

# Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy

## I. Emise a depozice okyselujících sloučenin

**Střední Evropa a zejména oblast tzv. Černého trojúhelníku na hranicích České republiky, Polska a Německa byla od 60. let 20. stol. známa jako místo, kde komíny elektráren chrlily do ovzduší nejvíc oxidu siřičitého na celém světě. Kyselý déšť zde usmrtil a poničil rozsáhlé lesy. Jak vlastně kyselý deště působí? A jsou problémem i poté, co emise oxidu siřičitého v uplynulých letech významně poklesly? Odpověď na tyto otázky bychom chtěli poskytnout v sérii tří článků. V první části se zaměříme na prvotní příčinu okyselování, kterou jsou emise a následně depozice síry a dusíku.**

První zprávy o účincích emisí oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>) pocházejí v ČR už z druhé poloviny 40. let 20. stol., kdy byly „kouřové plyny“ považovány za možnou příčinu poškození lesa v Krušných horách. Toto zjištění poněkud zapadlo a v době komunismu se pak o takových věcech mluvit nesmělo. Za počátek odhalení účinků kyselého deště (ve smyslu účinků kyselých depozic, nikoli přímého poškození lesa vysokými koncentracemi SO<sub>2</sub> v ovzduší) se proto všeobecně považuje článek švédského vědce Svante Odéna, který v r. 1967 publikoval ve stockholmském deníku Da-

gens Nyheter zjištění, že deště je kyselý v důsledku lidské činnosti a že ryby z mnoha jezer zmizely kvůli okyselení vody kyselým deštěm. Pikantní na tomto zjištění byla skutečnost, že ve Švédsku se uhlí prakticky nepálilo a domácí zdroje emisí byly v málo zalidněné a vždy k přírodě přátelské zemi velmi malé. Osudné okyselení jezer v celé jižní Skandinávii způsobily kyselý deště, které se do těchto zemí dostaly dálkovým přenosem zejména z Velké Británie, Polska a Německa, tedy ze zemí s průmyslem postaveným na energii získané pálením uhlí v elektrárnách.

V 80. letech 20. stol. se vědecká pozornost soustředila na lesy. Bylo prokázáno, že poškození a odumírání rozsáhlých lesních ploch ve střední Evropě rovněž souvisí s kyselou atmosférickou depozicí a je výsledkem okyselení půd a přímého působení vysokých koncentrací polutantů v ovzduší. Jaké jsou zdroje těchto škodlivin?

### Kyselost srážek

Atmosférické srážky neovlivněné lidskou činností jsou jen velmi slabě kyselé, s hodnotou pH přibližně 5–6. Ještě v nedávné době se hodnoty pH kyselých dešťů v průmyslových oblastech pohybovaly v rozmezí pH 3,5–4,5. Protože pH je logaritmická veličina, kyselý deště jsou při jeho poklesu o dvě jednotky přibližně stonásobně větším zdrojem kyselin pro zemský povrch než přirozená atmosférická depozice.

Kde se kyselý deště, či lépe řečeno kyseliny v deštích vzaly? Uvědomíme-li si jednoduchý princip, že vše, co někde stoupá vzhůru, jinde klesá zpět, je odpověď snadná. Kyseliny v deštích pocházejí ze zemského povrchu a do atmosféry se dostávají prostřednictvím lidské činnosti. Nejvýznamnější z nich jsou kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a dusičná (HNO<sub>3</sub>). Obě vznikají chemickými a fotochemickými reakcemi v atmosféře z oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>) a oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). Podívejme se, jaké jsou hlavní emisní zdroje těchto oxidů.

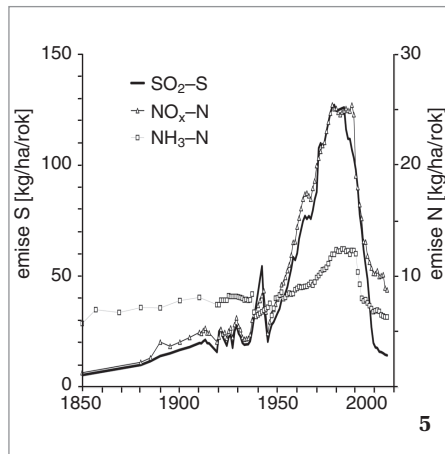
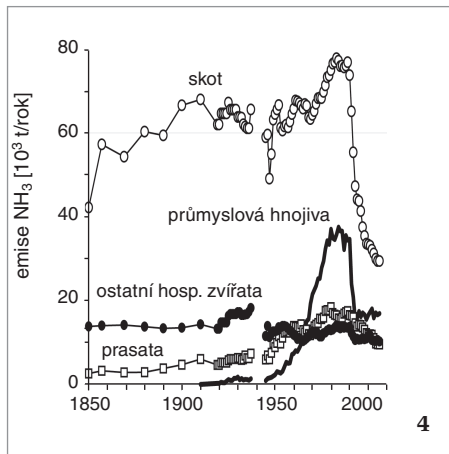
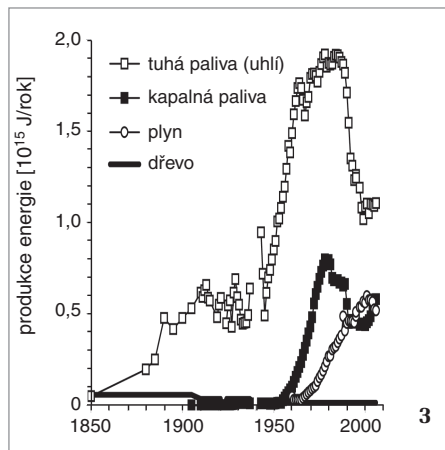
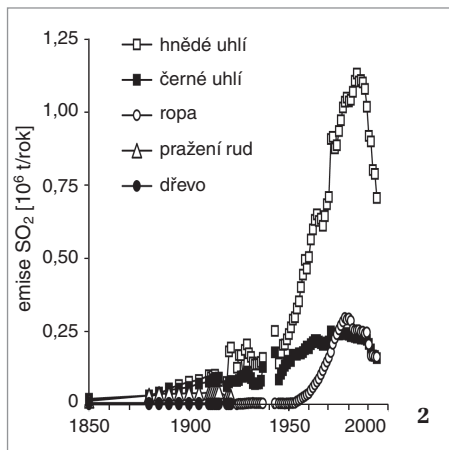
### Emise síry

Přirozeným zdrojem SO<sub>2</sub> na Zemi je sopečná činnost a oxidace sulfanu (H<sub>2</sub>S) vznikajícího při mikrobiálním rozkladu odumřelé biomasy v půdách a sedimentech. Ve 20. stol. se hlavním zdrojem SO<sub>2</sub> stalo především spalování fosilních paliv, jichž je síra (S) přirozenou součástí. Např. černé uhlí obsahuje v průměru 1 % S, ropa 1–3 %, zcela zanedbatelný není ani obsah síry v palivovém dříví (0,1 %). Nejvyšší obsah S (většinou ve formě minerálu pyritu) má hnědé uhlí, které v České republice obsahuje 1–8 % síry. Při spalování se značná část této síry oxiduje a ve formě SO<sub>2</sub> uniká do atmosféry. Dalším zdrojem emisí SO<sub>2</sub> jsou průmyslové výroby zpracovávající síru a sírné rudy. Zatímco pražení těchto rud a spalování dřeva bylo hlavním emisním zdrojem SO<sub>2</sub> na území dnešní ČR v 19. stol., od počátku 20. stol. jednoznačně dominuje spalování uhlí, zejména uhlí hnědého (obr. 2).

Celosvětová antropogenní emise síry vrcholila v 80. letech 20. stol., kdy dosáhla 80 milionů tun za rok a odehrávala se na pouhých 5 % zemského povrchu. Z toho se v Evropě emitovalo 60 milionů tun (obr. 7), bývalé Československo produkovalo 1,5 milionů tun S za rok. Z celosvětového hlediska byla tato antropogenní produkce SO<sub>2</sub> zhruba vyrovnaná s přírodními emisemi, v Evropě však představovaly emise SO<sub>2</sub> ze spalovacích procesů desetinásobek tohoto přirozeného pozadí. Protože SO<sub>2</sub> setrvává



1 I v západních Krkonoších (vrchol Kamence) došlo začátkem 80. let 20. stol. k úhynu lesa vlivem vysokých koncentrací SO<sub>2</sub> v ovzduší. Snímek je z r. 1988. Foto O. Schwarz



2 Historický vývoj hlavních emisních zdrojů  $\text{SO}_2$  na území bývalého Československa. Graf je ukončen obdobím rozvoje odsiřování hlavních zdrojů znečištění.

3 Historický vývoj produkce energie na území bývalého Československa ze spalovacích procesů. Na nárůstu emisí  $\text{NO}_x$  od 50. let 20. stol. se významně podílí spalování benzínu a nafty v mobilních zdrojích (kapalná paliva) zejména díky řádově větší produkci  $\text{NO}_x$  na 1 kg paliva spáleného v zážehových motorech v porovnání s jeho spálením v klasických stacionárních zdrojích – tepelných elektrárnách.

4 Historický vývoj hlavních emisních zdrojů amoniaku na území bývalého Československa. Nejvýznačnějším zdrojem  $\text{NH}_3$  je produkce skotu. Od 60. let 20. stol. se významně uplatňuje výroba a aplikace průmyslových dusíkatých hnojiv a produkce prasat. Emise z chovu ostatních hospodářských zvířat zůstávají stabilní, protože jejich pokles v důsledku klesajících stavů ovcí, koz a koní byl vyrovnán nárůstem emisí ze zvyšující se produkce drůbeže.

5 Historický vývoj měrných emisí  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{NH}_3$  v bývalém Československu. Pravá osa pro N má pětkrát nižší hodnoty než levá osa pro S. Údaje představují průměrné hodnoty emisí pro celé území Československa. V blízkosti emisních center jsou jejich hodnoty až několika-násobně vyšší. Např. roční měrné emise  $\text{SO}_2$  v oblasti tzv. Černého trojúhelníku dosahovaly v 80. letech 20. stol. přibližně 250 kg S na každý hektar této oblasti. Obr. 2–5 podle: J. Kopaček a J. Veselý (2005)

v atmosféře až několik dnů a jeho průměrná transportní vzdálenost se pohybuje ve stovkách km za den, mohou relativně izolovaná emisní ohniska v okolí průmyslových světových center ovlivňovat kvalitu srážek i ve zdlácnivě velmi odlehlých oblastech, včetně např. Grónska či již zmiňované Skandinávie.

### Emise sloučenin dusíku

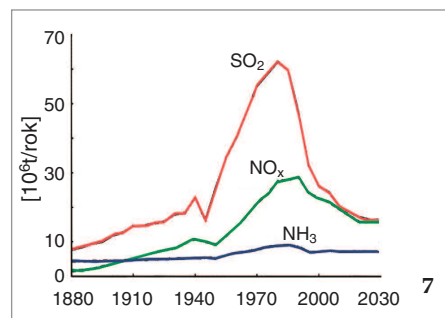
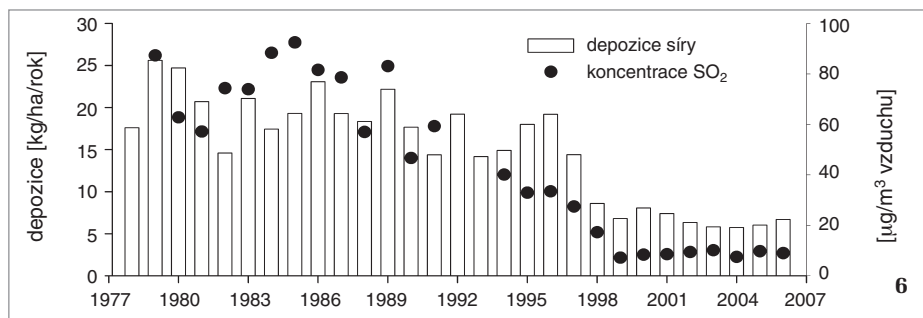
● Emise  $\text{NO}_x$ : Oxidy dusíku se do atmosféry dostávají přirozeně jako produkt mikrobiálních pochodů v půdách, při lesních a stepních požárech a vznikají rovněž při elektrických výbojích v atmosféře. Na území současné Evropy však přirozené emise oxidů N představují pouze cca 3 % úrovně antropogenních emisí, které dosahují přibližně 7 milionů tun dusíku vázaného v oxických formách ( $\text{NO}_x\text{-N}$ , směs  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ ) za rok. Hlavními antropogenními zdroji  $\text{NO}_x$  jsou podobně jako u  $\text{SO}_2$  spalovací procesy. Na rozdíl od  $\text{SO}_2$  však není hlavním zdrojem  $\text{NO}_x$  dusík, který je součástí paliv, ale oxidace vzdušného  $\text{N}_2$  při vysokých teplotách. Antropogenní emise  $\text{NO}_x$  tak závisí nejen na množství spotřebovaného paliva, ale i na způsobu (teplotě a přebytku vzduchu) jeho spálení. Např. při spalování uhlí v běžných stacionárních zdrojích vzniká 2–4 g  $\text{NO}_x\text{-N}$  na každý kg paliva, ale při jízdě osobním automobilem 10–25 g  $\text{NO}_x\text{-N}$  na kg paliva. Při odhadech antropogenní produkce  $\text{NO}_x$  se tak vychází nejen ze struktury výroby energie (obr. 3), ale i z jejího rozdělení mezi stacionární a mobilní zdroje. Podíl mobilních zdrojů v České republice na celkové produkci  $\text{NO}_x$  má trvale rostoucí trend od počátků rozvoje automobilismu až po současnost. Z původních jed-

notek procent ve 30. letech 20. stol. vzrostl na 40 % v 80. letech a v současnosti se blíží západoevropskému průměru 60 % všech emisí  $\text{NO}_x$ .

● Další zdroje kyselin: S atmosférickou depozicí na zemský povrch nedopadají jen kyselina sírová a dusičná, ale především jejich soli. Nejdůležitější z nich je síran a dusičnan amonný. Obě tyto soli vznikají reakcí kyselin s plynným amoniakem ( $\text{NH}_3$ ). Protože je  $\text{NH}_3$  schopen vázat  $\text{H}^+$  tím, že se společně mění na amonný ion ( $\text{NH}_4^+$ ), jeho přítomnost v atmosféře významně snižuje kyselost srážek. V jeho nepřítomnosti by pH srážek v ČR pokleslo z hodnot 4,3–4,5 přibližně na 3,9. Po dopadu na zemský povrch však  $\text{NH}_4^+$  významně přispívá k okyselení půd a vody. Jak je možné, že na jednu stranu amoniak snižuje kyselost srážek a na druhé straně okyseluje půdy? Za tímto zdánlivým rozparem stojí komplex biochemických přeměn  $\text{NH}_4^+$ .

Amonné ionty jsou důležitou živinou pro řasy a rostliny (asimilace) a zároveň „palivem“ pro řadu bakterií, které využívají oxidaci  $\text{NH}_4^+$  na dusičnany jako zdroj energie (nitrifikace). Při asimilaci odčerpává vegetace z půdních roztoků ionty  $\text{NH}_4^+$ , které zabudovává do nové biomasy a nahrazuje je ionty  $\text{H}^+$  v poměru 1:1. V případě nitrifikace se za každý spotřebovaný iont  $\text{NH}_4^+$  do prostředí uvolňují dokonce 2  $\text{H}^+$  ionty. Tyto  $\text{H}^+$  mají původ ve fyziologických pochodech rostlin a uvolňují se téměř za všech podmínek. Okyselení půd je tedy možno způsobit i nadměrným hnojením dusíkatými hnojivy. V prostém součtu to znamená, že biologická spotřeba  $\text{NH}_4^+$  je zdrojem 1–2 iontů  $\text{H}^+$  na každý spotřebovaný atom N a přispívá tak k acidifikaci prostředí více, než kdyby na zemský povrch padal dusík pouze ve formě kyseliny dusičné ( $\text{HNO}_3$ ), nesoucí pouze 1  $\text{H}^+$  na 1 atom N. Díky schopnostem půd zadržovat  $\text{NH}_4^+$  adsorpcí je téměř veškerý  $\text{NH}_4^+$  ze srážek rychle zadržen a postupně využit biomasou za uvolnění  $\text{H}^+$ . Proto atmosférická depozice  $\text{NH}_4^+$  (i hnojení polí či dokonce lesů minerálními amonnými hnojivy) významně přispívá k okyselování půd. Acidifikační potenciál srážek tak do značné míry závisí na obsahu jednotlivých forem N. V evropských srážkách většinou mírně převládá obsah amonného dusíku nad dusičnanovým. Z jakých zdrojů se však amoniak do atmosféry dostává?

● Emise  $\text{NH}_3$ : Na rozdíl od  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  nejsou hlavním zdrojem  $\text{NH}_3$  pro atmosféru spalovací procesy, ale rozklad organických dusíkatých látek. Většina antropogenních emisí  $\text{NH}_3$  (více než 90 %) dnes pochází ze zemědělské činnosti. Největším zdrojem amoniaku je chov skotu a teprve od 60. let 20. stol. se významněji uplatňuje i hnojení zemědělské půdy průmyslovými dusíkatými látkami (obr. 4). Další zdroje, jako např. odpadní vody, divoká a domácí zvířata, průmyslová výroba amoniaku, spalování biomasy a fosilních paliv, se na produkci  $\text{NH}_3$  dohromady uplatňují podílem menším než 10 %. Přírodní zdroje  $\text{NH}_3$  v Evropě nyní představují výrazně méně než 10 % jeho celkových emisí, v celosvětovém měřítku (včetně emisí  $\text{NH}_3$  z oceánů) pak přibližně 25 %.



### Historický vývoj emisí sloučenin S a N

Kolem r. 1850 byly emise  $\text{SO}_2$  na historickém území ČR a Slovenska nízké (6 kg S/ha/rok) a pocházely zejména ze spalování dřeva a pražení rud (obr. 2). Podobně zanedbatelné bylo i znečišťování atmosféry oxidy dusíku pocházejícími z průmyslových a energetických zdrojů (obr. 5). Společně s růstem spotřeby energie (obr. 3) se začaly emise oxidů S a N postupně zvyšovat. Tento trend byl až do 2. světové války relativně pomalý a ustálený (obr. 5). K prudkému zvratu došlo s rozvojem těžkého průmyslu v poválečném období, kdy se úroveň emisí  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  během 30 let více než ztrojnásobila a dosáhla maximálních hodnot v 80. letech (125 kg S a 25 kg N ha/rok). Zásadní zvrat ve vývoji emisí  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  na našem území nastal po politicko-ekonomických změnách v r. 1989, vedoucích k přechodu od centrálně plánované na tržní ekonomiku a k důslednější (evropsky pojímané) ochraně životního prostředí. Tyto změny přinesly jednak prudký pokles spotřeby energií na počátku 90. let, ale také přísnější kontrolu kvality paliv, omezení spalování hnědého uhlí s vysokým obsahem síry a odsíření velkých zdrojů emisí.

Oproti úrovni 1980–89 byla v období 1992–94 spotřeba energie v ČR v průměru nižší o cca 23 %. Energetická základna ČR se v 80. letech z více než 60 % opírala o tuhá paliva. Pokles ve výrobě energie se proto projevil hlavně snížením množství spalovaného uhlí. V následujících letech se na poklesu emisí  $\text{SO}_2$  významně podílela postupná změna palivové základny (plynofikace) a v polovině 90. let pak zásadní roli počalo hrát odsířování hlavních emisních zdrojů. Toto odsíření bylo prakticky dokončeno v r. 1999. Během jedné dekády se podařilo snížit emise  $\text{SO}_2$  z našeho území o téměř 90 % oproti jejich maximu z 80. let a vrátit je na úroveň odpovídající první polovině 20. stol. (obr. 5).

Na rozdíl od  $\text{SO}_2$  se zpočátku velmi razantní pokles emisí  $\text{NO}_x$  zpomalil v polovině 90. let a postupně zastavil (obr. 5) kvůli prudkému rozvoji automobilové dopravy. Podíl mobilních zdrojů je spojen se spotřebním životním stylem, a tak lze v budoucnosti nadále očekávat jeho vzrůstající trend. Současná úroveň emisí  $\text{NO}_x$  na našem území je přibližně o 50 % nižší než její maximum v 80. letech a odpovídá situaci z přelomu 50. a 60. let 20. stol.

Emise  $\text{NH}_3$  se vyvíjely odlišně od emisí oxidů S a N a byly relativně vysoké (6–7 kg N ha/rok) již v 19. stol. Jejich další nárůst byl mírný a probíhal ruku v ruce s rostoucím počtem obyvatel na území současné ČR ze 7 milionů kolem r. 1850 na nyníšších 10 milionů. Shoda mezi produkcí  $\text{NH}_3$  a populační křivkou byla způsobena tím,

že měrné emise  $\text{NH}_3$  z živočišné výroby byly v přepočtu na jednoho obyvatele stabilní až do masivního nástupu průmyslových hnojiv v 60. letech 20. stol. Maximální hodnoty dosáhly v 80. letech 20. stol. a od r. 1989 značně poklesly (obr. 4).

Hlavní vliv na velikost emisí  $\text{NH}_3$  měl zejména chov skotu a hnojení anorganickými dusíkatými hnojivy. Současné stavy skotu na našem území jsou o téměř 50 % nižší než v r. 1989 a dokonce jsou nižší, než byly kolem r. 1850. Rovněž aplikace průmyslových dusíkatých hnojiv se snížila přibližně na polovinu oproti 80. letům na úroveň odpovídající 60. letům 20. stol. Současná úroveň českých emisí  $\text{NH}_3$  je proto o 40 % nižší než v 80. letech 20. stol. a poklesla na úroveň konce 19. stol. (obr. 5).

Obdobné změny jako v České republice nastaly v emisích sloučenin S a N i na území ostatních postkomunistických zemí, hlavně v Polsku a bývalé NDR, což vedlo k prudkému snížení emisí okyselujících látek do atmosféry a rychlému zlepšení kvality ovzduší v celé Evropě. Celoevropské emise  $\text{SO}_2$  (obr. 7) byly nejvyšší začátkem 80. let 20. stol. Západní Evropa své emise snižovala již od 70. let, ale neustálý růst emisí ve střední a východní Evropě tuto snahu v kontinentálním měřítku eliminoval. Teprve v 90. letech dochází k dramatickému poklesu, který se na počátku 21. stol. prakticky zastavil. Prognóza do r. 2030 počítá sice s dalším snížením, ovšem je otázkou, nakolik se ho podaří realizovat. Současná mezinárodní legislativa sahá jen do r. 2010, který je cílovým rokem tzv. Göteborgského protokolu upravujícího národní emisní limity evropských zemí.

Dnešní evropské emise  $\text{SO}_2$  tak jsou zhruba na úrovni 40. let 20. stol. Emise  $\text{NO}_x$  mají svoje evropské maximum až v 90. letech (obr. 7) a jednoznačně souvisejí s rozvojem dopravy. Jejich větší omezování je proto obtížné a pokles je a zůstane pomalý i v budoucnu. Emise  $\text{NH}_3$  jsou poměrně stále již od r. 1880 a jen nepatrně vzrůstají. Malý vrchol je na konci 80. let 20. stol. K drobnému snížení přispěla zejména redukce živočišné zemědělské produkce v bývalém východním bloku. Ve státech západní Evropy je zemědělství na stabilní úrovni již několik desetiletí. Do budoucna nelze za současné zemědělské politiky EU žádné významné redukce očekávat.

Přes značný pokles produkce  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  se ale kyselost srážek snižovala jen pomalu a jejich průměrné pH vzrostlo mnohem méně než o polovinu jednotky pH. Jak je možné, že se kyselost srážek mění tak pomalu? Vysvětlením tohoto jevu je paradoxně další zlepšení kvality ovzduší. Oproti 80. letům se díky odlučováním popílku snížila o více než 90 % emise prachu do

6 Roční deponice síry na volné ploše měřená v malém povodí Jezeří v Krušných horách a průměrné roční koncentrace  $\text{SO}_2$  v letech 1978–2006.

Podle: F. Oulehle a J. Hruška (2009)

7 Dosavadní průběh a odhad vývoje emisí  $\text{SO}_2$  (červeně),  $\text{NO}_x$  (zeleně) a  $\text{NH}_3$  (modře) v Evropě v letech 1880–2030.

Podle: W. Schopp a kol. (2003)

ovzduší. V České republice to představuje pokles z 1,3 milionu t/rok v r. 1980 na současných přibližně 0,06 milionu t/rok. Popílek obsahuje značné množství bazických prvků (Ca, Mg, Na, K), které neutralizují kyseliny ve srážkách. Tím, že poklesla jejich emise, snížil se následný neutralizační efekt. Protože došlo ke snížení emisí většiny prvků rozhodujících o chemickém složení srážek, poměrné zastoupení okyselujících a neutralizujících složek v atmosféře se příliš nezměnilo, zatímco jejich celkové množství významně pokleslo.

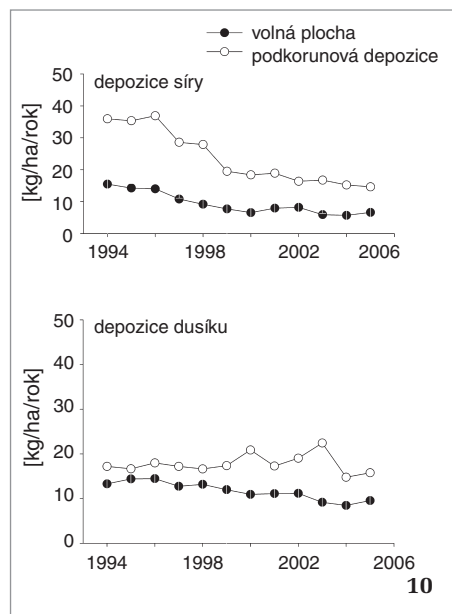
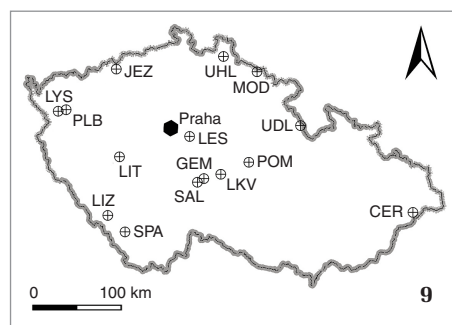
Přes velkou redukci emisí síry i dusíku je ČR státem, který má v rámci Evropy stále nadprůměrné měrné emise obou sloučenin. Naše emise síry jsou stále více než dvojnásobné v porovnání s průměrem EU a i emise  $\text{NO}_x$  jsou o třetinu vyšší. V současné době emituje ČR okolo 200 tisíc tun  $\text{SO}_2$  ročně. Je to zhruba tolik, kolik Švédsko, Norsko a Finsko dohromady, ale zhruba na 15× větším území.

### Atmosférická deponice sloučenin S a N

Kyseliny z atmosféry se na zemský povrch dostávají dvěma mechanismy. Prvním je vlastní kyselý déšť, správněji tzv. mokrá deponice, druhým je tzv. suchá deponice. Ta se uplatňuje v oblastech s vysokými koncentracemi  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  v ovzduší. Vysokými se v tomto kontextu rozumějí průměrné roční koncentrace vyšší než 3 až 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Z tohoto hlediska jsou koncentrace obou plynů v mnoha oblastech ČR stále vysoké. Způsobují je emise z domácích průmyslových zdrojů a dopravy, ale svůj podíl mají i přenosy ze zahraničí. Zhruba 60–80 % deponice S a N na území České republiky pochází ze střeoevropského regionu – Německa, Polska, ČR a Slovenska – a zbytek ze vzdálenějších průmyslových oblastí Evropy.

Mechanismus suché deponice je zhruba následující: plyny a aerosol z atmosféry se zachycují na povrchu vegetace, odkud jsou při nejbližším dešti opláchnuty do půdy tzv. podkorunovou deponicí. Suchá deponice síry tvoří dnes na území České republiky zhruba 50–70 % její celkové hodnoty a je rozhodujícím faktorem okyselování zalesněných oblastí. U dusíku tvoří suchá deponice zhruba 10–50 % celkového spadu a její podíl v posledních

letech roste zejména kvůli emisím  $\text{NO}_x$  z mobilních zdrojů těsně nad zemským povrchem. Obecně platí, že podíl suché depozice na celkovém spadu S a N, ale i celková úroveň tohoto spadu, roste nepřímo úměrně vzdálenosti od emisních zdrojů. Nejvyšší spad bývá v jejich blízkosti, zatímco s rostoucí vzdáleností se zvyšuje podíl mokré depozice a její celková úroveň klesá. V ČR se tento gradient depozice projevila např. značně nižším kyselým spadem na Šumavě než v Krušných a Jizerských horách i Krkonoších, tzn. oblastech v bezprostřední blízkosti Černého trojúhelníku. Úroveň kyselého spadu a podíl suché depozice se dále snižuje s prodlužováním vzdálenosti od emisních zdrojů a s rostoucí čistotou ovzduší. Např. v severním Švédsku je podkorunová depozice jen nepatrně vyšší než na volné ploše – z velmi čisté atmosféry na povrchu smrkových jehlic kondenzuje prakticky pouze voda. Takové čistoty atmosféry ale ve střední Evropě v dohledné době dosaženo nebude a výrazné zvyšování atmosférické depozice prostřednictvím lesů je třeba brát jako fakt i do budoucna.



Nejefektivnější sběrači suché depozice jsou porosty jehličnanů, protože mají ve srovnání s listnatými stromy větší specifický povrch a navíc mají jehličí po celý rok. Depozice do půdy je v případě smrkového lesa zhruba 2–3× vyšší (obr. 10) než v bukovém lese za stejných klimatických, atmosférických a stanovištních podmínek (obr. 8). Pokud by v oblasti žádný les nebyl, depozice by byla pouze zhruba čtvrtinová v porovnání se smrkovým lesem anebo zhruba poloviční v porovnání s bukovými porosty. Příklad na obr. 8 je z povodí Jezeří v Krušných horách a pochází z poloviny 90. let 20. stol. Obdobná situace je na celém území České republiky. Nejvyšší atmosférická depozice existuje tedy ve smrkových lesích, kde také dochází k největšímu poškození půd a jejich největšímu okyselení (viz další pokračování tohoto seriálu). Nejdlejší řada měření atmosférické depozice na volné ploše u nás pochází z malého povodí Jezeří v Krušných horách (obr. 6). Měří se zde od r. 1978 a depozice síry tady klesla z hodnot mezi 20–25 kg/ha/rok v 70. a 80. letech 20. stol. na dnešních zhruba 5–10 kg/ha

8 Schematické vyjádření rozdílu celkové depozice síry ve smrkovém a bukovém lese. Obdobné poměry platí i pro depozici dusíku. Data z povodí Jezeří, Krušné hory, polovina 90. let 20. stol. Podle: M. Havel a kol. (1996)

9 Sít 14 malých lesních povodí GEO-MON založila začátkem 90. let 20. stol. Česká geologická služba. Malé lesní povodí je geologicky a vegetačně homogenní modelové území o velikosti desítek až stovek hektarů, kde veškeré vstupy sledovaných látek do ekosystému představuje atmosférická depozice a veškeré výstupy odtok vody z povodí přes měrný přeliv. Sít byla založena v lesních oblastech porostlých smrkovými lesy a jednotlivá povodí reprezentují typické podmínky oblasti. Primárním účelem je sledování biogeochemických cyklů ekologicky významných prvků a účinků kyselých depozic na půdy, vegetaci a vody. V posledních letech se zde také sleduje vliv klimatické změny na hydrologický režim a biogeochemické cykly prvků. Orig. D. Fottová a F. Oulehle (2008)

10 Průměrná roční depozice síry a celkového dusíku v povodích GEOMON. Od r. 1994 se průměrná depozice síry na volné ploše (ze 14 povodí) snížila ze zhruba 15 kg/ha/rok na dnešních 6–7 kg/ha/rok, zatímco podkorunová depozice klesla ze zhruba 35–40 kg/ha/rok na průměrných 15 kg/ha/rok v posledních letech. Zcela jiná je situace u depozice celkového dusíku. Zde se od počátku 90. let průměrná depozice na volné ploše snížila z 15 kg/ha/rok na 10 kg/ha/rok, ale podkorunová depozice se nijak nezměnila a neustále se drží mírně pod 20 kg/ha/rok. Pro porovnání – hodnota depozice síry v severním Švédsku a Norsku, tedy v oblasti v Evropě nejméně zasažené imisemi, se pohybuje okolo 1–2 kg/ha/rok, a to jak na volné ploše, tak i v podkorunových srážkách. Ani v 80. letech 20. stol. tam nebyla celková depozice síry vyšší než 4 kg/ha/rok a celkového dusíku 3 kg/ha/rok. D. Fottová (2009, nepubl.)

za rok. Za stejnou dobu se průměrná roční koncentrace  $\text{SO}_2$  v ovzduší snížila z 80 až 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na dnešních zhruba 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (obr. 6). Poměr mezi snížením koncentrace  $\text{SO}_2$  v ovzduší (zhruba na 15 %) a snížením depozice síry (zhruba na 30 % původních hodnot) tedy není přímo úměrný. Depozice klesá méně než emise a koncentrace plynného  $\text{SO}_2$  v ovzduší. Je to dáno jednak tím, že část depozice ve formě rozpuštěného  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a jejích solí je transportována z větších vzdáleností, a dále také lepší konverzí plynného  $\text{SO}_2$  na kapalnou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při nižších koncentracích  $\text{SO}_2$  v ovzduší. Proto je depozice síry, ale i dusíku vždy měřitelná i v oblastech, kde jsou velmi nízké koncentrace  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  v ovzduší. Jedny z nejvyšších depozic síry a dusíku v ČR byly naměřeny ve vrcholové partii Orlických hor (až 60 kg dusíku ha/rok a až 50 kg/ha/rok síry koncem 90. let 20. stol.), přestože lokální koncentrace  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  jsou zde na stredo-evropské poměry velmi nízké. Orlické hory leží přímo v cestě převažujícímu západnímu proudění, které přináší do vrcholových partií kyselinu sírovou, dusičnou a jejích amonných solí, které vznikly postupně nad českými průmyslovými a sídelními aglomeracemi obklopenými intenzivní zemědělskou výrobou. Ke značné depozici tady přispívá i relativně vysoké množství srážek a mlhy ve vrcholové části hor. Přestože koncentrace prvků a sloučenin jsou v případě vysokých úhrnů menší než v nižších polohách, nejsou proporcčně nižší než zvýšení srážkových úhrnů na horách. Proto je pravidelně v horských oblastech vyšší depozice než v nížinách.

Vysoké depozice oxysolujících sloučenin tedy nejsou jen doménou oblastí v blízkosti elektráren spalujících uhlí. Mohou být i v relativně čistých oblastech, jako je Šumava, anebo dokonce i v oblastech považovaných obecně za téměř panensky čisté, jako jsou hory Zakarpatské Ukrajiny. Zde jsou v současnosti např. vyšší depozice dusíku než v některých místech Krušných hor a depozice síry je tu prakticky stejná. Zatímco Krušné hory jsou dnes pod převažujícím vlivem západních větrů z téměř dokonale vyčištěné západní Evropy, Zakarpátí je pod převažujícím vlivem ještě ne zcela čisté České republiky, Slovenska a Polska. A ani vlastní ukrajinské zdroje nejsou zanedbatelné.

Celkový obrazek o vývoji kyselých depozic v ČR nejlépe poskytnou měření ze sítě malých povodí GEOMON (obr. 9 a 10). Podkorunová depozice, která zahrnuje i suchou depozici, je stále více než dvojnásobkem depozice na volné ploše.

Střední Evropa tedy má i přes značné zlepšení za posledních 20 let stále poměrně vysokou depozici síry i dusíku a s další výraznější redukcí již nelze do budoucna počítat. Proto bude kyselý déšť i nadále ovlivňovat naše lesy, půdy a vody. Těmto často komplikovaným účinkům budou věnovány další kapitoly seriálu.

*Tento článek vznikl díky projektu CZ0051 podpořenému grantem z Islandu, Lichtenštejnska a Norska prostřednictvím Finančního mechanismu EHP a Finančního mechanismu Norska.*