

ACIDIFIKACE LESNÍCH PŮD JAKO PŘETRVÁVAJÍCÍ DĚDICTVÍ „ŠPINAVÉHO“ 20. STOLETÍ

JAKUB HRUŠKA, FILIP OULEHLE, TOMÁŠ CHUMAN

prof. RNDr. JAKUB HRUŠKA, CSc.
V České geologické službě a Ústavu
výzkumu globální změny AV ČR
se zabývá vlivem kyselých dešťů
a dusíku na lesní ekosystémy
a biogeochemickými cykly ekologicky
významných prvků. V ochraně přírody
se zabývá zejména horskými lesními
ekosystémy.

Mgr. FILIP OULEHLE, Ph.D.
V České geologické službě a Ústavu
výzkumu globální změny AV ČR se
zabývá biogeochemií suchozemských
a vodních ekosystémů. Koloběh
uhlíku, dusíku a fosforu a jejich
vzájemné interakce jsou centrem jeho
současného bádání.

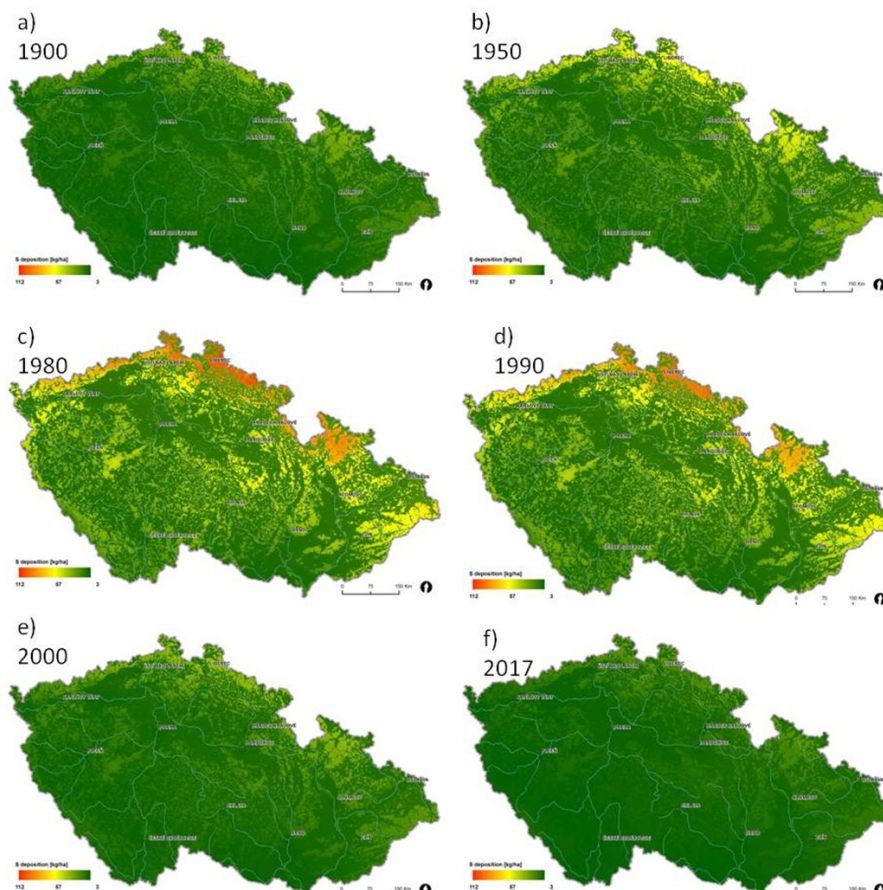
RNDr. TOMÁŠ CHUMAN, Ph.D.
V České geologické službě
a na Katedře fyzické geografie
a geokologie PŘF UK se
věnuje pedologii, krajinné
ekologii a prostorové analýze
environmentálních dat.

Okyselování půd (acidifikace) je spjata zejména s dlouhodobými účinky kyselého deště v druhé polovině 20. století. V 90. letech došlo k masivnímu poklesu emisí síry (která byla hlavním zdrojem kyselého deště ve formě kyseliny sírové), následovaném strmým poklesem depozice síry. V důsledku těchto změn došlo k postupnému zastavení okyselování půd, ale jejich výrazná regenerace je ještě otázkou dlouhých desetiletí.

KYSELÝ DĚŠŤ

Emise síry, zejména oxidu siřičitého (SO_2) a následná tvorba kyseliny sírové v atmo-

sféře byla hlavní příčinou okyselení půd ve střední Evropě. Vlastní vstup do ekosystému pak zajišťovala depozice síry, tedy přímý vstup rozpuštěných kyselin do půdy. Velikost depozice (obr. 1.) až do 90. let 20. století prakticky kopírovala těžbu hnědého uhlí – to je bohaté sírou – a dokud v 90. letech nedošlo k odsíření elektráren a dalších velkých zdrojů (např. tepláren), ale také k útlumu těžby a spotřeby, depozice byla velmi vysoká. Depozice síry na našem území stoupala z hodnot okolo 9 kg/ha/rok okolo roku 1900 (obr. 1) až po vrchol, který nastal v 80. letech minulého století, kdy



Obr. 1. Celková depozice síry na území ČR mezi lety 1900 a 2017. Model podle Oulehle et al. (2016).

v některých oblastech, hlavně severních hor, byla depozice síry okolo 100 kg/ha/rok. Po odsíření a poklesu těžby klesla výrazně depozice již okolo roku 2000 a v roce 2017 již byla průměrná depozice síry okolo 4-5 kg/ha/rok, což je dokonce polovina odhadu pro rok 1900 (obr. 1.).

MECHANISMUS ACIDIFIKACE PŮD

Kyseliny, jež se do půdy dostávají kyselým deštěm, vyplavují z půdy prvky, které jsou důležité pro udržení vyvážené hodnoty půdní kyselosti a které jsou současně nezbytnými živinami pro vegetaci. Jedná se zejména o vápník (Ca) a hořčík (Mg), menší roli hraje draslík (K) a nejmenší sodík (Na). Souhrnně je nazýváme bazické kationty. Tyto prvky jsou schopny po nějakou dobu vyrovnávat (neutralizovat) přísun kyselin z atmosféry. Při této reakci jsou ale nevratně odnášeny z půd do podzemních a povrchových vod.

Vedle množství depozice závislé na imisních poměrech a druhové skladbě a věku lesa rozhodují o stupni okyselení další faktory. Jedním z nich jsou přirozené vlastnosti půd, zejména množství bazických kationtů v půdě. Jejich hlavním zdrojem v půdách je zvětrávání podložních hornin a jejich celkové množství určuje odolnost vůči kyselé depozici. Čím víc je v půdách na výměnných místech sorpčního komplexu bazických kationtů, tím jsou půdy odolnější, protože mohou déle neutralizovat přísun kyselin z atmosféry. Nejméně odolné jsou horské půdy na kyselých horninách (žuly, křemence), které obsahují málo bazických kationtů a tyto horniny pomalu zvětrávají. Prvky v hornině jsou pevně vázány v minerálech a musí se nejprve uvolnit velmi pomalými zvětrávacími reakcemi a přejít do iontové výměnného komplexu půdy. Zejména horské půdy mají malou mocnost a díky nízkým teplotám a pomalému chemickému zvětrávání i přirozeně nízké množství bazických kationtů. To je spolu s drsným klimatem a vysokým přísunem

kyselin důvod, proč se devastující vliv kyselých dešťů projevil v horských oblastech. Lépe jsou na tom půdy nižších poloh a také půdy vzniklé na horninách bohatých na bazické kationty (například vápence a čediče) – zde je riziko okyselení mnohem menší. Acidifikované půdy jsou tedy charakteristické nízkou bazickou saturací, což je poměr ekvivalentové sumy bazických kationtů ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$) ku velikosti výměnné sorpční kapacity půd (CEC). Udává se v procentech nasycení (0% - 100%). Zbývající část CEC je obsazena výměnným hliníkem (Al^{3+}) a vodíkovými ionty (H^+). Hliník je toxický prvek, který se v horninách a půdách běžně vyskytuje, je to třetí nejrozšířenější prvek v litosféře. Pokud ale půdy nejsou okyseleny, vyskytuje se ve formě nerozpustných sloučenin, které nejsou škodlivé, protože je organismy nedokáží přijmout. Jakmile se ale půdní prostředí okyselí, hliník se velmi rychle rozpouští. Pokud kyselost klesne, rychle se opět sráží do nerozpustných sloučenin. Hliníková toxicita půd se nejčastěji projevuje žloutnutím asimilačního aparátu stromů, protože rozpuštěný hliník blokuje příjem hořčíku na kořenových membránách. Hliník také významně inhibuje činnost enzymů, které jsou produkované mikroorganismy v půdách při mineralizaci organické hmoty.

Chemismus typické okyselené půdy z acidifikované oblasti Krušných hor (obr. 2) je charakteristický relativně vysokou bazickou saturací v organických horizontech, kde se zachytávají báze z rozkladu jehličnatého opadu, a posléze velmi nízkou bazickou saturací (4-8%) minerální půdy. Také výměnná acidita (suma Al^{3+} a H^+) s hloubkou profilu klesá – to je způsobeno mimo jiné tím, že s hloubkou klesá i velikost CEC, a absolutní hodnoty výměnné acidity se také snižují. Stejně tak s hloubkou roste pH a rozpust hliníku se snižuje.

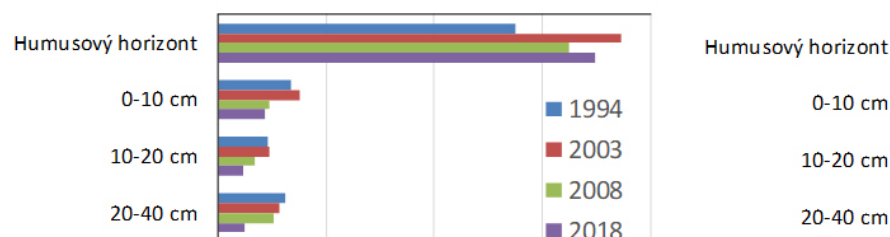
Z výzkumné plochy Načetín (obr. 2) jsou k dispozici opakované analýzy z let 1994, 2003, 2008 a 2018, které ukazují poměrně

malé změny v chemismu půd, přestože depozice síry se v tomto období snížila zhruba o 90 % a acidifikační tlak velmi klesnul. Intuitivně očekávaná regenerace se ale projevila pouze mírným vzrůstem bazické saturace humusového horizontu – z ca. 28 % v roce 1994 na 33-38 % v pozdějším období. Naopak v minerální půdě pozorujeme dokonce mírný pokles bazické saturace. Kleslo, opět ale jen ve dvou svrchních horizontech, i množství výměnného Al a protonů. Regenerace půd je tedy v tomto období poměrně omezená.

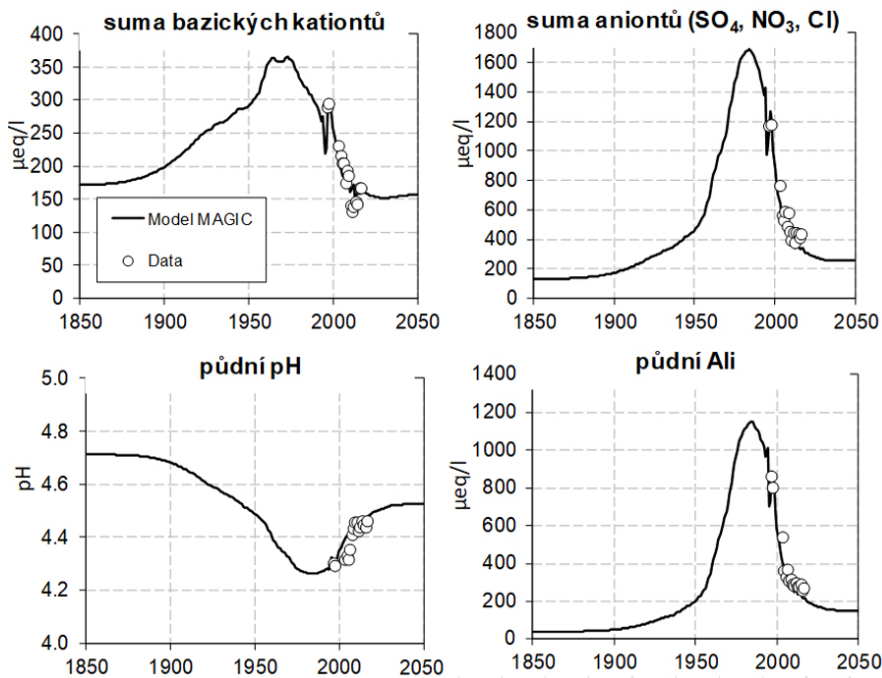
Zásoby uvolnitelných bazických kationtů v iontové-výměnném komplexu totiž vznikaly v půdách zvětráním podloží zejména v období od poslední doby ledové, v našich horských oblastech tedy asi 10 000 let. V důsledku kyselé depozice ale i změn druhové skladby původních lesních porostů na smrkové monokultury, kdy probíhá okyselování půdy rozkladem jehličnatého opadu v kombinaci se zvýšenou kyselou depozicí, byly ale zásoby bazických kationtů vyčerpány v průběhu zhruba poslední stovky let, hlavně však v posledních několika desetiletích. Celý jev je možné jen s malou nadsázkou přirovnat ke změně geologické epochy.

DLOUHODOBÉ TRENDY

Acidifikace je proces dlouhodobý a kumulativní, který se dynamicky vyvíjí. Teprve po určité době se projevují příznaky procesů, které již dlouho skrytě probíhají. Proto je vhodné zabývat se i minulostí a také predikcí budoucnosti acidifikovaných ekosystémů. Pro tento cíl se používají matematické modely simulující dlouhodobý průběh acidifikace. Protože hlavní složkou ekosystému určující jeho odolnost vůči antropogennímu okyselování jsou půdy, zahrnují tyto modely zejména půdní procesy vedoucí k acidifikaci půd a vod. Jedním ze středně komplexních modelů je MAGIC (Model of Acidification of Groundwater In Catchments - Model acidifikace podzemních vod v povodích), vyvinutý v polovině osmdesátých let v USA (Cosby et al., 1985) a od té doby úspěšně aplikován na mnoha místech světa a dále vyvíjen (Oulehle et al., 2015). Jako vstupní parametry pro model jsou použity hlavně současné vlastnosti půd a další experimentálně dosažitelné veličiny. Hlavní řídicí proměnnou celého modelu jsou údaje o časových změnách atmosférické depozice.



Obrázek 2. Vývoj půdního chemismu (bazická saturace a půdní výměnná kyselost) v jednotlivých horizontech v půdách lokality Načetín, Krušné hory, od roku 1994 do roku 2018 (Hruška et al. 2018).



Obrázek 3. Vývoj půdního chemismu v profilu 0-40 cm na lokalitě Načetín. Odhady modelem MAGIC pro období 1850-2050 a měřená data z let 1997-2018 (Hruška et al. 2018).

Vývoj chemismu půdních vod z hloubky 30 cm a současně modelové výpočty pro Načetín v Krušných horách (obr. 3) jsou opět zcela typické pro acidifikované lokality střední Evropy. S nárůstem depozice síry docházelo k nárůstu koncentrací síranů (SO_4) v půdní vodě. Měřená data jsou roční průměry z let 1997-2018, a zachycují již jen fázi poklesu kyselé depozice, která vrcholila v 80. letech minulého století. Síraný jsou dominantní aniont, ale působí acidifikaci půd v součtu i s chloridy (původ v mořském aerosolu, ale také ve spalování uhlí) a dusičnany (NO_3). Ty mají také původ v atmosférické depozici. Do roku 2050 očekáváme již jen malý pokles oproti současnému stavu, protože dnes již velmi nízká depozice síry se do budoucna nebude snižovat. Zvyšování koncentrací síranů v půdním roztoku zvyšovalo vyplavování bazických kationtů (Ca, Mg, K, Na) z iontově výměnných míst půdního komplexu. Protože tento komplex byl v průběhu acidifikace značně vyčerpán, a byla tak snížena významně bazická saturace půdy (obr. 4). Proto při poklesu koncentrací síranů klesly velmi rychle bazické kationty dokonce pod hodnotu, která byla modelována pro období před nástupem acidifikace (ca. do roku 1900). Vyplavování bazických kationtů dosáhlo vrcholu v polovině 80. let, kdy se snižuje i půdní pH na nejnižší hodnoty ($\text{pH} \approx 4.3$). Iontová rovnováha mezi kationty

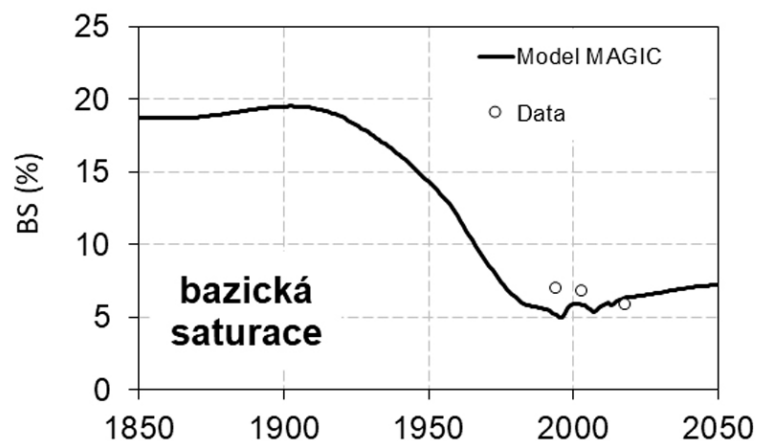
a anionty je v průběhu acidifikace kompenzována zvýšenou koncentrací protonů (snižování pH) a rozpouštěním iontového hliníku (obr. 3), a zvyšuje toxicitu půdního prostředí pro kořenový systém stromů, půdní mikroorganismy a houby. Protože zásoba bazických kationtů, která v půdách zvětrávala za posledních ca. 10 tisíc let byla rychle vyplavena v období zhruba po druhé světové válce, a aktuální zvětrávání podloží není schopno iontově-výměnný komplex rychle doplnit, budou minerální půdy v Krušných horách ještě velmi dlouho acidifikovány. Půdní pH díky chybějícím bázím nedosáhne preindustriální hodnoty (obr. 3), a proto se v půdním roztoku udrží

i vyšší koncentrace hliníku.

Modelovaná bazická saturace (obr. 4) postupně klesala z modelované preindustriální hodnoty ca 19% na současných 6%, přičemž regenerace bazické saturace je do roku 2050 predikována pouze velmi malá (na 7%). Tuto skutečnost ale potvrzují i měřené údaje - bazická saturace mezi lety 1994 a 2018 nevzrostla, dokonce mírně poklesla. To je zapříčiněno zejména nízkou zvětrávací schopností půd, stále pořád poměrně vysokým odnosem bazických kationtů kyselými anionty a částečně i zabudováním bazických živin v lesní biomase. Nezanedbatelný je i pokles atmosférické depozice bazických kationtů.

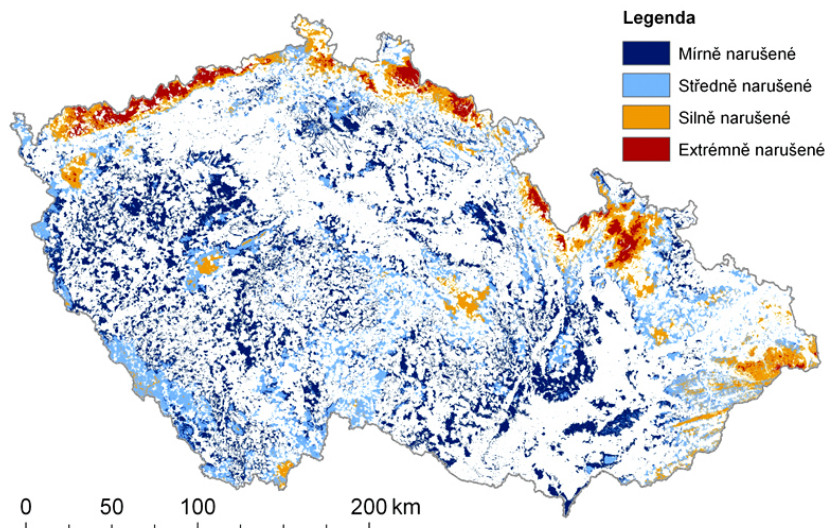
Tento jev by se zdál být v rozporu s poznáním, že bazická saturace svrchní organické vrstvy půdy se po poklesu depozice okyselujících sloučenin zvýšila (obr. 2). Na druhou stranu ale saturace minerální půdy se ve stejném období snížila. Důvodem je již zmiňovaný pokles depozice bazických kationtů a pokračující, byť značně snížený, tlak síranů (obr. 3) na vymývání bází z iontově výměnného komplexu minerálních půd. Ve výsledku se pak průměrná bazická saturace půdy v profilu do hloubky 40 cm prakticky nemění.

Vývoj půdního chemismu se rozpojil - organická vrstva (kde je hlavní kořenová zóna smrkových porostů) částečně zregenerovala, zatímco minerální horizonty pod 20 cm hloubky profilu se dokonce dále mírně okyselily. Podobné výsledky byly naměřeny nejen v Krušných horách, ale i v jiných acidifikovaných oblastech ČR, například ve Slavkovském lese (Hruška et al. 2002) či Jizerských horách (Hruška et al. 2018).



Obrázek 4. Vývoj bazické saturace v profilu 0-40 cm na lokalitě Načetín v Krušných horách mezi lety 1850-2050. Bílá kolečka jsou měřené hodnoty v letech 1994, 2003 a 2018 (Hruška et al. 2018).

Rajonizace ohrožení lesních půd acidifikací a nutriční degradací



Obr. 5. Mapa rajonizace ohrožení lesních půd acidifikací a nutriční degradací (© Česká geologická služba a IFER)

RAJONIZACE OHROŽENÍ PŮD ACIDIFIKACÍ

Náchylnost lesních ekosystémů k zrychlené acidifikaci je ovlivněna řadou faktorů. Za nejdůležitější, jak již bylo popsáno, lze považovat:

1. množství atmosférické depozice okyselujících látek
2. klimatické podmínky
3. půdní/litologické podmínky
4. vlastnosti lesního porostu

Všechny tyto parametry, změřené na konkrétní lokalitě, jako v případě krušnohorské plochy Načetín, lze zpracovat biogeochemickými modely, a udělat poměrně robustní predikci budoucího vývoje. Takto ale nelze zpracovat území celé ČR, protože příslušná měření jsou k dispozici pouze bodově. Proto jsme uplatnili pro vymezení oblastí různě poškozených acidifikací metodu multikriteriální analýzy, do které vstoupily parametry dostupné pro celou ČR – jednalo se o mapy atmosférické depozice síry a du-

síku, teplotní a srážkové mapy, geologickou mapu lesnicko-typologickou mapu.

Výsledkem je mapa acidifikace a nutriční degradace lesních půd (obr. 5), kde jsou identifikovány čtyři stupně ohrožení. Nejohroženější (klasifikovány jako extrémně narušené) jsou půdy v oblastech s historicky vysokou atmosférickou depozicí síry (S) a dusíku (N) v horských oblastech na přirozeně kyselých horninách. Jedná se zejména o oblast severních sudetských pohoří. Prakticky ve všech těchto oblastech došlo od 60. do 90. let 20. století k úhynu, či značnému poškození smrkových lesů. A půdní acidifikace v jejich chřadnutí sehrála velkou roli. Do této oblasti patří i krušnohorský Načetín. Silně narušené oblasti se nacházejí i v Beskydech, vrcholcích Žďárských vrchů, Brd a Slavkovského lesa. Malé oblasti se nacházejí i ve vrcholových partiích Šumavy. Na druhou stranu většina ČR je klasifikována jako acidifikací relativně málo zasažena. Je to zejmé-

na díky poměrně vysokému zvětrávání půd a hornin, které bylo vždy schopno relativně dobře pufovat kyselé vstupy z atmosféry.

SHRNUTÍ

Díky masivnímu snížení emisí síry a dusíku po roce 1989 došlo k poklesu kyselé atmosférické depozice a na přelomu tisíciletí k zastavení okyselování lesních půd a k jejich částečné regeneraci. Na příkladu z lesní výzkumné plochy Načetín v Krušných horách je doloženo, že se stav půd zlepšil v organických půdních horizontech, kde došlo přirozeně ke zvýšení nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty, poklesly koncentrace toxického hliníku a zvýšilo se pH půdních roztoků. Regenerace minerálních půdních horizontů ale dosud nenastala, dokonce došlo k dalšímu poklesu bazické saturace.

Minerální půdy v nejpostiženějších horských oblastech tak nadále zůstanou acidifikované, a to nejméně v horizontu příštích několika dekád.

Vzhledem ke zlepšení chemismu organickým horizontů, kde je lokalizována většina kořenových systémů smrkových porostů, dnes okyselení půd nepředstavuje zásadní riziko pro zdravotní stav lesa. Současně ale není zřejmé, zda v budoucnosti se toto riziko opět neobjeví, a to zejména v souvislosti s odnímáním bazických kationtů intenzivním pěstováním lesů bez adekvátního ponechání části potěžeby zbytků či přímo cíleně části dendromasy k zetlení a regeneraci půd.

LITERATURA:

- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Galloway, J.N., Wright, R.F., 1985. Time scales of catchment acidification: a quantitative model for estimating freshwater acidification. *Environ. Sci. Technol.* 19, 1144–1149.
- Hruška, J., Moldan, F., Krám, P., 2002. Recovery from acidification in central Europe – observed and predicted changes of soil and streamwater chemistry in the Lysina catchment, Czech Republic. *Environmental Pollution* 120, 261–274
- Hruška, J., Oulehle, F., Krám, P., Skořepová, I. 2009. Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy. 2. Vliv depozic síry a dusíku na půdy a lesy. *Živa* 3/2009, 141–144.
- Hruška, J., Oulehle, F., Navrátil, T., Kolář, T., 2018. Výzkum vlivu emisí SO₂ a NO_x na růst smrku. Zpráva, Ústav výzkumu globální změny. AV ČR, 45 stran.
- Oulehle, F., Cosby, B.J., Austnes, K., Evans, C.D., Hruška, J., Kopáček, J., Moldan, F., Wright, R.F., 2015. Modelling inorganic nitrogen in runoff: Seasonal dynamics at four European catchments as simulated by the MAGIC model. *Sci. Total Environ.* 536, 1019–1028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.047>
- Oulehle, F., Kopáček, J., Chuman, T., Černošou, V., Hůnová, I., Hruška, J., Krám, P., Lachmanová, Z., Navrátil, T., Štěpánek, P., Tesař, M., Evans, C.D., 2016. Predicting sulphur and nitrogen deposition using a simple statistical method. *Atmos. Environ.* 140, 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.028>