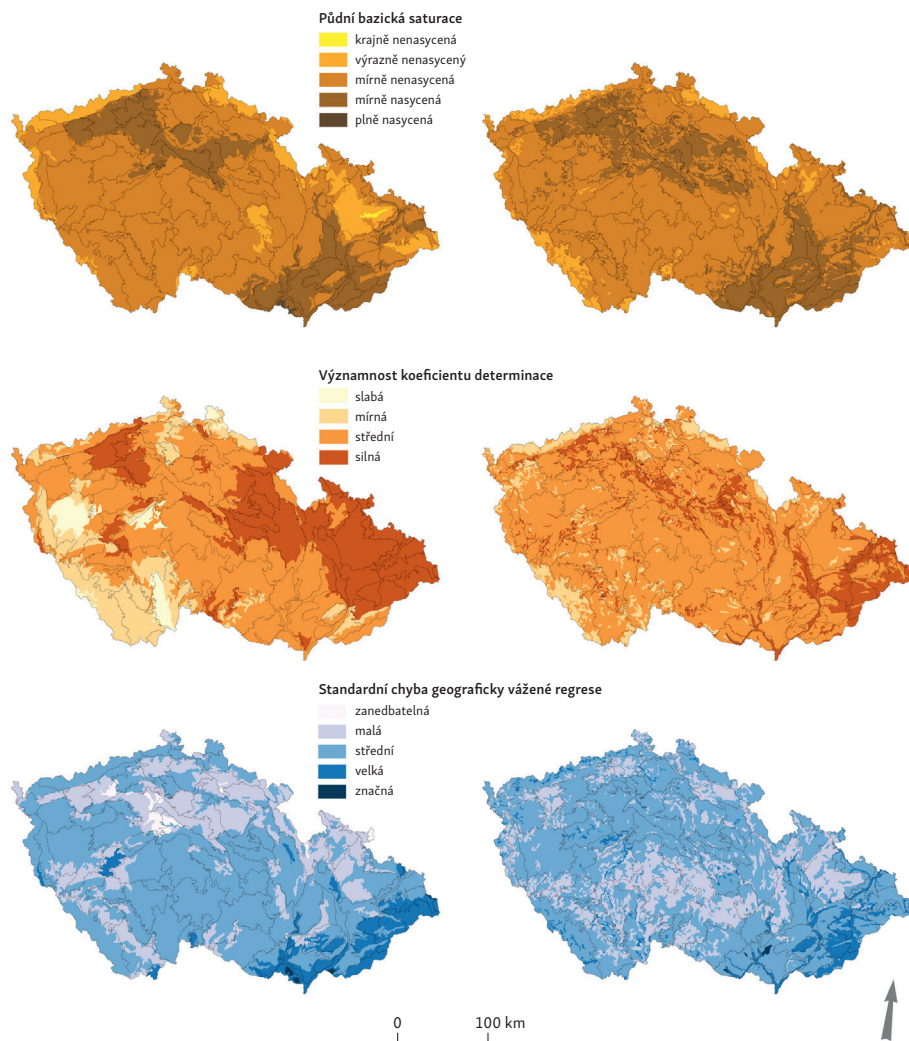
Normalita byla porušena u obsahů prášku, jílu, pH, všech makroprvků a nadmořské výšky. Obsahy prášku, jílu, MgO , P_2O_5 a bazické saturace se mezi srovnávanými členěními významně lišily různými rozptyly hodnot. Naproti tomu

Obr. 6 – Srovnání mezi intervaly modelované bazické saturace, indexy determinace a regresních chyb zastoupených v pedoregionech a asociacích lesních půd



rozptyly hodnot C_{org} a CaO se lišily mírně jako u střední směrodatné chyby a $GW-R^2$. Nicméně kvantily hodnot půdních vlastností byly mezi oběma členěními zpravidla obdobné kromě mírně odlišných obsahů prášku, pH, P_2O_5 a bazické saturace (tab. 1). Podobnosti kvantilů předznamenaly, že lineární regrese mezi základními systémy rozdělení hodnot půdních vlastností zahrnuje nejméně 75 % rozptylu. Stejně kvantily mezi členěními lesních půd byly provázány AIC 4,67–54,64 a R^2 0,86–1,00. Mírně rozdílné kvantily se vyznačovaly AIC 5,85–39,22 a R^2 0,75–0,99. Naopak nejvíce podobné kvantily obsahu písku, prachu, CaO a nadmořské výšky s AIC > 8 se vyznačovaly nejužším intervalem R^2 > 0,90. Obdobně jako nejpodobnější kvantily nezávisle proměnných korelovaly mezi systémy půdního členění i prostorové charakteristiky střední směrodatné chyby a $GW-R^2$.

Diferenciace bazické saturace byla v obou systémech geografického členění lesních půd zřetelná odlišným způsobem. Půdní asociace částečně potlačily rozsah intervalů hodnot bazické saturace z pěti na tři. Odhady bazické saturace oscilovaly



Obr. 7 – Rozšíření hodnot modelované bazické saturace v lesních půdách a vlastností prostorově vážené regrese uvnitř pedoregionů (vlevo) a půdních asociací (vpravo)

mezi pedoregiony kolem středních hodnot $GW-R^2$ $0,68 \pm 0,09$, zatímco závislosti mezi asociacemi lesních půd byly nepatrně nižší s menší směrodatnou odchylkou $0,67 \pm 0,06$. Nicméně zdánlivá podobnost intervalů závislosti bazické saturace byla podmíněna širším intervalem R^2 mezi pedoregiony $0,40-0,86$ a užším intervalem s menší nejvyšší přesností $0,55-0,83$ mezi půdními asociacemi (obr. 7). Užší intervaly hodnot bazické saturace částečně korespondovaly se zúženými klasifikacemi obsahů prášku a P_2O_5 .

4. Diskuse

Prostorová závislost bazické saturace na zrnitostních a chemických vlastnostech půd ovlivnila členitost růstových podmínek lesů. Individuální členění sledující hranice mezi jednotlivými půdotvornými prostředními se jeví důležitější jak pro diferenciaci úživnosti lesních půd, tak pro její hospodářsky zaměřenou klasifikaci.

Pedoregiony těsněji vymezily závislosti bazické saturace na ostatních vlastnostech lesních půd. Diferenciace půdní bazické saturace přirozeně vzniká jednak z rozpadu různých typů hornin, jednak díky kumulaci organické hmoty. Rozpad hornin vede k hromadění zvětralin se zrnitostním složením odlišným podél jednotlivých geotektonických těles (Zeng a kol. 2016). Kumulace půdní organické hmoty je nejvýrazněji usměrňována podél gradientů reliéfu s odlišným mezoklimatem a různou skladbou rostlinných společenstev (Jiang a kol. 2018). Obsah jílu, organické hmoty a pH zachycují 51 % rozptylu hodnot půdní kationtové výměnné kapacity. Jíl a C_{org} představovaly až 67 % rozptylu hodnot kationtové výměnné kapacity v půdních asociacích luvisolů, kambisolů, černozemí až smonic a 78 % rozptylu v leptosolech a podzolech. Podzoly se vyznačovaly kationtovou výměnnou kapacitou závislou až ze 73 % jen na obsahu půdní organické hmoty (Manrique, Jones, Dyke 1991). Vysoký obsah C_{org} zachytil 43–78 % rozptylu kationtové výměnné kapacity, kdežto minerální půdy sdílející $> 0,3$ % C_{org} charakterizovaly 53–84 % rozptylu kationtové výměnné kapacity. Nicméně úživnost půdních pufrčních pásem ohraničených podél intervalů kationtové výměnné kapacity je usměrňována z 86–95 % obsahem organické hmoty, kdežto taxonomické jednotky jsou závislé na obsahu C_{org} obdobně jako přirozeně převažující minerální půdní tělesa mezi 53–86 % (Seybold, Grossman, Reinsch 2005).

Vliv geotektonických těles na prostorové rozdělení půdních vlastností je výraznější, pokud hranice horninových těles současně souvisejí s jejich chemickým složením. Horninová stavba nejvýrazněji rozděluje zastoupení půdní bazické saturace ve třídách úživnosti. Zatímco na kyselých horninách převažuje nízká bazická saturace, alkalické horniny odchylují zastoupení tříd úživnosti opačně převahou vyšších hodnot (Blaser a kol. 2008). Souvislost mezi vlivy geotektonických těles a pedogeografických regionů na rozšíření půdních vlastností je ohraničena podél mírného klimatického pásma, avšak zvětrávání hornin v tropickém klimatu rozděluje půdní zrnitost nejvýrazněji podél charakteristik reliéfu (Teixeira a kol. 2017). Protože reliéf předurčuje typologické členění půd, půdní vlastnosti podmíněné charakterem reliéfu stírají neopakovatelné vlivy hornin uvnitř pedoregionů. Oblasti pokryté půdotvornými substráty výrazně rozčleněnými během čtvrtohorních klimatických změn jsou typické rozdělením až 90 % hodnot půdní zrnitosti podél jednotlivých půdních typů, až 54 % hodnot zrnitosti podél typů suchozemských ekosystémů a až 27 % hodnot zrnitosti podél typů současného

využití krajiny. Naopak charakteristiky reliéfu ovlivnily < 20 % půdní zrnitosti na čtvrtohorních sedimentech (Adhikari a kol. 2017).

Rozdílné kvantily obsahů prášku, P_2O_5 a pH na jednu stranu ovlivnily diferenciaci bazické saturace, na druhou stranu významná prostorová závislost sorpce byla výslednicí působení všech hodnocených vlastností lesních půd. Ačkoli prostorové regrese z environmentálních vlastností jsou nejvýznamnější při nalezení optimální podmnožiny nejlivnějších prediktorů, půdní prostředí ovlivňuje stanovištní úživnost působením všech vlastností (cf. Szabó a kol. 2019). Prostorová regrese bazické saturace lesních půd s obsahy Al_2O_3 , CaO a C/N dosáhla na území Česka středního $GW-R^2$ 0.81 ± 0.14 v rozsahu 0.02–0.93 (Samec 2020). Přitom souhrn působení všech skupin půdních vlastností charakterizoval úživnost ve výrazně menším rozsahu $R^2 > 0,60$ zahrnujícím 73,63 % vybraných sond a $R^2 > 0,50$ u 95,64 % sond. V souladu s vícenásobným působením mezi jednotlivými půdními vlastnostmi korespondoval vliv půdní reakce na prostorovou diferenciaci bazické saturace s fyzikálně-chemickou úměrou mezi kyselostí a nízkým obsahem výměnných bazí (Cosby a kol. 2001). Obsah P_2O_5 rozčlenil úživnost lesních půd mezi Karpaty a Českým masivem. Zatímco poměrně vyrovnané obsahy P_2O_5 na českém území se výrazně nepodílejí na diferenciaci půdní úživnosti, rozdílné obsahy fosforu ve Vnějších Západních Karpatech vymezují úživnost v úvalech, bradlech a flyšovém pásmu (Samec, Mikita, Bajer 2019).

5. Závěr

Prostorové závislosti bazické saturace na zrnitostních a chemických vlastnostech půd se podílejí na členitosti růstových podmínek lesů. Rozdíly bazické saturace v prostoru byly nejvýznamněji podmíněny rozložením půdní reakce, frakcí písku, prášku, prachu a jílu, obsahy makrobiogenních prvků a nadmořskou výškou. Vícenásobné působení vybraných fyzikálních a chemických vlastností charakterizovalo více než 50 % rozptylu hodnot bazické saturace u více než 95 % lesních půd v Česku. Průměrně vyšší závislost bazické saturace mezi pedogeografickými regiony naznačila výraznější členitost podél neopakovatelných územních celků než podél typologicky opakovatelných hranic lesních stanovišť. Neopakovatelné rozčlenění bazické saturace odrazilo především vlivy rozdílného obsahu fosforu mezi Českým masivem a Karpaty, vlivy obsahu práškového písku mezi odlišně rozpadavými horninami a pH mezi různě kyselými stanovišti. Vlivy práškového písku, P_2O_5 a pH se jeví jako nenahraditelné při hodnocení příčin proměnlivosti v úživnosti lesních půd.

Literatura

- ADHIKARI, K., KHEIR, R. B., GREVE, M. B., BØCHER, P. K., MALONE, B. P., MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B., GREVE, M. H. (2013): High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark. *Soil Science Society of America Journal*, 77, 3, 860–876. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0275>
- BIVAND, R., YU, D. (2017): spgwr: Geographically Weighted Regression. R package version 0.6–32. <https://CRAN.R-project.org/package=spgwr>.
- BLAKEMORE, L. C., METSON, A. J. (1960): Micro-Determination of Cation-Exchange Capacity and Total Exchangeable Bases. *Soil Science*, 89, 4, 202–208. <https://doi.org/10.1097/00010694-196004000-00005>
- BLASER, P., WALTHER, L., ZIMMERMANN, S., PANNATIER, G. E., LUSTER, J. (2008): Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 2, 163–170. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700008>
- BOWMAN, A. (1984): An Alternative Method of Cross-validation for the Smoothing of Density Estimates. *Biometrika*, 71, 2, 353–360. <https://doi.org/10.1093/biomet/71.2.353>
- CARAVACA, F., LAX, A., ALBALADEJO, J. (1999): Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils. *Geoderma*, 93, 3–4, 161–176. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00045-2)
- COSBY, B. J., FERRIER, R. C., JENKINS, A., WRIGHT, R. F. (2001): Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Science*, 5, 3, 499–517. <https://doi.org/10.5194/hess-5-499-2001>
- CRONAN, C. S., GRIGAL, D. F. (1995): Use of Calcium/Aluminium Ratios as Indicators of Stress in Forest Ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 24, 2, 209–226. <https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400020002x>
- FINKE, P. A., VANWALLEGHEM, T., OPOLOT, E., POESEN, J., DECKERS, J. (2013): Estimating the effect of tree uprooting on variation of soil horizon depth by confronting pedogenic simulations to measurements in a Belgian loess area. *Journal of Geophysical Research*, 118, 4, 2124–2139. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20153>
- FINSTAD, K. (2010): Response Interpolation and Scale Sensitivity: Evidence Against 5-Point Scales. *Journal of Usability Studies*, 5, 3, 104–110.
- FLECK, S., COOLS, N., DE VOS B., MEESENBURG, H., FISCHER R. (2016): The Level II aggregated forest soil condition database links soil physicochemical and hydraulic properties with long-term observations of forest condition in Europe. *Annals of Forest Science*, 73, 1, 945–957. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0571-4>
- GALEHOUSE, J. S. (1971): Sedimentation Analysis. San Francisco State College, San Francisco.
- GALVÃO, S. L., FORMAGGIO, R. A., COUTO, G. E., ROBERTS, D. A. (2008): Relationships between mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 2, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.09.006>
- GOLDBERG, S., LEBRON, I., SUAREZ, D. L. (2000): Soil Colloidal Behavior. In: Sumner M. E. (ed.), *Handbook of Soil Science*, CRC Press.
- GOLLINI, I., LU, B., CHARLTON, M., BRUNDSON, C., HARRIS, P. (2015): GWmodel: an R Package for Exploring Spatial Heterogeneity using geographically Weighted Models. *Journal of Statistical Software*, 63, 17, 1–50. <https://doi.org/10.18637/jss.v063.i17>

- HEITCAMP, F., AHRENS, B., EVERS, J., STEINICKE, C., MEESENBURG, H. (2020): Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: Regionwide application for stakeholders of Hesse, Germany. *Geoderma Regional*, 23, 1, e00340. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00340>
- HOUBA, V. G. J., VAN DER LEE, J. J., NOVOZAMSKY, I., WALINGA, I. (1989): *Soil Analysis Procedures. Soil and Plant Analysis, Part 5.* Wageningen Agricultural University.
- HRAŠKO, J., ČERVENKA, L., FACEK, Z., KOMÁR, J., NĚMEČEK, J., POSPÍŠIL, F., SIROVÝ, V. (1962): *Rozbory pôd.* Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, Bratislava.
- IBÁÑEZ, J. J., KRASILNIKOV, P. V., SALDAÑA, A. (2012): Archive and refugia of soil organisms: applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages. *Journal of Applied Ecology*, 49, 6, 1267–1277. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02213.x>
- JANKOVSKÁ, Z., ŠTĚRBA, P. (2007): *Národní inventarizace lesů v České republice 2001–2004. Úvod, metody, výsledky. ÚHÚL Brandýs nad Labem.*
- JIANG, J., WANG, Y.-P., YU, M., CAO, N., YAN, J. (2018): Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology*, 501, 1, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.10.009>
- LAFFAN, S. W., LEES, B. G. (2004): Predicting regolith properties using environmental correlation: a comparison of spatially local approaches. *Geoderma*, 120, 3–4, 241–258. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.007>
- LEPŠ, J., ŠMILAUER, P. (2016): *Biostatistika.* Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- MACKŮ, J., HOMOLOVÁ, K. (2007): *Pedogenetické asociace lesních půd ČR. 1: 500 000. ÚHÚL Brandýs nad Labem.*
- MANRIQUE, L. A., JONES, C. A., DYKE, P. T. (1991): Predicting Cation-Exchange Capacity from Soil Physical and Chemical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 3, 787–794. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500030026x>
- MEERSMANS, J., DE RIDDER, F., CANTERS, F., DE BAETS, S., VAN MOLLE, M. (2008): A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Matter (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 143, 1–2, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.025>
- NELSON, D. W., SOMMERS, L. E. (1982): Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* ASA, SSSA, Madison, 539–580. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- NĚMEČEK, J., TOMÁŠEK, M. (1983): *Geografie půd ČSR.* Academia, Praha.
- QUIRÓS-SEGOVIA, M., CONDÉZ RUIZ, S., DRÁPELA, K. (2016): Comparison of height-diameter models based on geographically weighted regressions and linear mixed modeling applied to large scale forest inventory data. *Forest Systems*, 25, 3, e076. <https://doi.org/10.5424/fs/2016253-09787>
- R CORE TEAM (2022): *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- ROSS, D. S., MATSCHONAT, G., SKYLLBERG, U. (2008): Cation exchange in forest soils: the need for a new perspective. *European Journal of Soil Science*, 59, 6, 1141–1159. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01069.x>
- SAMEC, P. (2009): Revize biogeografické rajonizace pufručních schopností lesních půd. *Acta Musei Beskidensis*, 1, 1, 1–22.
- SAMEC, P. (2014): The perspectives of biogeography at forestry environmental modelling. In: *Second StatGIS Conference Proceedings.* Palacký University Olomouc, 64–74.

- SAMEC, P. (2020): Forest Soil Physico-Chemical Sorption Spatial Links in Central-European Systems of Site Geographical Divisions. In: Balková M., Kučera A., Samec P. (eds.), *Contemplating Earth. Soil and Landscape Considerations*. Mendel University in Brno, 75–89.
- SAMEC, P., CAHA, J., TUČEK, P., ZAPLETAL, M., CUDLÍN, P., KUČERA, M. (2017): Discrimination between acute and chronic decline of Central European forests using map algebra of the growth condition and forest biomass fuzzy sets: A case study. *Science of the Total Environment*, 599–600, 1, 899–909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.023>
- SAMEC, P., MIKITA, T., BAJER, A. (2019): Catenas of grain size and chemical forest soil properties in Outer Western Carpathians of the Czech Republic characterized by principal component analysis. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67, 3, 733–747. <https://doi.org/10.1118/actaun201967030733>
- SEDLÁČEK, J., JANDERKOVÁ, J., ŠEFRNA, L. (2009): Půdní asociace. 1: 500 000. In: Hřčianová, T., Mackovčín, P., Zvara, I. (eds.), *Atlas krajiny České republiky. MŽP, VÚKOZ, Praha*, 134–135.
- SELIGE, T., BÖHNER, J., SCHMIDHALTER, U. (2006): High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*, 136, 1–2, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.050>
- SEYBOLD, C. A., GROSSMAN, R. B., REINSCH, T. G. (2005): Predicting Cation Exchange Capacity for Soil Survey Using Linear Models. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 3, 856–863. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0026>
- SHI, Z., JI, W., VISCARRA ROSSEL, R. A., CHEN, S., ZHOU, Y. (2015): Prediction of soil organic matter using a spatially constrained local partial least squares regression and the Chinese vis-NIR spectral library. *European Journal of Soil Science*, 66, 4, 679–687. <https://doi.org/10.1111/ejss.12272>
- SKINNER, M. F., ZABOWSKI, D., HARRISON, R., LOWE, A., XUE, D. (2001): Measuring the cation exchange capacity of forest soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 11–12, 1751–1764. <https://doi.org/10.1081/CSS-120000247>
- SUMNER, M. E., MILLER, W. P. (1996): Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M. E. (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, 1201–1229.
- SZABÓ, B., SZATMÁRI, G., TAKÁCS, K., LABORCZI, A., MAKÓ, A., RAJKAI, K., PÁSZTOR, L. (2019): Mapping soil hydraulic properties using random-forest-based pedotransfer functions and geostatistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 6, 2615–2635. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2615-2019>
- SZOPKA, K., KABALA, C., KARCZEWSKA, A., BOGACZ, A. (2010): Pools of available nutrients in soils from different altitudinal forest zones located in a monitoring system of the Karkonosze Mountains National Park, Poland. *Polish Journal of Soil Science*, 43, 2, 173–188.
- ŠRÁMEK, V., JURKOVSKÁ, L., FADRHOŇSOVÁ, V., HELLEBRANDOVÁ-NEUDERTOVÁ, K. (2013): Chemismus lesních půd ČR podle typologických kritérií – výsledky monitoringu lesních půd v rámci projektu EU „BioSoil“. *Zprávy lesnického výzkumu*, 58, 4, 314–323.
- TEIXEIRA, D. D. B., MARQUES, J. JR., SIQUEIRA, D. S., VASCONCELOS, V., CARVALHO, O. A. JR., MARTINS, É. S., PEREIRA, G. T. (2017): Sample planning for quantifying and mapping magnetic susceptibility, clay content, and base saturation using auxiliary information. *Geoderma*, 305, 1, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.001>
- WALKEY, A., BLACK, I. A. (1934): An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modifications of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 1, 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

- WHITE, R. E. (1987): Introduction to the Principles and Practice of Soil Science. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- ZAR, J. H. (2010): Biostatistical Analysis. Prentice-Hall, New Jersey, 66–96.
- ZBÍRAL, J., HONSA, I., MALÝ, S., ČIŽMÁR, D. (2004): Analýza půd III. Jednotné pracovní postupy. ÚKZÚZ, Brno.
- ZENG, C., YANG, L., ZHU, A.-X., ROSSITER, D. G., LIU, J., LIU, J., QIN, C., WANG, D. (2016): Mapping soil organic matter concentration at different scales using a mixed geographically weighted regression method. *Geoderma*, 281, 1, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.033>
- ZHU, A.-X., QI, F., MOORE, A., BURT, J. E. (2010): Prediction of soil properties using fuzzy membership values. *Geoderma*, 158, 3–4, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.001>

SUMMARY

The spatial dependence of base saturation on forest soil grain and chemical composition seen through individual and typological divisions

Soil base saturation is physicochemical property used for classifying terrestrial ecosystems. Soil base saturation value distribution characteristics suggest processes forming soil through dominant effects on correlations with selected physical and chemical properties. We focused on comparing the effects of individual or typological divisions of forest soils on the spatial relationships between soil base saturation and other soil properties. Forest soils predominantly maintain features of the ecosystem's natural development. The spatial division of environmental properties forms forest growth conditions used as ranges for ecosystem sustainable management.

Soil properties were investigated in an irregular point field consisting of routine forest surveys conducted on the territory of Czechia (26,900 km²; 145–1,547 m a. s. l.). The point field consisted of 22,014 pits in the matrices of Forest Development Regional Plans (1953–2000) and of two inventory cycles (2001–2015) established by the Forest Management Institute Brandýs nad Labem. The horizon sequence in each pit was simplified to the subsurface (B at depths > 30 cm) or to the topsoil (A at depths ≤ 30 cm). The dependence of soil base saturation was obtained through geographically weighted regression (GWR). Spatial relations were optimized from the most significantly correlating grain-size fractions of sand (0.1–2.0 mm), loam (0.05–0.1 mm), silt (0.01–0.05 mm), and clay (< 0.002 mm), chemical properties of pH (H₂O), organic carbon (C_{org}), total Al₂O₃, CaO, MgO, and P₂O₅ contents, and altitude. Basic soil property values as well as regression characteristics were divided along soil regions and associations (Figs. 1–3). The quantiles of basic statistics from values among individual or typological soil division systems were compared through two-tailed *t*-tests and linear regressions as significantly similar at $p < 0.05$, moderately similar at $p < 0.25$, and as different at $p < 0.5$.

The proportions of forest soil property values between soil regions and associations are only apparently similar. One cause of the differences in value proportions was disrupted normality. Differentiation of base saturation was evident by different ways in both systems of forest soil geographical division. Soil associations decreased base saturation intervals from five to three. The soil base saturation estimations oscillated among soil regions around mean values of $GW-R^2$ 0.68 ± 0.09 , while the dependences among forest soil associations were slightly lower under lower standard deviation 0.67 ± 0.06 . Nevertheless, the apparent soil base saturation dependence

interval similarity was conditioned by a wider interval of R^2 0.40–0.86 among soil regions and by a lower interval 0.55–0.83 among soil associations under lower accuracy (Fig. 7). Short intervals of soil base saturation values corresponded particularly with narrow classifications of loam and P_2O_5 contents. Little significant differences in distribution of soil base saturation prevailed in both compared individual and typological divisions.

The multiple effects of the selected physical and chemical properties characterized more than 50% of soil base saturation value variance of more than 95% of forest soils in Czechia. Mean higher dependence of soil base saturation among soil regions suggested more evident borders along unrepeatable area units than along typologically repeatable forest sites. The unique regional division of soil base saturation reflected predominantly (i) phosphorus content between the Bohemian Massif and the Carpathians, (ii) loam on differentially weathering rocks and (iii) pH at acidic sites. We concluded that slightly different loam content, pH, and P_2O_5 suggested unrepeatable effects on forest soil base saturation among soil regions.

- Fig. 1 Grain-size contents distributed in forest soils within soil regions (left) and associations (right). From top: sand content, powder content, dust content, physical clay content.
- Fig. 2 Soil acidity and Al_2O_3 content distributed in forest soils within soil regions (left) and associations (right). From top: soil reaction active, Al_2O_3 content.
- Fig. 3 Macrobiogenic substances distributed in forest soils within soil regions (left) and associations (right). From top: oxidizable carbon content, CaO content, MgO content, P_4O_{10} content.
- Fig. 4 Comparison between grain-size intervals represented in forest soil regions and associations; a – sand, b – powder, c – dust, d – clay.
- Fig. 5 Comparison between pH and macrobiogenic substance intervals represented in forest soil regions and associations; a – soil reaction active, b – oxidizable carbon content, c – Al_2O_3 content, CaO content, MgO content, P_2O_5 content.
- Fig. 6 Comparison between intervals of modelled base saturation, geographically weighted determination coefficients, and regression errors in forest soil regions and associations. From top: soil base saturation, significance of the coefficient of determination, standard error.
- Fig. 7 Modelled base saturation and properties of geographically weighted regression distributed in forest soils within soil regions (left) and associations (right). From top: soil base saturation, significance of coefficient of determination, standard error of geographically weighted regression.

PODĚKOVÁNÍ / ACKNOWLEDGEMENT

Příspěvek byl zpracován s podporou grantového projektu projektem LDF_TP_2021006 Interní grantové agentury Mendelovy univerzity v Brně.

This work was supported by project LDF_TP_2021006 of the Internal grant agencies of Mendel University in Brno.

ORCID

PAVEL SAMEC

<https://orcid.org/0000-0002-8152-1603>

ANNA TIŠLEROVÁ

<https://orcid.org/0000-0002-2396-3817>

MATĚJ HORÁČEK

<https://orcid.org/0000-0001-5045-8210>

GABRIELA TOMÁŠOVÁ

<https://orcid.org/0000-0002-9882-0829>

MILOŠ KUČERA

<https://orcid.org/0009-0000-0222-7485>