

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

**Chemické vlastnosti svrchních minerálních vrstev
lesních půd a ohrožení lesních půd acidifikací a
nutriční degradací**

soubor map

Klára Komprdová**

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

***Česká zemědělská univerzita v Praze**

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

***** Masarykova univerzita**

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

Specializovaná mapa s odborným obsahem

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

Strnady 136

252 02 Jíloviště

2021



Obsah

1	ZDŮVODNĚNÍ POTŘEBY A CÍLE SPECIALIZOVANÉ MAPY.....	2
1.1	NÁZEV MAPY.....	2
1.2	POPIS NOVOSTI MAPY.....	2
1.3	INFORMACE O ROZSAHU VYUŽITÍ MAPY.....	2
1.4	INFORMACE O PŘÍNOSECH MAPY PRO UŽIVATELE.....	2
1.5	SEZNAM ODBORNÝCH PODKLADŮ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY VYPRACOVÁNÍ MAPY.....	2
1.6	DEDIKACE.....	3
1.7	OPONENTSKÉ POSUDKY.....	3
2	OBSAH MAPOVÉHO SOUBORU.....	3
3	METODIKA TVORBY MAP.....	5
3.1	ZDROJE DOPLŇKOVÝCH ÚDAJŮ.....	6
3.2	POUŽITÉ METODY.....	6
3.3	MAPY OHROŽENÍ PŮD NUTRIČNÍ DEGRADACÍ A MAPY PŮDNÍ REAKCE PRO MINERÁLNÍ VRSTVU 0 – 30 CM.....	7
3.3.1	<i>Kategorie pro chemické vlastnosti svrchního minerálního horizontu.....</i>	<i>7</i>
3.4	MAPY KATEGORIÍ RIZIKA ACIDIFIKACE PRO MINERÁLNÍ VRSTVY 0 – 30 CM A 30 – 80 CM.....	11
3.4.1	<i>Vymezení kategorií na základě měřených půdních vlastností.....</i>	<i>11</i>
3.4.2	<i>Tvorba predikčních modelů.....</i>	<i>12</i>
3.4.4	<i>Tvorba map plošného rozložení kategorií rizika acidifikace.....</i>	<i>14</i>
3.5	MAPOVÁNÍ KATEGORIÍ RIZIKA ACIDIFIKACE PRO MINERÁLNÍ VRSTVY 0 – 80 CM.....	15
3.5.1	<i>Vymezení ohrožení lesních půd acidifikací a tvorba mapy.....</i>	<i>15</i>
4	CITOVANÁ LITERATURA.....	16
	PŘÍLOHY.....	17

1 Zdůvodnění potřeby a cíle specializované mapy

1.1 Název mapy

Chemické vlastnosti svrchních minerálních vrstev lesních půd a ohrožení lesních půd acidifikací a nutriční degradací

1.2 Popis novosti mapy

Pro charakteristiky svrchních půdních vrstev nebyly do současné doby obdobné mapy k dispozici. Z dat druhého cyklu národní inventarizace lesů byly zpracovány mapy pH, saturace bázemi, přístupného fosforu, draslíku, vápníku a hořčíku v povrchových horizontech (A+E), ve kterých je ovšem pouze uvedena sumarizace pro jednotlivé kraje. Data z mezinárodního projektu BioSoil byla v mapách prezentována pouze jako bodové údaje pro jednotlivé plochy. Dále byla v minulosti zpracována mapa přirozené citlivosti půd vůči kyselé depozici a mapa vymezení oblastí ČR s půdami různě poškozenými acidifikací (Hruška a Cenciala 2001), které jsou v menším detailu a neopírají se o tak rozsáhlou síť půdních odběrů. Předkládaný mapový výstup využívá unikátní agregovanou databázi chemických analýz lesních půd, která v sobě zahrnuje data získaná v rámci NIL2, typologického průzkumu (obojí ÚHÚL), půdních průzkumů BioSoil a ICP Forests (obojí VÚLHM) a průzkumu půd a výživy lesů v oblastech postižených imisemi (ÚKZÚZ). Tato data nebyla doposud společně vyhodnocována. Data byla zpracována novými postupy matematicko-statistického modelování a digitálního mapování půd.

1.3 Informace o rozsahu využití mapy

Informace poskytnutá v mapách je široce využitelná pro státní správu (v rámci Národního plánu adaptace ke změnám klimatu – opatření o 2_5.2; aplikace koncepce státní lesnické politiky – bod A.3). Mapy dále umožňují definovat současný stav lesních půd a sledovat změny, ke kterým bude docházet v budoucnosti. Jako významný považujeme tento výstup i pro vlastníky a správce lesů, pro které může být jedním z vodítek pro výběr vhodné skladby dřevin, a hospodářských opatření jako je přihnojování výsadeb apod. Výstup je rovněž využitelný pro další vědeckou a vzdělávací činnost v rámci oborů lesnické pedologie a ekologie lesa. Může posloužit také pro spolupráci v rámci mezinárodních programů a projektů (např. Global Soil Partnership, GlobalSoilMap aj.).

1.4 Informace o přínosech mapy pro uživatele

U mapových výstupů nepředpokládáme přímé ekonomické využití ve smyslu tržního zhodnocení. Nicméně, jak vyplývá z rozsahu jejich využití, nepřímé ekonomické efekty pro sektor lesního hospodářství i celou společnost mohou být značné. Předpokládané přínosy mapy spočívají ve zpřístupnění informací pro vlastníky a správce lesních majetků i státní správu.

1.5 Seznam odborných podkladů, které předcházely vypracování mapy

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

Zpracování mapy předcházely mj. tyto odborné publikace:

- Šrámek, V., Fadrhonsová, V., Neudertová Hellebrandová, K., Čechmánková, J., Borůvka, L., Sářka, M., Novotný, R., 2020: *Kontrola kvality dat v rozsáhlých databázích chemických*

vlastností lesních půd. Typ výsledku **Nmet** – certifikovaná metodika. Potvrzení o uznání výsledku je v Příloze 3

- Borůvka, L., Vašát, R., Němeček, K., Novotný, R., Šrámek, V., Vacek, O., Pavlů, L., Fadrhonsová, V., Drábek, O., 2020: Application of regression-kriging and sequential Gaussian simulation for the delineation of forest areas potentially suitable for liming in the Jizera Mountains region, Czech Republic. *Geoderma Regional Q2*, doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00286. Typ výsledku **Jimp**
- Vašát R., Neudertová Hellebrandová K., Šrámek V., Borůvka L., Sářka M., Sářka O., Vacek O., Penížek V., Čechmánková J., 2021: Mapa procentuálního obsahu organického uhlíku v lesních půdách. Typ výsledku **Nmap** – specializovaná mapa s odborným obsahem

1.6 Dedikace

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

1.7 Oponentské posudky

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

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

Oponentský posudek pracovníka příslušného odborného orgánu státní správy zpracoval

Ing. Václav Zouhar

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

2 Obsah mapového souboru

Soubor map obsahuje mapové listy kategorizovaného obsahu Ca, K, Mg, P, nasycení půd bázemi, půdní reakce ve vodném výluhu a výluhu KCl pro minerální vrstvu 0 – 30 cm, rizika acidifikace lesních půd pro minerální vrstvy 0 – 30 cm, 30 – 80 cm a 0 – 80 cm a mapové listy, které zobrazují pravděpodobnost výskytu jednotlivých kategorií uvedených parametrů.

Jedná se o následující mapové listy:

1. Obsah výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)

- 1.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého obsahu výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 1.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého obsahu výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 1.3 Pravděpodobnost výskytu středního obsahu výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 1.4 Pravděpodobnost výskytu dobrého obsahu výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 1.5 Pravděpodobnost výskytu velmi dobrého obsahu výměnného vápníku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)

2. Obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)

- 2.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 2.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 2.3 Pravděpodobnost výskytu středního obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 2.4 Pravděpodobnost výskytu dobrého obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 2.5 Pravděpodobnost výskytu velmi dobrého obsahu výměnného draslíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 3. Obsah výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 3.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého obsahu výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 3.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého obsahu výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 3.3 Pravděpodobnost výskytu středního obsahu výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 3.4 Pravděpodobnost výskytu dobrého obsahu výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 3.5 Pravděpodobnost výskytu velmi dobrého obsahu výměnného hořčíku v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 4. Obsah přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 4.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého obsahu přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 4.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého obsahu přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 4.3 Pravděpodobnost výskytu středního obsahu přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 4.4 Pravděpodobnost výskytu dobrého obsahu přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 4.5 Pravděpodobnost výskytu velmi dobrého obsahu přístupného fosforu v lesních půdách ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 5. Nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 5.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 5.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 5.3 Pravděpodobnost výskytu středního nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 5.4 Pravděpodobnost výskytu dobrého nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 5.5 Pravděpodobnost výskytu velmi dobrého nasycení lesních půd ČR bázemi (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 6. Aktivní půdní reakce (pH(H₂O)) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 6.1 Pravděpodobnost výskytu velmi silně a silně kyselé půdní reakce (pH(H₂O)) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 6.2 Pravděpodobnost výskytu středně kyselé půdní reakce (pH(H₂O)) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)

- 6.3 Pravděpodobnost výskytu mírně kyselé půdní reakce ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 6.4 Pravděpodobnost výskytu neutrální až alkalické půdní reakce ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 7. Výměnná půdní reakce (výměnné pH) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 7.1 Pravděpodobnost výskytu velmi silně a silně kyselé půdní reakce (výměnné pH) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 7.2 Pravděpodobnost výskytu středně kyselé půdní reakce (výměnné pH) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 7.3 Pravděpodobnost výskytu mírně kyselé půdní reakce (výměnné pH) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 7.4 Pravděpodobnost výskytu neutrální až alkalické půdní reakce (výměnné pH) lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 8. Riziko acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)**
 - 8.1 Pravděpodobnosti výskytu velmi nízkého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 8.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 8.3 Pravděpodobnost výskytu středního rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 8.4 Pravděpodobnost výskytu vysokého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
 - 8.5 Pravděpodobnost výskytu extrémního rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 0 – 30 cm)
- 9. Riziko acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)**
 - 9.1 Pravděpodobnost výskytu velmi nízkého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)
 - 9.2 Pravděpodobnost výskytu nízkého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)
 - 9.3 Pravděpodobnost výskytu středního rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)
 - 9.4 Pravděpodobnost výskytu vysokého rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)
 - 9.5 Pravděpodobnost výskytu extrémního rizika acidifikace lesních půd ČR (minerální vrstva 30 – 80 cm)
- 10. Ohrožení lesních půd ČR acidifikací**

3 Metodika tvorby map

Základem pro tvorbu map jsou výsledky chemických analýz lesních půd z databází Výzkumného ústavu lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů a Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského z let 2000 – 2019. Tato data z celkem více než 6000 lokalit byla v rámci projektu „Vývoj a verifikace prostorových modelů vlastností lesních půd v České republice“ shromážděna do jednotné databáze, následně verifikována a přepočítána pro tři vrstvy půdy: organický horizont, minerální vrstva 0 – 30 cm a minerální vrstva 30 – 80 cm.

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

Sjednocená databáze byla použita k vytvoření prostorových modelů pro odhad ohrožení lesních půd acidifikací na základě hodnot pH a nasycení bázemi a koncentrace výměnných bazických kationtů (Ca, Mg, K) a přístupného fosforu.

3.1 Zdroje doplňkových údajů

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

- Údaje o reliéfu - digitální výškový model ArcČR® 500 s rozlišením 200 metrů (ARCDATA PRAHA, ZÚ, ČSÚ, 2016).
- Odvozené charakteristiky reliéfu - výpočet pomocí nástroje Terrain Analysis Toolbox v programu SAGA GIS 2.1.4 (Conrad et al., 2015).
- Údaje o půdách (půdní typy a subtypy podle Taxonomického klasifikačního systému) - databáze půdního informačního systému PUGIS v měřítku 1:250 000 (Kozák et al., 1996).
- Průměrné roční srážky a teploty byly - databáze WorldClim.org v rozlišení 1 km (Fick, Huijmans, 2017).
- Údaje o využití půdy (land cover/land use), zejména druh lesa (v kategoriích listnatý, smíšený, jehličnatý) - databáze CORINE Land Cover 2018 (EEA, 2018) s rozlišením 250 m.
- Lesotypologické údaje (Viewegh et al., 2003, Viewegh, 2005) (lesní vegetační stupně (LVS), soubory lesních typů (SLT) a edafické kategorie (EK)) - mapy lesnické typologie v měřítku 1:10 000 (ÚHÚL, 2019).
- Přírodní lesní oblast (PLO) – mapa PLO (ÚHÚL).
- Strukturovaný porostní typ (SPT) – mapy druhové skladby (ÚHÚL, 2020).

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

3.2 Použité metody

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

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

Prostorová závislost sledované půdní proměnné byla modelována za použití semivariogramu, který byl následně použit pro prostorovou interpolaci pomocí metody běžného krigingu (*ordinary kriging* - OK). Protože tato metoda spoléhá čistě na prostorovou autokorelaci sledované proměnné a nevyžaduje

použití dalších vysvětlujících proměnných, je vhodným kontrastem k metodám digitálního mapování půd při tvorbě modelu společného učení.

Přesnost předpovědi jednotlivých predikčních přístupů byla testována metodou křížové validace při rozdělení vstupních dat do 5 podsouborů (*5-fold cross-validation*) a byla vyjádřena pomocí ukazatelů úspěšnosti predikce. V případě vytvořených kategorií pro přístupné nebo výměnné obsahy prvků byla pro přesnost modelu použita celková přesnost (*OA - overall accuracy*), vážená přesnost na počet kategorií (*WOA - weighted overall accuracy*) a pro testovací a celkový soubor.

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

Jako nejlepší vycházely modely z metody náhodné lesy (RF) s použitím obsahu výměnných bází, přístupného P, BS a pH rozdělených do kategorií (viz. níže). Mapy jsou pro každý prvek a půdní vlastnost zobrazeny dvěma způsoby, jednak jako mapa kategorií a jednak jako pravděpodobnost výskytu dané kategorie – tedy pravděpodobnost, se kterou se v daném bodě konkrétní kategorie vyskytuje.

3.3 Mapy ohrožení půd nutriční degradací a mapy půdní reakce pro minerální vrstvu 0 – 30 cm

3.3.1 Kategorie pro chemické vlastnosti svrchní minerální vrstvy

Vzhledem k nízké vyčerpané variabilitě modelů s použitím koncentrací prvků (původních i zlogaritmovaných), dané mimo jiné rozložením hodnot (tab. 1), slučováním hodnot z databází s různými odběrovými a analytickými metodami a nejistotami v samotných GIS vrstvách použitých pro predikci, byly výměnné/přístupné obsahy prvků, nasycení bázemi i pH sloučeny do několika kategorií (tab. 2 - 4), a to do pěti kategorií pro Ca, K, Mg a P, do čtyř kategorií pro aktivní pH(H₂O) a výměnné pH (pH stanovené ve výluhu KCl, nebo CaCl₂)

Tabulka 1: Sumární statistika obsahů výměnných bází, přístupného P, BS a pH ve vrstvě 0-30 cm.

	N	Průměr	Medián	Min.	Max.	25%	75%	5%	95%	1%	99%
Ca (mg.kg ⁻¹)	7945	450.9	119.9	2.0	14234.3	80.7	273.3	32.0	2205.5	10.0	5816.7
Mg (mg.kg ⁻¹)	7945	65.3	17.7	0.4	3340.3	5.2	53.0	5.0	289.2	3.1	819.9
K (mg.kg ⁻¹)	7943	73.4	55.2	1.1	678.6	32.5	90.3	13.8	201.0	5.0	341.3
P (mg.kg ⁻¹)	7257	12.1	4.7	0.0	615.4	3.6	11.2	0.8	45.1	0.2	95.0
pH (H ₂ O)	8049	4.5	4.3	3.0	8.3	4.1	4.6	3.9	5.8	3.7	7.4
pH (vym)	8051	3.8	3.7	2.3	7.9	3.5	3.9	3.2	4.8	2.9	6.9
BS (%)	3596	31.8	17.9	1.0	99.9	9.4	46.0	4.8	99.1	3.3	99.7

Tabulka 2: Kategorie pro výměnný Ca, K, Mg a přístupný P

[mg.kg ⁻¹]	P		K		Ca		Mg	
údaje z databáze:								
max	734		527		10 429		2 366	
n	5230		9737		9739		9735	
kategorie	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>
velmi nízká zásoba	<10	86%	<25	14%	<150	57%	<20	51%
nízká zásoba	10-20	91%	25-50	37%	150-300	73%	20-40	65%
střední zásoba	20-40	96%	50-100	68%	300-600	82%	40-80	77%
dobrá zásoba	40-80	98%	100-200	84%	600-1200	89%	80-160	87%
velmi dobrá	>80	100%	>200	100%	>1200	100%	>160	100%

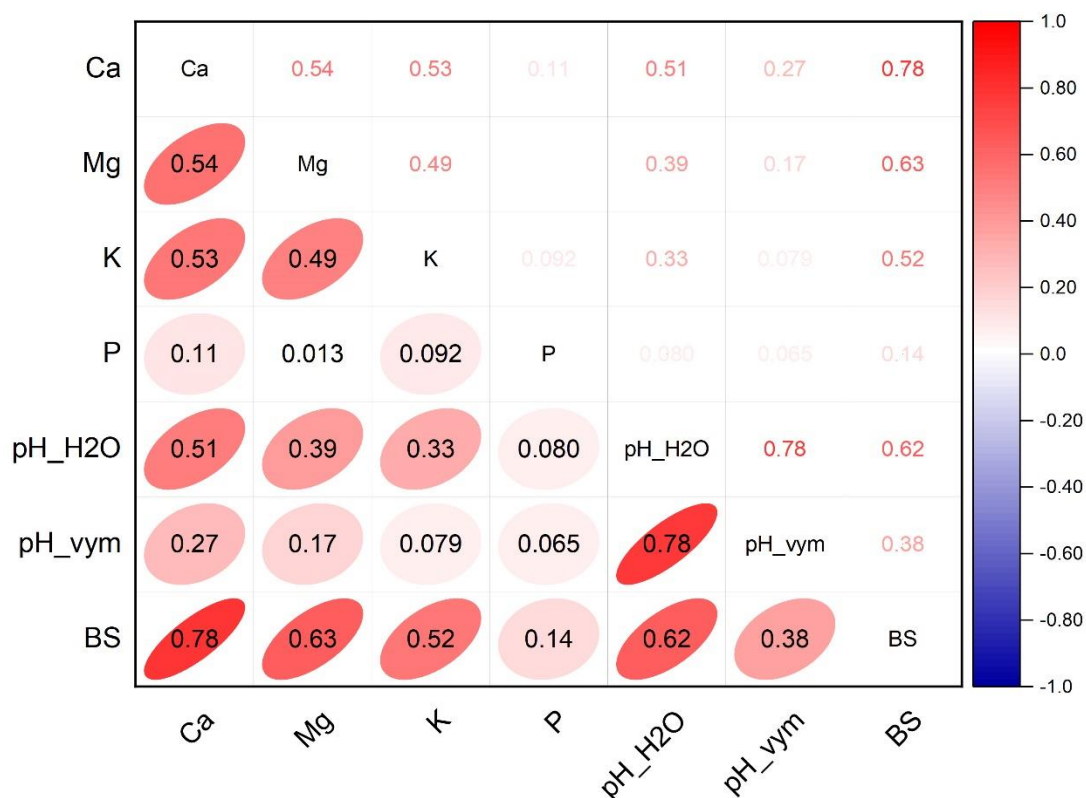
Tabulka 3: Kategorie pro pH(H₂O) a pH(výměnné)

	pH(H ₂ O)		pH(výměnné)	
údaje z databáze:				
min	2,97		2,32	
max	8,80		8,20	
n	10308		10420	
kategorie	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>
velmi silně a silně kyselé	<4,5	57%	<4	69%
středně kyselé	4,5-5,5	90%	4-5	91%
mírně kyselé	5,5-6,5	96%	5-6	95%
neutrální až alkalické	>6,5	100%	>6,0	100%

Tabulka 4: Nasycení bázemi

[%]	BS	
údaje z databáze:		
max	100	
n	5681	
kategorie	<i>rozsah</i>	<i>perc.</i>
velmi nízká	<10	24%
nízká	10-20	47%
střední	20-40	65%
dobrá	40-80	84%
vysoká	>80	100%

Výměnné obsahy prvků Ca, Mg a K spolu vzájemně korelují ($r=0,49 - 0,54$), tyto prvky korelují rovněž s nasycením bázemi (BS), kde je nejvyšší korelace u Ca ($r=0,78$), následovaná Mg ($r=0,63$) a K ($r=0,52$). Je zde také mírná korelace těchto prvků s pH(H₂O) ($r=0,33 - 0,51$) a nízká korelace Ca a Mg ($0,17 - 0,27$) s pH(vym) (obr. 1).



Obrázek 1: Spearmanova korelace obsahů výměnných prvků a přístupného P, nasycení bázemi (BS) a pH v minerální vrstvě 0-30 cm; hodnoty korelací v elipsách jsou statisticky významné pro $p < 0.05$.

Nejvýznamnější proměnné (z metody RF) pro výměnné báze a přístupné P se vztahovaly zejména k půdním vlastnostem lokality (sdruženému půdnímu typu), druhovému složení porostů (rozdělený SPT), nadmořské výšce a klimatickým parametrům (průměrné roční teploty a srážky) a také ke svažitosti a orientaci svahu (tab. 5).

Jejich vzájemnou kombinací vznikl finální model. Některé proměnné mohou být navzájem zástupné (např. lesní vegetační stupně a nadmořská výška, průměrné roční srážky a teploty). V případě metody *Random Forests* není zástupnost parametrů problémem, ale výhodou, neboť umí velmi dobře využít korelované proměnné. Vždy byl vybrán nejjednodušší model vysvětlující největší množství variability a jeho přesnost byla určena na trénovacím souboru (vzorky použity pro tvorbu modelu) a testovacím souboru (vzorky použity pouze pro verifikaci modelu). Přestože soubory lesních typů vycházely jako významná proměnná pro predikci zásob prvků, zastoupení mnoha SLT je v databázi velmi nízké (1-10 vzorků) a model s použitím SLT je obtížné validovat. Stejná přesnost modelů (jako při použití SLT) byla však dosažena i při použití kombinace LVS, EK a porostních typů. Podobný problém nastal i při použití strukturovaného porostního typu (SPT). SPT byl tedy rozdělen na několik proměnných podle charakteru smíšení a jednotlivých porostních typů, např. proměnná C („čisté“ - jeden porostní typ se zastoupením 90 – 100 %) s kategoriemi porostních typů 1-smrk, 2-jedle atd. Z těchto SPT vycházel nejlépe charakter smíšení P (porostní typ se zastoupením 10 – 29,9 %), kde nižší hodnoty prvků vycházely v případě tohoto procentického zastoupení smrků, popřípadě ostatních jehličnanů. Jako zástupný parametr pak v případě dostatečného množství vzorků s daným zastoupením porostních typů

vystupoval i porostní typ C („čisté“ - jeden porostní typ se zastoupením 90 – 100 %) a Z („základní“ - jeden porostní typ se zastoupením 30 – 49.9 %), opět s nižšími výměnnými/přístupnými obsahy prvků v případě zastoupení jehličnanů a vyššími obsahy, v případě zastoupení listnatých stromů.

Tabulka 5: Nejvýznamnější proměnné pro tvorbu modelu výměnných/přístupných obsahů prvků ve vrstvě 0-30 cm v pořadí podle významnosti (hodnoceno pomocí metody RF), saturace bázemi a výměnné pH:

Ca	Mg	K	P	BS	pH_vym.
edafické kategorie	edafické kategorie	přírodní lesní oblast	přírodní lesní oblast	přírodní lesní oblast	edafické kategorie
přírodní lesní oblast	přírodní lesní oblast	edafické kategorie	edafické kategorie	edafické kategorie	přírodní lesní oblast
P, (Z, C)	intenzita dopadajícího slunečního záření	P, (Z, C)	celková sběrná plocha	nadmořská výška	sdužený půdní typ
sdužený půdní typ	P, (Z, C)	průměrné roční srážky	P, (Z, C)	P	P
edafické kategorie	průměrné roční srážky	sklon	průměrné roční srážky	průměrná roční teplota	průměrné roční srážky
lesní vegetační stupeň	nadmořská výška	sdužený půdní typ	nadmořská výška	celková sběrná plocha	průměrná roční teplota
nadmořská výška	sdužený půdní typ	smíšenost	lesní vegetační stupeň	sklon	sklon
smíšenost	smíšenost	celková sběrná plocha	edafické kategorie	orientace svahu	orientace svahu
průměrné roční srážky	sklon	lesní vegetační stupeň	sdužený půdní typ	sdužený půdní typ	sdužený půdní typ

Tabulka 6: Validace map výměnných/přístupných obsahů prvků, BS a pH ve vrstvě 0-30 cm z modelu RF, WA (weighted accuracy) je vážené procento klasifikace (průměr z procenta správně klasifikovaných vzorků pro jednotlivé kategorie) pro testovací (WA_{cv}) a celkový (WA_{total}) soubor, OA (overall accuracy) je celkové procento správně klasifikovaných vzorků pro testovací (OA_{cv}) a celkový (WA_{total}) soubor.

	WA_{cv} (%)	OA_{cv} (%)	WA_{total} (%)	OA_{total} (%)
Ca	45.3	44.7	45.3	58.4
Mg	33	54.2	39	58.5
K	47.1	41	52.5	46.1
P	38	71	42	74.3
BS	45.8	46.6	53.4	54.2
pH (H_2O)	48.5	74.4	53	76
pH vym	59.5	68.5	55	64

3.4 Mapy kategorií rizika acidifikace pro minerální vrstvy 0 – 30 cm a 30 – 80 cm

3.4.1 Vymezení kategorií na základě měřených půdních vlastností

Jednotlivé kategorie rizika byly definovány na základě výměnné půdní acidity (výměnné pH), nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty (BS%), a obsahu výměnných forem bazických kationtů vápníku (Ca), hořčíku (Mg) a draslíku (K) (tabulka 7).

Tabulka 7: Vymezení kategorií rizika acidifikace lesních půd

Riziko acidifikace	Definice pravidel	Popis
Kategorie 1 Bez rizika / velmi nízké riziko	výměnné pH $\geq 5,0$ a BS $\geq 50\%$	<i>Uhličitanový a silikátový pufrací komplex</i>
Kategorie 2 Nízké riziko	(výměnné pH $\geq 4,2$ a BS $\geq 20\%$ a BS $< 50\%$) nebo (výměnné pH $\geq 4,2$ a výměnné pH < 5 a BS $\geq 50\%$)	<i>Kationtově výměnný pufrací komplex, přijatelná saturace bazickými prvky</i>
Kategorie 3 Střední riziko	výměnné pH $\geq 4,2$ a BS $< 20\%$)	<i>Kationtově výměnný pufrací komplex, nízká saturace bazickými prvky</i>
Kategorie 4 Vysoké riziko	výměnné pH $< 4,2$ a BS $\geq 10\%$ nebo (Ca ≥ 140 mg.kg ⁻¹ a Mg ≥ 20 mg.kg ⁻¹ a K ≥ 30 mg.kg ⁻¹)	<i>Pufrací komplex hliníku a železa, velmi nízká saturace bazickými prvky</i>
Kategorie 5 Extrémní riziko	výměnné pH $< 4,2$ a BS $< 10\%$ a (Ca < 140 mg.kg ⁻¹ nebo Mg < 20 mg.kg ⁻¹ nebo K < 30 mg.kg ⁻¹)	<i>Pufrací komplex hliníku a železa, extrémně nízká saturace bazickými prvky, kritický nedostatek některých bazických živin</i>

3. 4. 2 Tvorba predikčních modelů

Pro tvorbu modelů pro mapování prostorového rozložení pravděpodobností náležitosti území k jednotlivým kategoriím rizika acidifikace byly měřené půdní vlastnosti převedeny na základě definovaných pravidel na tzv. indikátory, tj. hodnoty 0 a 1 (0 – pravidlo nesplněno, 1 – pravidlo splněno). Pro vlastní tvorbu predikčních modelů bylo použito metody náhodných lesů (angl. random forest) spadající mezi techniky strojového učení, kdy je cílová závislá proměnná odhadována na základě jejího vztahu k vysvětlujícím proměnným (prediktorům). Jako vysvětlující proměnné vstupující do predikčních modelů byly použity charakteristiky terénu (nadmořská výška, sklon, orientace svahu, horizontální zakřivení, vertikální zakřivení, index konvergence, celková sběrná plocha, topografický vlhkostní index, LS faktor, úroveň údolnice, vzdálenost k údolnici, hloubka údolí a relativní poloha na svahu), údaje o klimatu (průměrné roční teploty a srážky), informace o půdním typu (sdružený půdní typ) a další stanovištní charakteristiky (druh porostu, edafické kategorie, smíšenost lesa). Pro každou z kategorií rizika acidifikace byl zvlášť kalibrován predikční model.

3. 4. 3 Interpretace modelů a ověření úspěšnosti predikce

Predikční modely pro odhad kategorií rizika acidifikace identifikovaly jako nezávislé proměnné s největším vysvětlujícím potenciálem těchto 8 prediktorů: viz tab. 8.

Tabulka 8: Nezávislé (vysvětlující) proměnné (prediktory) s největším vysvětlujícím potenciálem pro mapování kategorií rizika acidifikace lesních půd

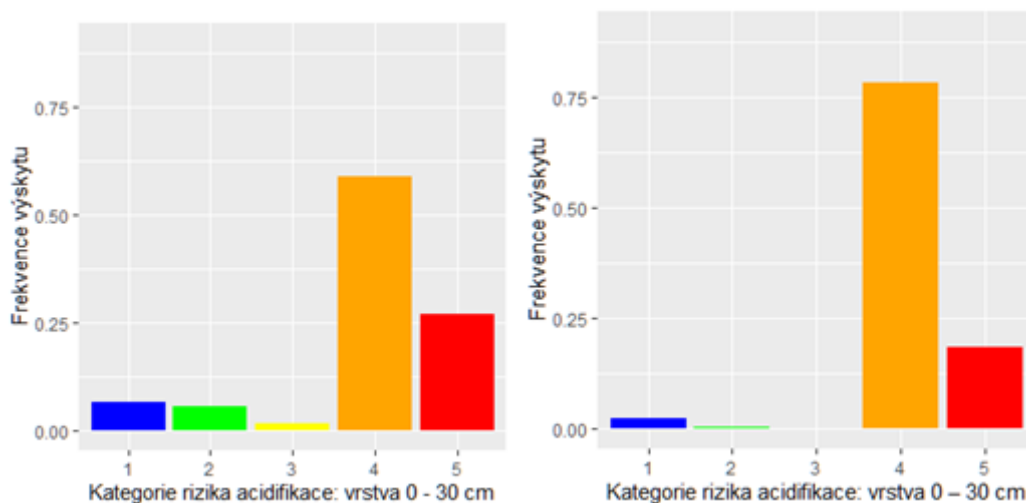
Minerální vrstva 0 – 30 cm	Minerální vrstva 30 – 80 cm
Nadmořská výška	Nadmořská výška
Edafické kategorie	Edafické kategorie
Sdružený půdní typ	Průměrná roční teplota
Výška základní úrovně údolnice	Výška základní úrovně údolnice
Průměrné roční srážky	Orientace svahu vůči světovým stranám
Průměrná roční teplota	Průměrné roční srážky
Intenzita dopadajícího slunečního záření	Intenzita dopadajícího slunečního záření
Orientace svahu vůči světovým stranám	Vertikální zakřivení terénu

Výsledné mapy byly počítány pomocí vybraných predikčních modelů pro lesní půdy celé ČR v pravidelné síti 500 x 500 metrů). Jak je patrné z tabulky 3 a ze sloupcových grafů ilustrujících podíl jednotlivých kategorií rizika acidifikace v databázi měřených půdních vlastností (obr. 2 vlevo), nejvíce sledovaných ploch u vrstvy půdy 0 – 30 cm spadá do kategorie 4 (cca 59 %) a naplňuje tak kritéria pro vysoké riziko acidifikace půdy. Druhou nejčastěji se vyskytující kategorií je kategorie 5 (extrémní riziko), jejíž kritéria jsou naplněna přibližně u 27 % sledovaných ploch. Naopak velmi nízké a nízké riziko bylo identifikováno pouze pro 7, resp. 6 % sledovaných ploch v databázi. Ze všech pěti kategorií je nejméně zastoupená kategorie 3 (střední riziko), která byla zaznamenána jen u 1,6 % sledovaných ploch. Při srovnání se sloupcovým grafem zobrazujícím podíl jednotlivých kategorií u predikovaných dat (obr. 2

vpravo) je patrné četnější zastoupení kategorie 4, než tomu bylo v databázi měřených hodnot, a to cca na 79 %. Naopak u ostatních kategorií došlo k poklesu četnosti jejich výskytu.

Tabulka 9: Srovnání podílu jednotlivých kategorií rizika acidifikace v databázi měřených půdních vlastností a v mapě získané pomocí predikčních modelů pro minerální vrstvu 0 – 30 cm.

Vrstva půdy 0 – 30 cm	Databáze naměřených hodnot		Mapa predikovaných hodnot	
	Počet ploch	Zastoupení v %	Počet ploch	Zastoupení v %
Kategorie 1	237	6,6	2436	2,2
Kategorie 2	209	5,8	522	0,5
Kategorie 3	58	1,6	160	0,2
Kategorie 4	2114	58,8	85693	78,5
Kategorie 5	978	27,2	20375	18,7



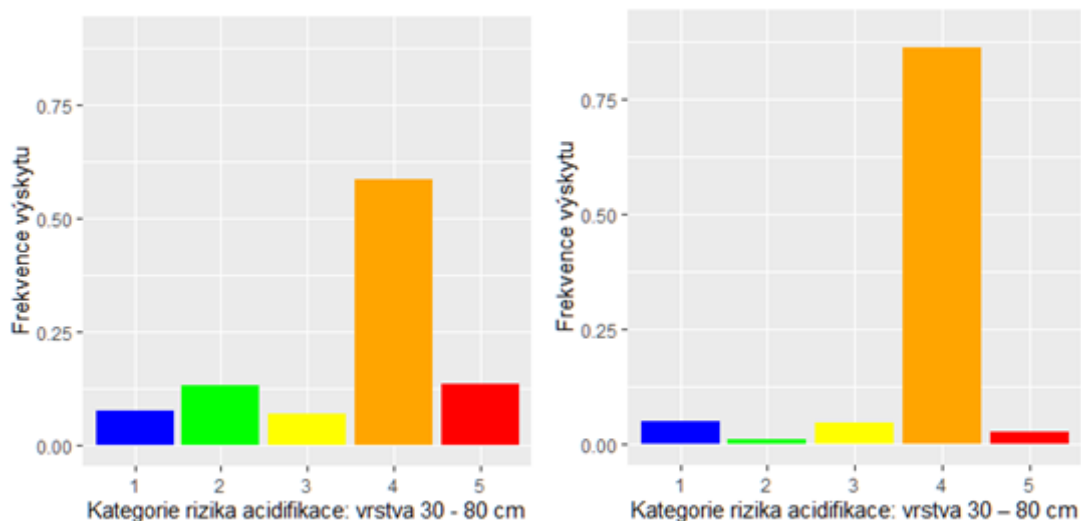
Obr. 2: Frekvence výskytu jednotlivých kategorií rizika acidifikace v databázi měřených půdních vlastností (vlevo) a v mapě pro všechny lesnaté oblasti na území ČR vytvořené pomocí predikčního modelu (vpravo) pro minerální vrstvu 0 – 30 cm.

U vrstvy půdy 30 – 80 cm došlo ještě k výraznějšímu posílení četnosti výskytu ploch spadajících do kategorie 4, a to z cca 60 % v databázi měřených hodnot (obr. 3 vlevo) na 86 % u hodnot predikovaných (obr. 3 vpravo). Nejnižší úbytek četnosti výskytu byl zaznamenán zejména u kategorií 1 a 3, a naopak významný pokles je patrný u kategorií 2 a 5.

Celkově bylo u minerální vrstvy 30 – 80 cm predikováno méně ploch spadajících do kategorie extrémního rizika acidifikace půdy (kategorie 5) než ve vrstvě 0-30 cm.

Tabulka 10: Srovnání podílu jednotlivých kategorií rizika acidifikace v databázi měřených půdních vlastností a v mapě získaná pomocí predikčních modelů pro minerální vrstvu 30 – 80 cm.

Vrstva půdy 30 – 80 cm	Databáze měřených hodnot		Predikce	
	Počet ploch	Zastoupení v %	Počet ploch	Zastoupení v %
Kategorie 1	158	7,6	5557	5,1
Kategorie 2	278	13,3	1180	1,1
Kategorie 3	146	7	5237	4,8
Kategorie 4	1221	58,6	94294	86,4
Kategorie 5	282	13,5	2918	2,7

**Obr. 3:** Frekvence výskytu jednotlivých kategorií rizika acidifikace v databázi měřených půdních vlastností (vlevo) a v mapě pro všechny lesnaté oblasti na území ČR vytvořené pomocí predikčního modelu (vpravo) pro minerální vrstvu 30 – 80 cm.

3.4.4 Tvorba map plošného rozložení kategorií rizika acidifikace

Na základě predikčních modelů pro odhad pravděpodobnosti s jakou daná lesní plocha spadá do konkrétní kategorie rizika acidifikace, byla vytvořena pro každou ze dvou půdních vrstev (tj. 0 – 30 a 30 – 80 cm) sada pěti map, tj. jedna mapa pro každou z kategorií rizika. Finální mapa zachycující prostorové rozložení všech kategorií rizika současně byla potom získána z těchto map pravděpodobností pro jednotlivé kategorie tak, že danému pixelu byla přiřazena ta kategorie, která byla pro daný pixel predikována s největší pravděpodobností. Celkově bylo pro vrstvy půdy 0 – 30 a 30 – 80 cm vytvořeno 12 map (tj. 6 map pro každou ze dvou minerálních vrstev).

3.5 Mapování kategorií rizika acidifikace pro minerální vrstvy 0 – 80 cm

3.5.1 Vymezení ohrožení lesních půd acidifikací a tvorba mapy

Pro celý půdní profil byly na základě map plošného rozložení kategorií rizika pro vrstvy půdy 0 – 30 a 30 – 80 cm vymezeny 4 kategorie ohrožení půd acidifikací (Tab. 11). Výsledná mapa pro celou minerální vrstvu je tedy kompilací map dvou dílčích vrstev a reflektuje tak půdní podmínky v celé minerální vrstvě.

Tab. 11: Vymezení ohrožení lesních půd acidifikací

Riziko acidifikace	Vymezení riziko (0-30cm / 30-80cm)	Popis a doporučená opatření
Kategorie 1 Málo ohrožené půdy	1/1; 1/2; 2/1; 2/2	<i>Obě minerální vrstvy půdy spadají do oblasti bez rizika či nízkého rizika. Půdy jsou mírně či středně kyselé, obsahy bází v celém půdním profilu jsou dostatečné. Speciální postupy k ochraně půdy z hlediska zásoby živin nejsou nutné.</i>
Kategorie 2 Středně ohrožené půdy	2/4; 4/1; 4/2; 4/3; 1/3; 2/3; 3/1; 3/2; 3/3	<i>Nejméně jedna z půdních vrstev je v oblasti středního rizika, v řadě případů je svrchní vrstva půdy v oblasti vysokého rizika s příznivějšími vlastnosti spodních půdních vrstev. Alespoň v části půdního profilu se vyskytuje přiměřený obsah dřevin. V těchto oblastech je vhodné vyvarovat se zakládání smrkových monokultur, které prokořeňují pouze svrchní vrstvy půdy, zaměřit se spíše na smíšené porosty a porosty hlouběji kořenících dřevin, využívat principy biologické meliorace lesních půd prostřednictvím vhodného složení druhové skladby a struktury porostů.</i>
Kategorie 3 Silně ohrožené půdy	4/4; 5/2; 5/1; 1/4; 1/5; 2/5; 3/4; 3/5; 4/5	<i>V celém půdním profilu nebo ve spodních vrstvách půdy převládá vysoké riziko acidifikace, případně se kombinuje extrémní riziko v povrchové vrstvě se středním až vysokým rizikem v hloubce 30-80 cm. Půdy představují hraniční úroveň výživy bazickými prvky, která může být i nevhodná pro druhy náročnější na zajištění výživy. Kromě nedostatku bazických živin se mohou objevovat projevy nedostatku přístupného fosforu. Situace může být dále postupně zhoršována vyšší dostupností dusíku z atmosférické depozice. V těchto oblastech je vhodné omezit postupy zvyšující odnos živin z ekosystému (např. odvoz těžebních zbytků), zajistit průběžný monitoring stavu půd a výživy dřevin a dle lokálních podmínek např. využívat přihnojování výsadeb.</i>
Kategorie 4 Extrémně ohrožené půdy	5/5; 5/4; 5/3	<i>Svrchní vrstva půdy je v oblasti extrémního rizika ohrožení acidifikací, spodní vrstvy v oblasti středního až extrémního rizika. Půdy vykazují nedostatek bazických prvků v celém profilu, v porostech se mohou přechodně i trvale vyskytovat projevy narušené výživy dřevin. Kromě opatření popsaných u silně ohrožených půd je možné v odůvodněných případech uvažovat i o plošné chemické melioraci lesních půd.</i>

4 Citovaná literatura

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

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

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

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

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

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

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

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

PŘÍLOHY

