

VÝVOJ POTENCIÁLNÍCH PODKORUNOVÝCH DEPOZIČNÍCH TOKŮ SÍRY, DUSÍKU A IONTŮ VODÍKU NA ÚZEMÍ PLO KRUŠNÉ HORY V LETECH 2002 - 2005

DEVELOPMENT OF THE POTENTIAL DEPOSITION FLOWS OF SULPHUR, NITROGEN AND HYDROGEN IONS IN THE TERRITORY OF THE KRUŠNÉ HORY MTS. NATURAL FOREST REGION (NFR) IN 2002 - 2005

PAVEL HADAŠ - IVAN BUCHTA

Ústav ekologie lesa, Fakulta lesnická a dřevařská, Mendelova zemědělská a lesnická universita, Brno

ABSTRACT

Damages to forest stands are still urgent in some regions of the Czech Republic despite the current trend of continually decreasing SO_2 and NO_x emissions. Monitoring of the health condition of crowns in forest stands (according to ICP Forests) shows that the Czech Republic has been recently occupying the first place in Europe. Regarding the range of stress factors, one of possible reasons of damages to forest stands appears to be the synergic effect of sulphur, nitrogen and hydrogen ions depositions in combination with the climatic stress. The paper evaluates development of the potential throughfall deposition of hydrogen ions, sulphur and nitrogen in the territory of the Krušné hory Mts. NFR in the period from 2002 - 2005. Potential deposition flows of S, N and H^+ are derived from the model calculations of SO_2 , NO_x (NO and NO_2) gaseous concentrations, and from their dry and wet deposition flows. The calculation of SO_2 and NO_x air pollution concentrations was made by using Gauss model of dispersal SYMOS 97. Derivation of dry sulphur and nitrogen depositions dwells on the application of deposition rates within a resistant model. Calculation of wet sulphur and nitrogen depositions (SO_4^{2-} and NO_3^- components) dwells on parametrizations used in the MESOPUFF II Model. In addition, the calculation makes use of measured meteorological data characterizing dispersal conditions (wind direction and velocity, temperature stratification), concentrations of SO_2 and NO_x in the air and the chemical composition of atmospheric precipitation. The deposition flows were assessed in a network of reference points (1,257) representing forest stand sites in the territory of the Krušné hory Mts. The deposition field structure is based on the current status of emission and air-pollution loads in the Czech Republic and Europe and on meteorological conditions in the period from 2002 - 2005. The spatial distribution of the potential acid throughfall deposition suggests that the value of critical load of acid throughfall deposition (CLH) for spruce was exceeded on 84 - 91% of the area. In respect of eutrophication, the critical load of nitrogen for coniferous stands (CLN) was exceeded on 65 - 96% of the area.

Klíčová slova: acidifikace, eutrofizace, podkorunové depozice síry, dusíku, iontů vodíku**Key words:** acidification, eutrophication, throughfall depositions of sulphur, nitrogen and hydrogen ions

ÚVOD

Z analýz odborných studií vyplývá, že ukládání sloučenin síry a dusíku přispívá k okyselování půdy a povrchových vod a k vymývání živin významných pro rostliny a poškozuje flóru i faunu (Kolektiv 2005b). K poškození a odumírání lesních porostů dochází vlivem znečišťování ovzduší SO_2 a NO_x . Oxidace SO_2 a NO_x v atmosféře a následné rozpuštění produktů oxidace v dešťových kapkách vytváří kyselinu sírovou, kyselinu dusičnou a jejich soli. Podle Brönsted-Lowryho koncepce, kyselina je sloučenina, která obsahuje vodík. Ve vodných roztocích kyselin se uvolňuje proton – vodíkový iont. Depozice vodíkových iontů z antropogenních emisí SO_2 a NO_x v lesním ekosystému je příčinou zvyšování (resp. prohlubování) acidifikace půdního prostředí. Tvorba protonů z depozicí SO_2 , NO , NO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- v lesním ekosystému byla na základě experimentálních měření lyzimetrických a gravimetrických vod potvrzena řadou experimentálních měření prováděných v minulosti (LOCHMAN 1985, 2000, HERTZ, BUCHER, RIEDMANN 1992, FOTYMA 1999) i v současné probíhající experimentech (KULHAVÝ, DRÁPELOVÁ 2006). V přírodních lesních oblastech ČR dosahují depoziční toky síry a dusíku

hodnot, které překračují jejich nejvyšší přípustné kritické dávky stanovené například pro nejvýznamnější hospodářské dřeviny smrk, buk, dub a borovice. I ve vládním usnesení č. 22 z ledna 2004 se uvádí, že vzhledem k dlouhodobé imisní zátěži představuje i současná úroveň znečištění ovzduší a atmosférické depozice nadále vážné riziko pro stabilitu lesních ekosystémů v exponovaných oblastech. Na území České republiky se tento typ poškození lesních porostů projevuje zejména v horských oblastech od nadmořské výšky cca 700 m.

První důkazy o acidifikaci lesních půd a degradaci lesních ekosystémů vlivem atmosférické depozice podávají o několik let později ULRICH et al. (1980). Acidifikace lesních půd je chápána jako přirozený proces, vyvolávající odvápnění a podzolizaci, avšak vstupem kyselé antropické depozice H^+ se tento proces výrazně urychluje. Po vniknutí kyselé depozice do půdy se rozbíhá řetězec reakcí, které po vyčerpání pufrovací schopnosti půdy způsobují okyselování, jenž zrychluje půdní acidifikaci. Výsledkem rostoucí kyselosti půdy jsou vytvářeny iontové sloučeniny půdních minerálů (Al, Mn, Fe) těžkých kovů a metaloidů, které označujeme jako kationtové kyseliny. Kationtové kyseliny mohou vytvářet v reakci s vodou protony, které představují pro kořenový systém rostlin a půdní mikroorga-

nismy potenciální buněčné jedy (ULRICH 1987). Vedle acidifikace dochází v lesních porostech i k eutrofizaci, která je vyvolána depozičním tokem dusíku z emisí NO_x a amoniaku.

Z výsledků šetření zdravotního stavu lesních porostů na území České republiky v rámci ICP Forests (Kolektiv 2003a, b, 2005, 2006a, b) dále vyplývá, že defoliace jehličnatých dřevin (hlavní dřevinou je smrk *Picea abies*) věkové kategorie nad 60 let již od roku 2001 vykazuje téměř setrvalý stav s nepatrnými výkyvy. Suma defoliace tříd 2 + 3 + 4 se zvýšila z hodnoty 62,6 % dosažené v roce 2004 na 62,7 % v roce 2005. Třída defoliace 2 se u jehličnatých dřevin zvýšila z hodnoty 61,5 % v roce 2004 na 61,7 % v roce 2005. Jen u 9,7 % všech sledovaných jehličnatých dřevin nebylo zjištěno žádné poškození, případně defoliace dosahuje hodnoty jen do 10 %.

Za vývojem zdravotního stavu lesních porostů na území ČR stojí i nadále působení emisí SO_2 i NO_x . Po výrazném snížení emisí SO_2 a NO_x během devadesátých let, pozorujeme cca od roku 2001 trend velmi malého poklesu resp. stagnaci emisí SO_2 a velmi malý růst resp. stagnaci emisí NO_x . Roční objem emisí SO_2 ze států střední Evropy (Česká republika, Polsko, Německo, Rakousko, Maďarsko, Slovensko) se v letech 2001 až 2005 pohyboval v rozmezí 2,1 - 3,1 mil. tun, roční objem emisí NO_x se pohybuje v rozsahu 2,7 - 3 mil. tun. Je zřejmé, že vzhledem ke krátkodobým klimatickým výkyvům a stále velkým objemům emisí oxidu síry a oxidů dusíku vypouštěných z emisních zdrojů z území celé Evropy dochází i nadále k „udržování“ defoliace jehličnatých i listnatých porostů na území České republiky v letech 2002 až 2005 na nejvyšších hodnotách v Evropě. Tento stav je způsoben tím, že i nižší koncentrace škodlivin a zejména vstup kyselých depozic z emisí SO_2 a NO_x v kombinaci s krátkodobými nepříznivými klimatickými situacemi (např. střídáním teploty vzduchu v předjaří, prodlužováním vegetačního období, ukončené rychlým nástupem zimy) vyvolává poškození dřevin. Například na konci zimy 2004/2005 (v polovině března 2005) se nad střední Evropou vytvořila synoptická situace, která byla příčinou rychlého růstu teploty vzduchu na území PLO Krušné hory v nadmořských výškách kolem 1 100 m n. m. nad +10 °C (17. 3. 2005 +10,7 °C). Během následujících dvou dnů se dostavilo silné ochlazení, teplota vzduchu opakovaně klesala pod hodnotu -3 °C (20. 3. 2005 -3,8 °C).

METODIKA

Je zřejmé, že intenzitu acidifikace a eutrofizace lesních porostů na území přírodních lesních oblastí České republiky nejvíce ovlivňuje úroveň depozičních toků síry a dusíku, jejichž zdrojem jsou antropogenní emise oxidu siřičitého a oxidů dusíku. Cílem této studie bylo pomocí modelového výpočtu vyhodnotit v letech 2002 - 2005 vývoj potenciálních depozičních toků síry, dusíku a iontů vodíku na území přírodní lesní oblasti (dále jako PLO) Krušné hory. Cílem depoziční studie bylo rovněž na základě porovnání odvozených depozičních toků s kritickými dávkami posoudit úroveň acidifikace a eutrofizace pro jehličnaté porosty, stanovit podíl námrazy na vstupu kyselých depozic, stanovit podíl použitých emisních zdrojů na celkové potenciální kyselých depozici vodíkových iontů.

Modelový výpočet depozičních toků síry, dusíku a kyselých depozic H^+ byl počítán z plynných koncentrací SO_2 , NO_x (jako NO a NO_2) a z jejich suchých i mokrých depozičních toků. Výpočet suchých depozicí síry a dusíku je prováděn přes výpočet depozičních rychlostí pomocí rezistenčního modelu. Modelově odvozená

intenzita suchého usazování se označuje jako potenciální suchá depozice. Lze ji charakterizovat jako tzv. rychlost suché depozice podle vztahu

$$D = v_d C_{(z)}, \quad (1)$$

kde D je kontinuální tok plynných nebo tuhých částic z atmosféry k zachytnému povrchu (vyjádřený např. v $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), v_d je rychlost suché depozice částic v hladině z (m s^{-1}), $C_{(z)}$ je imisní koncentrace částic (plynné směsi) nad povrchem v hladině z (mg m^{-3}). Nejdůležitější parametr je rychlost suché depozice v_d , kterou je možno interpretovat i jako tloušťku horizontální vrstvy ovzduší, z níž je daná příměs za jednu sekundu deponována na zemský povrch. Pro odhad rychlosti suché depozice se používá rezistenční model, který vychází z meteorologických dat, charakteristik povrchu a vegetačního pokryvu. Při výpočtu rychlosti suché depozice se vychází ze vztahu

$$v_d = 1 / (r_a + r_b + r_c), \quad (2)$$

kde r_a reprezentuje aerodynamický odpor (rezistenci) nad zemským povrchem nebo pokryvem (přenos z přízemní vrstvy atmosféry k laminární mezní vrstvě), r_b reprezentuje odpor laminární vrstvy povrchu nebo pokryvu (přenos přes laminární mezní vrstvu k povrchu) a r_c představuje odpor vrstvy pokryvu nebo povrchu.

Aerodynamický odpor závisí na rychlosti větru, na vlastnostech povrchu nebo pokryvu (na drsnosti povrchu) a na atmosférické stabilitě. Pro výpočet depozičních rychlostí byl použit postup podle BAERA a NESTERA (1988).

Depoziční rychlosti byly odvozeny samostatně pro síru a pro dusík. V tabulce 1 jsou uvedeny základní statistické parametry pro odvozené depoziční rychlosti použité ve výpočtu depozičních toků v roce 2002 až 2005. Depoziční rychlosti byly odvozeny z termínového měření (7, 14, 21 hod. SEČ) mezi výškovým profilem stanic Milešovka - Kopisty, Milešovka - Tušimice, Milešovka - Teplice, Lysá hora - Jablunkov, Lysá hora - Mošnov a z aerologického měření stanice Praha-Libuš.

Dalším důležitým parametrem pro stanovení celkové potenciální depozice síry, dusíku a kyselých depozic podle rovnice (1) je proměnná $C_{(z)}$. Jedná se o imisní koncentrace SO_2 a NO_x . Pro stanovení proměnné $C_{(z)}$ je použit modelový výpočet, jehož základem je metodika určená pro kontrolu emisních a technických parametrů zdrojů (BUBNÍK 1979) a metodický pokyn MŽP ČR, odboru ochrany ovzduší, pro výpočet znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů „Systém modelování stacionárních zdrojů (dále jako SYMOS 97)“ (BUBNÍK, KEDER, MACOUN, MAŇÁK 1998). Základní kroky výpočtu

Tab. 1.

Interval depozičních rychlostí pro síru a dusík [cm s^{-1}] odvozených pro roky 2002 - 2005 nad lesním porostem
Interval of the deposition rates for sulphur and nitrogen derived for the years 2002 - 2005 above the forest stand

Rok/Year	Interval v_d for sulphur	Interval v_d for nitrogen
2002	0,3265 – 0,4674	0,6028 – 0,6983
2003	0,1322 – 0,7753	0,2804 – 0,8380
2004	0,3863 – 0,4447	0,4725 – 0,7439
2005	0,1044 – 0,5214	0,1357 – 0,9295

jsou založeny na této metodice. Model je dále doplněn o procesy chemické transformace, dálkového transportu emisí s využitím trajektoriového modelu a o zařazení větrných růžic (směru a rychlosti větru) charakterizující místní a regionální rozptyl emisí. Při výpočtu suché depozice se uplatňují procesy transformace SO_2 na SO_4^{2-} , NO_x na HNO_3 , vymývání SO_2 a SO_4^{2-} , NO_x a NO_3^- srážkami.

Metodiku SYMOS 97 je možné používat jen pro zdroje, jejichž vzdálenost od referenčních bodů je menší nebo rovna 100 km. U emisních zdrojů se vzdáleností nad 100 km je rozptyl emisí v ovzduší řešen na základě modelování přenosu znečišťujících látek v územním měřítku střední Evropy. Pro tyto zdroje se aplikuje trajektoriový model, jehož metodický základ představuje model Matematicko-fyzikální fakulty University Karlovy (dále jako MFF UK) (BAŤKA, BEDNÁŘ, BRECHLER, KOPÁČEK 1984).

Při výpočtu mokré depozice síry a dusíku se vychází z parametrizace použité v modelu MESOPUFF II (1994). Mokrá depozice je závislá na množství atmosférických srážek. Proto se ve výpočtu mokré depozice vychází z měřených srážkových úhrnů a z jejich prostorového rozložení jak ve vertikálním (vzhledem k nadmořské výšce), tak horizontálním směru. Prostorové srážkové úhrny v síti gridů jsou získány na základě aplikace orografické interpolace (vertikální a horizontální interpolace) denních srážkových úhrnů změřených v roce 2002 - 2005 v síti klimatologických a srážkoměrných stanic.

Odvozené hodnoty potenciální suché, mokré a kyselé depozice reprezentují hodnoty nad lesním porostem. Z měření podkorunových srážek (Kolektiv 2003a, 2004a, 2005c, 2006c) a z jejich chemické analýzy vyplývá, že depozice zachycené porostem jsou v průměru 2 až 3krát vyšší než depozice ve srážkách na volné ploše. Podkorunová depozice byla odvozena na základě porovnání hodnot mokrých depozic síry a dusíku (wet-only, bulk a throughfall), které jsou sledovány v rámci monitoringu na území ČR. Zjištěný poměr byl použit pro přepočet modelově odvozených potenciálních depozic síry a dusíku na volné ploše nad lesním porostem.

Pro území PLO Krušné hory bylo možné na základě hustoty pokrytí povrchu jehličnatých porostů (v procentech) odvodit depozici síry a dusíku zachycenou tímto lesním porostem. Vycházelo se z předpokladu, že 100% pokrývnost lesního porostu zachytí přes podkorunové srážky nejvyšší podkorunovou depozici (stanovená v rámci chemické analýzy podkorunových srážek). Plochu bez porostu bude reprezentovat (0% pokrývnost) hodnota depozice volné plochy (jedná se o imisní holiny, vodní plochy, louky atd.). Údaje o pokrývnosti byly získány pro každý referenční bod z družice Landsat (Stoklasa Tech.). Výpočet potenciální podkorunové depozice byl proveden na základě Lagrangeova interpolačního polynomu (VITÁSEK 1987), který vychází z výše uvedeného předpokladu a depozice na volné ploše. To znamená, že podkorunová depozice v jehličnatém porostu se bude pohybovat mezi depozicí volné plochy a nejvyšší podkorunovou depozicí při 100% pokrývnosti.

Přepočet depozic oxidu siřičitého, oxidů dusíku, síranů, dusičnanů na čistou depozici síry a dusíku byl proveden pomocí stechiometrických faktorů, který se odvozuje podle poměrné atomové hmotnosti jednotlivých prvků, tvořících stanovenou složku. Oxidy dusíku jsou ve výpočtu rozděleny na složku NO a NO_2 . Poměr byl stanoven na základě měření imisních koncentrací NO, NO_2 a NO_x prováděných na území ČR (Kolektiv 2003a, 2004a, 2005c, 2006c). Například pro rok 2004 byly oxidy dusíku rozděleny v poměru 0,25 na NO a 0,75 na NO_2 , ve výpočtu pro rok 2005 v poměru 0,21 na NO a 0,79 na NO_2 .

Potenciální depozice S byla stanovena na základě součtu síry z SO_2 a SO_4^{2-} , potenciální depozice N byla stanovena součtem dusíku z NO, NO_2 , NO_3^- a NH_4^+ . V závěrečné fázi výpočtu potenciální podkorunové depozice síry a dusíku byl odvozen příspěvek obou činitelů v potenciální kyselé depozici, která vyjadřuje množství vodíkových iontů v jednotkách mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$. Ve výpočtu a mapování kritických dávek v Evropě (POSCH, SMET, HETTELINGH, DOWNING 1999) produkuje S v množství $1 \text{ g m}^{-2} 312,5 \text{ mol. H}^+ \text{ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$, dusík v množství $1 \text{ g m}^{-2} 714,28 \text{ mol. H}^+ \text{ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$.



Obr. 1.

Geografická poloha PLO Krušné hory, ve kterém byl proveden modelový výpočet podkorunových depozičních toků síry, dusíku a H^+ pro období 2002 - 2005

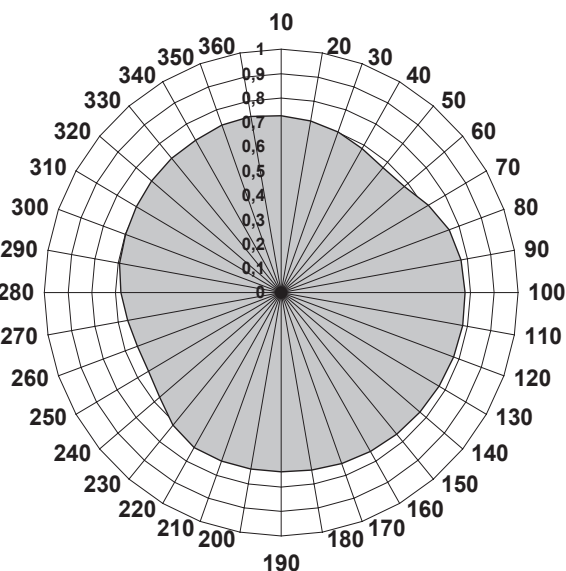
Geographical position of the NFA Krušné hory Mts. in which the model calculation of throughfall sulphur, nitrogen and H^+ depositions for 2002 - 2005 was made

VSTUPNÍ DATA

V modelovém výpočtu celkové potenciální depozice síry a dusíku se uplatňují údaje popisující charakter reliéfu (pomocí sítě referenčních bodů), údaje o množství SO_2 a NO_2 z emisních zdrojů i jejich technické parametry (výšky komínů, tepelná vydatnost, délka provozu v roce atd.), meteorologické údaje definující rozptylové a depoziční podmínky (směr a rychlost větru, teplotu vzduchu, množství atmosférických srážek, globální záření, vlhkost vzduchu) a imisní podklady (Kolektiv 2003a, 2004a, 2005c, 2006c) potřebné ke kalibraci (SO_2 , NO_x , NO , NO_2) i k chemické redukci (O_3).

Síť referenčních bodů (gridů) byla vytyčena tak, aby reprezentovala hlavní tvary reliéfu studovaného území – náhorní plošiny, vrcholové polohy, svahy a význačná údolí. V síti gridů byl proveden výpočet potenciálních depozičních toků síry, dusíku a iontů vodíku. Území PLO Krušné hory (viz obr. 1) lze rozdělit do dvou od sebe odlišných částí: na horskou část, pro kterou jsou charakteristické náhorní plošiny s nejvyššími nadmořskými výškami přes 1 100 m n. m., a na část svahů, od jejich úpatí až po výšku cca 600 m n. m. Z topografické mapy 1 : 50 000 byly definovány geografické souřadnice (zeměpisná délka, šířka a nadmořská výška) pro 1 257 referenčních bodů (gridů).

Pro charakterizování vlivu reliéfu na rozptyl škodlivin mezi emisním zdrojem a referenčním bodem se v metodice SYMOS 97 používá koeficient terénu η . V každém referenčním bodu byly pro celý horizont v kroku 10° (od severu přes východ, jih, západ zpět k severu) vytyčeny řezy s profily reliéfu do vzdálenosti 100 km (tzn. že referenční bod byl ve středu kružnice s poloměrem 100 km). Pro každý referenční bod a každý směr větru po 10° byla vytvořena matice koeficientů η . Hodnoty koeficientů η se pohybují od 0 - 1,



Obr. 2.

Závislost koeficientu η (průměr z 1 257 gridů) na směru větru na území PLO Krušné hory. Koeficienty η reprezentují charakter reliéfu a jeho vliv na depoziční toky síry a dusíku.

Dependence of coefficient η (average from 1,257 grids) to the wind direction on the territory Krušné hory Mts. The coefficient η represented character of terrain and its effects on the deposition flows of sulphur and nitrogen deposition.

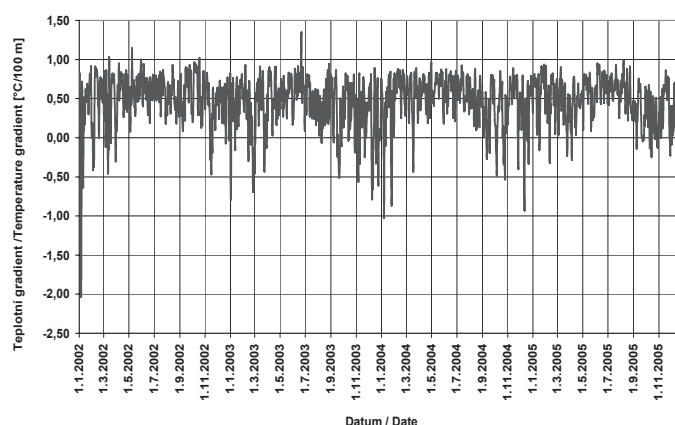
hodnota 0 charakterizuje absolutně plochý rovinný terén, hodnota 1 charakterizuje maximálně zvlněný hornatý terén. Reálné hodnoty území PLO Krušné hory se pohybují v intervalu 0,5 – 0,8. Pro předstihu používaných reálných hodnot jsou na obrázku 2 vyhodnoceny průměrné hodnoty koeficientů η pro jednotlivé směry větru (po 10°) z celkového počtu 1 257 referenčních bodů (gridů).

Z obrázku vyplývá, že z globálního pohledu se do koeficientů η prosazuje protažený tvar JZ až SV směru Krušných hor. V sektorech $250 - 260^\circ$ a $40 - 60^\circ$ omezuje členitý charakter reliéfu šíření imisí o 14 - 17 % více než při proudění vzduchu ze sektorů $90 - 170^\circ$. To znamená, že imise z českých zdrojů mají při proudění vzduchu z jihovýchodních, jižních a jihozápadních směrů „snadnější přístup“ do oblasti Krušných hor než imise z německých a částečně i polských zdrojů při proudění vzduchu ze severozápadního, severního a severovýchodního směru.

Imisní pole SO_2 a NO_x a jejich suché a mokré depoziční toky se mění v závislosti na podmínkách rozptylu emisí, tj. na směru a rychlosti proudění vzduchové hmoty, na teplotním zvrstvení, na množství atmosférických srážek, na množství emisí SO_2 a NO_x a jejich pozici vzhledem k poloze území PLO Krušné hory. Proto mezi faktory, které mají největší vliv na hodnotu depozičních toků síry a dusíku, patří četnost směrů a rychlost větru. V tabulce 2 jsou pro meteorologické stanice Kopisty (240 m n. m.), Karlovy Vary (603 m n. m.), Milešovka (836 m n. m.) a Praha-Libuš uvedeny relativní četnosti směrů větru za období 2002 - 2005.

Stanice Praha-Libuš reprezentuje proudění vzduchu v izobarické hladině 850 hPa (leží v intervalu 1 250 až 1 600 m n. m.), charakterizuje proto větrné poměry dálkového transportu škodlivin SO_2 a NO_x v ovzduší. Ostatní stanice reprezentují regionální nebo lokální přenos transportu škodlivin SO_2 a NO_x v ovzduší. Zpracování větrných růžic vychází z měření v klimatických termínech 7, 14, 21 hod. (měřená data poskytl ČHMÚ).

Z tabulky 2 vyplývá, že směr větru vykazuje v každém roce určitou proměnlivost četností. S růstem nadmořské výšky se proměnlivost směrů větru mezi jednotlivými roky zvyšuje. Nejvyšší proměnlivost četností v intervalu 3 až 4 % vykazují v přízemní vrstvě ovzduší



Obr. 3.

Vývoj teplotní stratifikace podle průměrné denní hodnoty teplotního gradientu odvozeného z měření v termínech 7, 14 a 21 hod. na meteorologické stanici Milešovka a Kopisty v letech 2002 - 2005

Development of stratification of temperature determined according to the average daily value of temperature gradient estimated from measurement in terms 7, 14 and 21 hours on the meteorological station Milešovka and Kopisty in 2002 - 2005

Tab. 2.

Relativní četnosti směrů větru [v %] meteorologických stanic použitých pro modelové výpočty imisních koncentrací SO₂ a NO_x charakterizujících dálkový a lokální transport polutantů v oblasti Krušných hor v letech 2002 - 2005

Relative frequencies of wind direction [in %] as measured by meteorological stations used for the model calculations of SO₂ and NO_x air pollution concentrations characterizing the long-distance and the regional and local transport of pollutants in the region of the Krušné hory Mts. in 2002 - 2005

Stanice rok/Station year	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm
Regionální a místní transport SO ₂ a NO _x /Regional and local transport									
Kopisty 2002	7,4	11,6	14,4	8,0	9,7	12,6	16,1	8,2	12,0
Kopisty 2003	7,1	8,9	14,6	7,9	7,1	10,6	15,2	10,3	18,3
Kopisty 2004	6,9	9,8	10,6	9,6	6,6	17,2	17,9	11,0	10,4
Kopisty 2005	6,1	10,3	12,5	9,3	7,0	13,0	19,3	10,0	12,4
Diference 2002 - 2005	1,3	2,7	3,8	1,7	3,1	2,4	4,1	2,8	7,9
Karlovy Vary - letiště 2002	3,4	4,7	16,4	9,2	2,7	2,5	30,3	7,6	23,1
Karlovy Vary - letiště 2003	4,3	6,5	21,3	9,8	2,6	2,1	27,1	8,6	17,8
Karlovy Vary - letiště 2004	4,7	5,5	16,8	6,6	2,8	4,2	35,8	8,0	15,6
Karlovy Vary - letiště 2005	5,8	6,3	18,4	6,8	2,6	4,7	32,8	6,2	16,8
Diference 2002 - 2005	2,4	1,8	4,9	3,2	0,2	2,6	8,7	2,4	7,5
Milešovka 2002	12,9	4,5	11,4	15,6	9,0	13,7	19,5	13,2	0,3
Milešovka 2003	16,1	5,3	8,4	15,8	8,1	12,9	17,8	15,4	0,2
Milešovka 2004	13,4	3,1	6,6	11,3	7,7	15,9	24,2	17,4	0,3
Milešovka 2005	12,1	3,9	3,5	10,8	13,2	12,1	22,7	21,6	0,1
Diference 2002 - 2005	4,0	2,2	7,9	5,0	5,5	3,8	6,4	8,4	0,2
Dálkový transport SO ₂ a NO _x /Long-distance transport									
Praha – Libuš 2002	3,3	4,2	16,7	22,5	6,6	10,8	21,5	14,4	0,0
Praha – Libuš 2003	14,5	7,3	13,2	12,3	8,2	7,4	16,6	20,5	0,0
Praha – Libuš 2004	11,2	6,2	5,4	7,5	7,9	10,0	30,3	21,5	0,0
Praha – Libuš 2005	9,7	8,3	7,4	10,8	7,5	8,8	25,7	21,8	0,0
Diference 2002 - 2005	11,2	4,1	11,3	15,0	1,6	3,4	13,7	7,4	0,0

Tab. 3.

Průměrné rychlosti proudění vzduchu v letech 2002 - 2005

Average wind velocity of air in 2002 - 2005

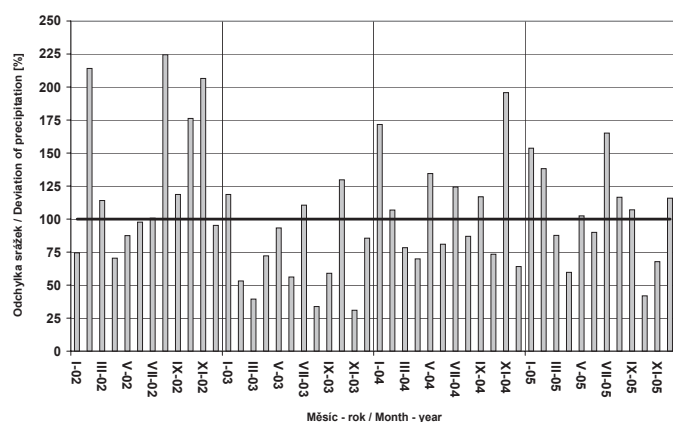
Stanice/Station	Průměrná rychlost větru [v m.s ⁻¹] v roce/Annual average wind velocity			
	2002	2003	2004	2005
Kopisty	2,30	2,09	2,15	2,17
Karlovy Vary - letiště	2,33	2,20	2,14	2,20
Milešovka	7,32	7,04	7,55	7,53
Praha – Libuš	8,45	7,68	8,92	8,35

(místní, regionální transport) západní, východní a jižní směry větru. V dálkovém transportu se nejvíce mění proudění vzduchu v intervalu 11 až 15 % u jihovýchodních, západních východních a jižních směrů větru. V tabulce 3 jsou uvedeny průměrné roční rychlosti větru. Z tabulky vyplývá největší snížení rychlosti proudění vzduchu v roce 2003. Snížení rychlosti proudění vzduchu roste s růstem nadmořské výšky a to až o 0,8 m.s⁻¹. Změny v proudění vzduchových hmot vysvětlují úroveň depozičních toků síry a dusíku v jednotlivých letech. Snížení rychlosti proudění vzduchu nárůstem stavů bezvětří (calm) v roce 2003 se výrazně projevilo v depozičních tocích síry a dusíku (tím i kyselá depozice).

Pro dokreslení rozptylových podmínek podle teplotní stratifikace období 2002 - 2005 je na obrázku 3 uveden vývoj průměrné denní hodnoty teplotního gradientu odvozeného z měření teploty vzduchu (v termínech 7, 14, 21 hod.) na meteorologické stanici Milešovka a Kopisty. Z vývoje teplotního gradientu vyplývá, že horší rozptylové poměry se vyskytují v každém roce vždy v zimním období prosinec – únor.

Faktor uplatněný v modelovém výpočtu, který výrazně ovlivňuje úroveň mokré depozice síry a dusíku, jsou atmosférické srážky. Vývoj odchylek průměrných měsíčních úhrnů srážek od normálu (1961 - 1990) v letech 2002 - 2005 je znázorněn na obrázku 4.

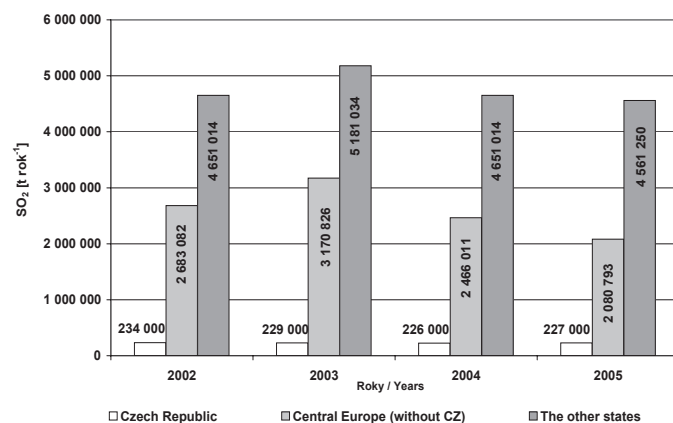
Na obrázku jsou znázorněny průměrné hodnoty měsíčních úhrnů srážek z 1 257 referenčních bodů, které reprezentovaly reliéf území PLO Krušné hory. Podle hodnoty odchylky srážkového úhrnu od 100 % lze usuzovat o srážkových poměrech studované lokality.



Obr. 4.

Kolísání měsíčních srážek (průměr z 1 257 gridů) v oblasti Krušných hor v letech 2002 - 2005 vyjádřené odchylkami od průměru období 1961 - 1990 (údaje podle měření ČHMÚ)

Fluctuations of monthly precipitation (average of 1,257 grids) in the region of the Krušné hory Mts. in 2002 - 2005 expressed as deviations from the average value for the period 1961 - 1990 (data according to measuring of CHMI)



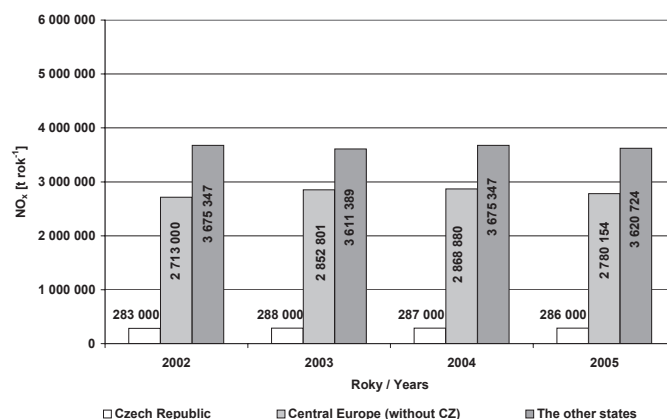
Obr. 5.

Roční emise SO_2 použité v modelovém výpočtu pro roky 2002 - 2005
Annual SO_2 emission used in the model calculation for years 2002 - 2005 (data according to CHMI, BARRETT 2004, Kolektiv 2005a, VESTRENG, KLEIN 2002)

Z obrázku 4 vyplývá, že v roce 2003 byly měsíční srážky po většinu roku pod dlouhodobým průměrem. V tomto roce se podle podnormálních srážkových úhrnů dalo předpokládat, že bude mokrá depozice síry a dusíku nižší. Avšak vzhledem ke snížení rychlosti proudění vzduchu došlo ke zvýšení suchého depozičního toku, který vyrovnal ztrátu v mokré depozici. Naopak v roce 2002 byly úhrny srážek v polovině roku nad srážkovým normálem, což se projevilo i ve vyšší

hodnotě mokré depozice síry a dusíku. V ostatních letech jsou srážkové úhrny v porovnání s normálem více vyrovnané a na změny depozic mají vliv rozptylové podmínky a množství emisí SO_2 a NO_x .

Jak bylo naznačeno, další významný faktor, který ovlivňuje úroveň depozičních toků, je množství emisí SO_2 a NO_x . Množství emisí SO_2 a NO_x použité v modelovém výpočtu pro jednotlivé roky je znázorněno na obrázku 5 a 6. U emisí SO_2 se od roku 2003 může do ovzduší Evropy ročně dostávat více jak 4,5 mil. tun SO_2 a více jak 3,5 mil. tun NO_x .



Obr. 6.

Roční emise NO_x použité v modelovém výpočtu pro roky 2002 - 2005
Annual NO_x emission used in the model calculation for years 2002 - 2005 (data according to CHMI, BARRETT 2004, Kolektiv 2005a, VESTRENG, KLEIN 2002)

VÝSLEDKY A DISKUSE

Výsledky modelového výpočtu potenciální podkorunové depozice síry, dusíku a iontů vodíku za období 2002 - 2005 odvozené pro jehličnatý porost jsou shrnuty v tabulce 4. Z výsledků modelového výpočtu vyplývá, že průměrná roční podkorunová depozice síry dosahuje hodnot v rozmezí 11,75 - 24,45 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, průměrná roční podkorunová depozice dusíku 14,04 - 24,24 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Průměrná hodnota kyselé podkorunové depozice (z oxidovatelné formy síry a dusíku) dosahuje 2 107,8 - 2 682,3 $\text{mol. H}^+ \text{ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice síry je znázorněno na obrázku 7 až 10. Z vývoje plošného rozložení i průměrných hodnot potenciální podkorunové depozice síry (tab. 4) vyplývá postupné snižování zátěže smrkového porostu. V roce 2005 (obr. 10) můžeme minimální depozice podkorunové síry do 7,5 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ očekávat v jihozápadní části PLO Krušných hor na území LS Kraslice v oblasti Plesné, Přebuže. Hodnoty do 7,5 $\text{kg síry ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ můžeme očekávat i v severovýchodní části PLO Krušné hory u Petrovic i v oblasti u Ostrova nad Ohří. Nejvyšší hodnoty podkorunových depozičních toků síry přes 30 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ se formují na území Mosteckého městského lesa, v prostoru vrchu Jeřabina. Hodnoty depozičních toků síry v rozmezí 20 - 30 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ se formují v oblasti Kamenného vrchu, v prostoru vrchu Jeřabina a Větrného vrchu. Hodnoty depozičních toků síry v rozmezí 17,5 - 20 $\text{kg ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ se formují především na území Mosteckého městského lesa, dále v prostoru Mračného vrchu, Loučné a Stropníku, dále v prostoru Mezi-

Tab. 4.

Průměrné roční hodnoty minima a maxima potenciální podkorunové depozice S, N a kyselá depozice jehličnatých porostů v oblasti Krušných hor v letech 2002 - 2005

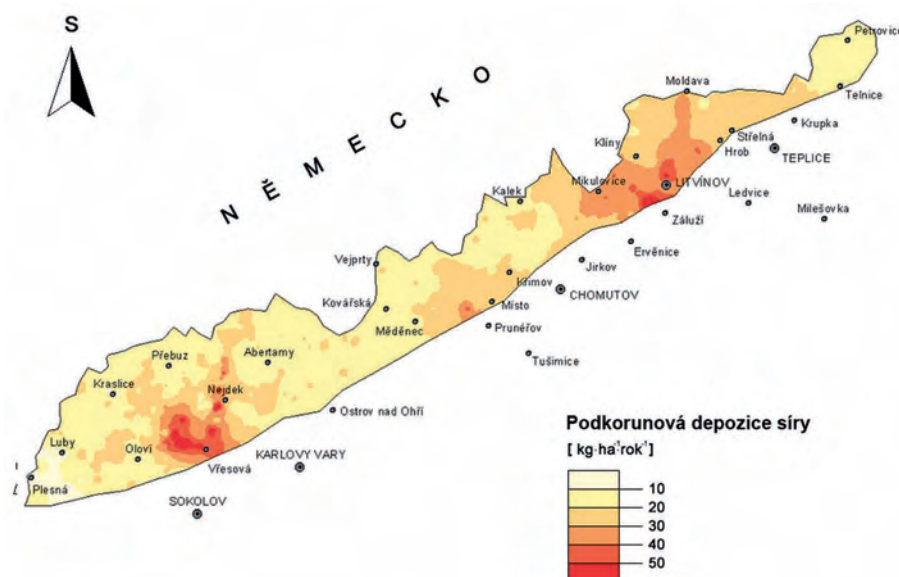
Mean annual minimum and maximum values of potential throughfall sulphur, nitrogen and H⁺ depositions on the territory of the Krušné hory Mts. in 2002 - 2005

Potenciální roční depozice rok ¹	Průměr ²	Minimum	Maximum
S (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2002	21,20	7,20	75,70
S (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2003	24,45	8,08	68,60
S (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2004	14,38	3,95	72,51
S (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2005	11,75	4,58	33,77
N oxid. forma ³ (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2002	21,17	7,41	57,30
N oxid. forma (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2003	23,39	8,42	62,50
N oxid. forma (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2004	25,24	9,01	58,89
N oxid. + red. forma ⁴ (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2004	33,03	12,14	71,00
N oxid. forma (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2005	19,04	5,64	50,62
N oxid. + red. forma (kg ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2005	24,94	9,39	59,37
Kyselá depozice z oxid. formy ⁵ (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2002	2 414,5	995,5	8 926,7
Kyselá depozice z oxid. formy (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2003	2 437,7	858,9	6 267,5
Kyselá depozice z oxid. formy (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2004	2 682,3	975,5	6 468,1
Kyselá depozice z oxid. + red. formy ⁶ (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2004	3 057,9	1 217,6	6 805,6
Kyselá depozice z oxid. formy (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2005	2 107,8	752,8	4 732,4
Kyselá depozice z oxid. + red. formy (mol H ⁺ ha ⁻¹ .rok ⁻¹) 2005	2 440,4	1 040,6	5 271,9

¹Potential deposition flux year, ²Mean, ³N oxid. form, ⁴N oxid. + red. form, ⁵Acid deposition from oxid. form, ⁶Acid deposition from oxid. + red. form

hořského až Kamenného vrchu a západně od Vřesové k Jindřichovicím. Hodnoty depozičních toků síry v rozmezí 15 - 17,5 kg ha⁻¹.rok⁻¹ se formují kolem výše uváděných lokalit a dále v izolovaných lokalitách v prostoru Komářího vrchu, Božídarského Špičáku, Klínovce, Vejprty, Novoveského vrchu, u obce Hradiště, u Kalku, v blízkosti Střelné atd.

Vzhledem k horninovému podloží a spotřebě síry jehličnatým porostem byla pro území PLO Krušné hory použita kritická dávka roční depozice síry 15 kg ha⁻¹.rok⁻¹. Hodnota kritické dávky depozičního toku síry byla u potenciální podkorunové depozice síry jehličnatého porostu překročena v roce 2002 na více než 76 % území

**Obr. 7.**

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice síry (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2002 - modelový výpočet

Area distribution of total annual potential throughfall sulphur deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2002 - model calculation

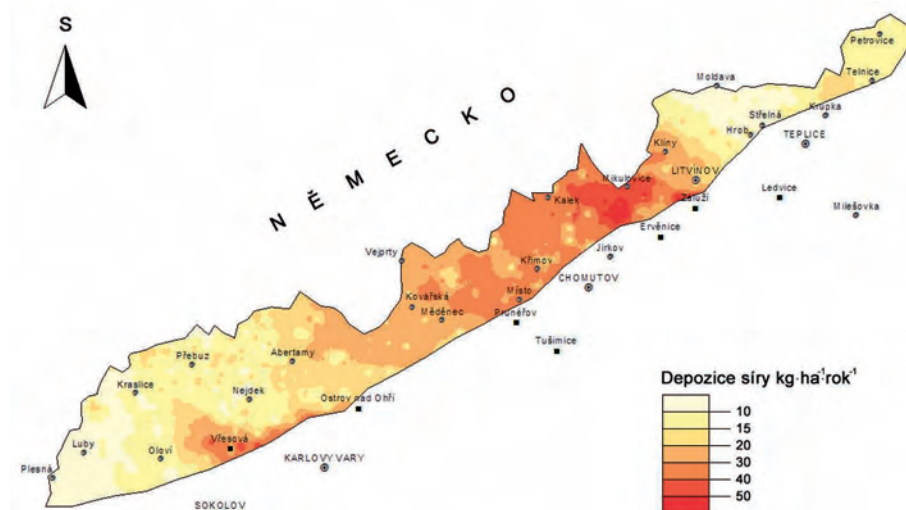
PLO Krušné hory. V roce 2003 dosahovalo překročení kritické dávky depozičního toku síry na cca 80 % území PLO Krušné hory. Hodnota kritické dávky depozičního toku síry je u potenciální podkorunové depoziční síry jehličnatého porostu překročena v roce 2004 na více než 36 % území PLO Krušné hory. Hodnota kritické dávky depozičního toku síry je u potenciální podkorunové depoziční síry jehličnatého porostu stále překračována v roce 2005 na více než 22 % území PLO Krušné hory. Vedle poklesu plochy území s překračováním kritické dávky podkorunové síry klesá od roku 2003 i depoziční tok podkorunové síry (tab. 4).

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depoziční síry je znázorněno na obrázku 11 až 14. Z vývoje plošného rozložení i průměrných hodnot potenciální podkorunové depoziční síry dusíku (tab. 4) vyplývá růst zátěže smrkového porostu do roku 2004, po tomto roku došlo k poklesu. V roce 2005 (obr. 14) můžeme minimální podkorunové depoziční dusíku do $10 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ opět očekávat v jihozápadní části PLO Krušných hor v okolí Plesné a obce Luby, severně od Přebuzi, v okolí vodní nádrže Přísečnice a severovýchodní části PLO Krušné hory v okolí obce Petrovice. Nejvyšší hodnoty depozičních toků

dusíku nad $40 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ jsou tradičně vázány na blízkou polohu velkých emisních zdrojů, tzn. na jihozápad od Litvínova, dále v okolí Kamenného a Mezihořského vrchu a v blízkosti Pruněřova u obce Hradiště. Hodnoty depozičních toků dusíku v rozmezí $30 - 40 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ se formují v prostoru mezi Kamenným a Mezihořským vrchem, na území Mosteckého městského lesa, dále v prostoru vrchu Mračný vrch, Loučná a Stropník, v okolí obce Klíny, západně od Vřesové k Jindřichovicím, v oblasti Komářského vrchu u hranice s Německem a v několika izolovaných lokalitách např. u Božidarského Špičáku, Klínovce, u obce Vejprty atd.

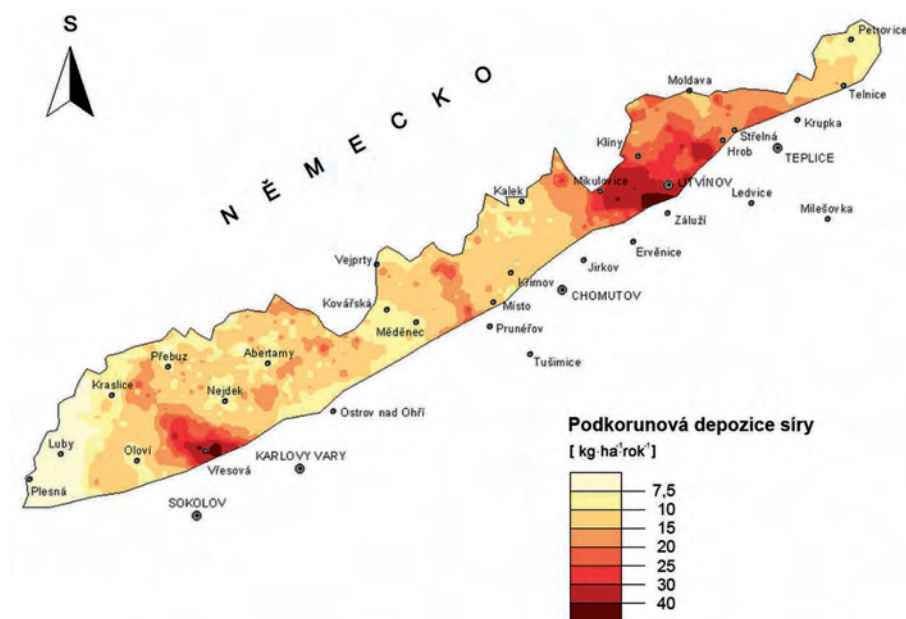
Kritická zátěž depoziční dusíku, od které dochází k jeho přebytku (vyvolává již poškození porostů v důsledku eutrofizace), se u jehličnatých porostů pohybuje mezi $10 - 15 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (TICKLE 1992, ÅGREN 1993). Pro území PLO Krušné hory byla použita kritická dávka dusíku (CLN) $15 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Z prostorového rozložení potenciální podkorunové depoziční dusíku vyplývá, že v roce 2002 je hodnota CLN u potenciální podkorunové depoziční dusíku jehličnatého porostu překročena na více než 80 % území PLO Krušné hory. V roce 2003 dosahovalo překročení CLN u potenciálního podkorunového toku dusíku na cca 65 % území PLO Krušné hory. Hodnota CLN je u potenciální podkorunové depoziční dusíku (oxidovatelné formy) jehličnatého porostu v roce 2004 překročena na více než 96 % území PLO Krušné hory. I přes pokles celkové zátěže dusíkem v roce 2005 (viz tab. 4) je hodnota CLN u potenciální podkorunové depoziční dusíku (oxidovatelné formy) jehličnatého porostu stále překračována na více než 65 % území PLO Krušné hory.

Pro řešení vztahu mezi zdravotním stavem lesních porostů, acidifikací prostředí vstupem kyselých podkorunových depozičních a poškozování lesní půdy, byla použita hodnota kritické dávky kyselých depozičních ($\text{H}^+ = \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) pro smrk ve výši $1463 \text{ mol. H}^+ \text{ ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (DE VRIESE et al. 2002). V hodnotě CLH je zohledněna pufrační schopnost vegetace a půdy, i její přímý vliv na acidifikační procesy. V roce 2002 byla hodnota CLH



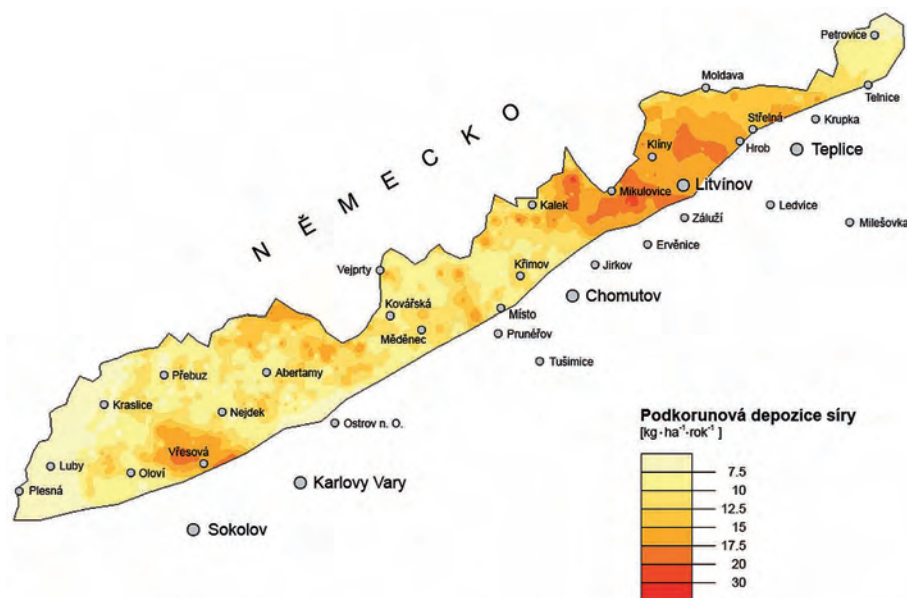
Obr. 8.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depoziční síry (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2003 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall sulphur deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2003 - model calculation



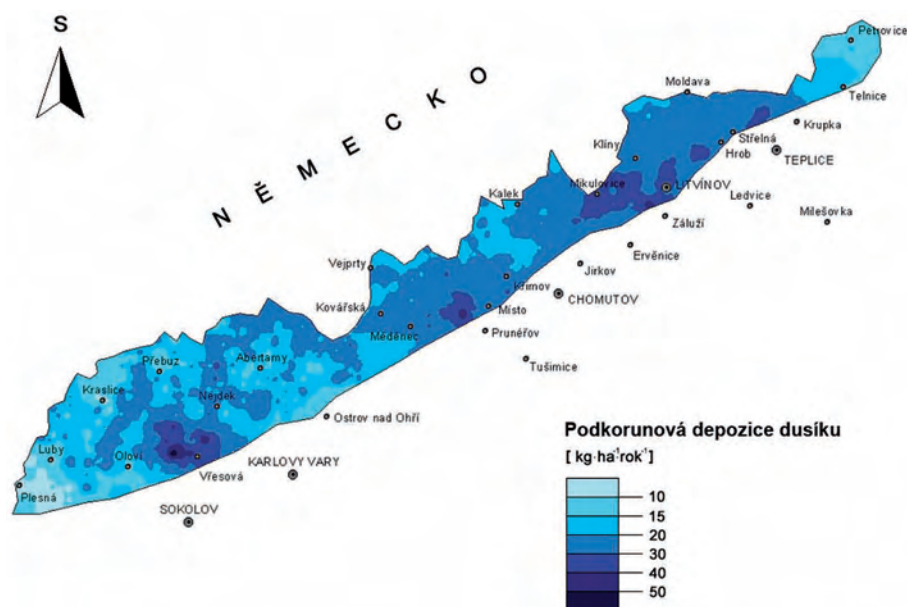
Obr. 9.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depoziční síry (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2004 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall sulphur deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2004 - model calculation



Obr. 10.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice síry (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2005 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall sulphur deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2005 - model calculation



Obr. 11.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice dusíku (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2002 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall nitrogen deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2002 - model calculation

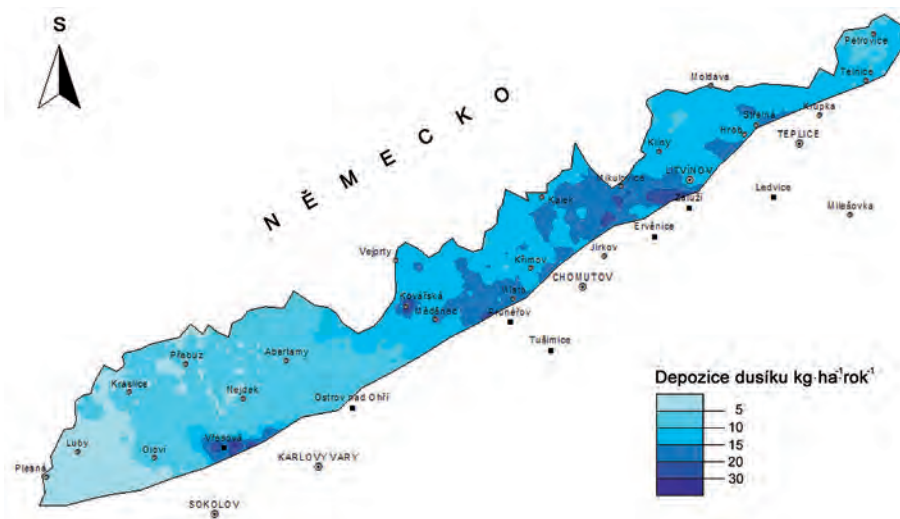
u potenciální kyselé depozice smrkového porostu překročena na více než 91 % území PLO Krušné hory, hodnota 1 600 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ je překročena na téměř 87 % území, hodnota 2 000 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ je překročena na 69 % území. V roce 2003 z hlediska potenciální acidifikace smrkových porostů není CLH potenciální podkorunové kyselé depozice překročena pouze na cca 18 % území PLO Krušné hory, na 82 % území překročena je. Na cca 17 % území je CLH pro smrk

překročena více než dvakrát. V roce 2004 bylo modelovým výpočtem zjištěno nejvyšší zatížení kyselou podkorunovou depozicí tvořenou ionty H^+ z oxidačních procesů. Hodnota kritické dávky kyselé depozice smrkových porostů (1 463 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) je překročena na více než 90 % území PLO Krušné hory, hodnota 1 600 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ je překročena na více než 87 % území, hodnota 2 000 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ je překročena na více než 76 % území PLO Krušné hory. Plošné rozložení překročení CLH pro smrk je znázorněno na obrázku 15.

Hodnota CLH byla i v roce 2005 překračována na více než 75 % území PLO Krušné hory. Z hlediska potenciálního ohrožení lesních půd to znamená, že na cca 25 % území PLO Krušné hory je v důsledku nadměrných vstupů kyselé depozice dosahován mírný stupeň ohrožení lesních půd (kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena do 500 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$). Na více než 24 % území PLO Krušných hor je dosažen středně vysoký stupeň ohrožení lesních půd, tzn. že kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena o více jak 500 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Na více než 16 % území PLO Krušných hor je dosažen vysoký stupeň ohrožení lesních půd, kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena do 1 000 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Téměř na 10 % území PLO Krušných hor je dosažen velmi vysoký až extrémní stupeň ohrožení lesních půd, kritická dávka podkorunové kyselé depozice smrkových porostů je překročena o více jak 1 500 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Plošné rozložení překročení CLH pro smrk je znázorněno na obrázku 16.

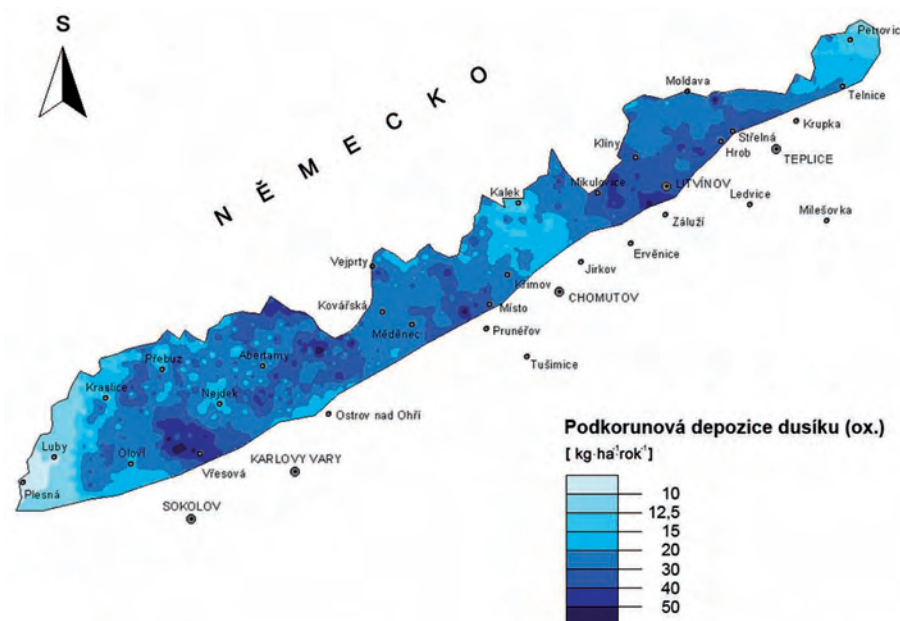
Na obrázku 17 je znázorněn podíl potenciální kyselé depozice zachycené jehličnatým porostem ve formě námrazy v roční sumě mokré podkorunové depozice vodíkových iontů. Z prostorového rozložení hodnot zachycené podkorunové kyselé depozice vodíkových iontů ve formě námrazy vyplývá, že se výrazně uplatňuje nadmořská výška. Nejvyšší hodnoty podkorunové kyselé depozice od 300 do 400 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ můžeme očekávat v okolí masivu Klínovce a v oblasti Božidarského Špičáku. Tato maxima představují 13% podíl v roční sumě mokré podkorunové kyselé depozice (z oxidovatelné formy). Tyto kyselé depozice jsou vytvořeny

z 30 % z mokrého depozičního toku síry a ze 70 % z mokrého depozičního toku dusíku. Nejmenší hodnoty pod 10 mol. H^+ $ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ se formují v údolních chráněných polohách a v lokalitách s nejnižší nadmořskou výškou. Na vzniku těchto kyselých depozic se podílí z 15 % mokrá depoziční tok síry a z 85 % mokrá depoziční tok dusíku. V nadmořských výškách nad 950 – 1 000 m n. m. můžeme



Obr. 12.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice dusíku (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2003 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall nitrogen deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2003 – model calculation



Obr. 13.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice dusíku (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2004 - modelový výpočet
Area distribution of total annual potential throughfall nitrogen deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2004 - model calculation

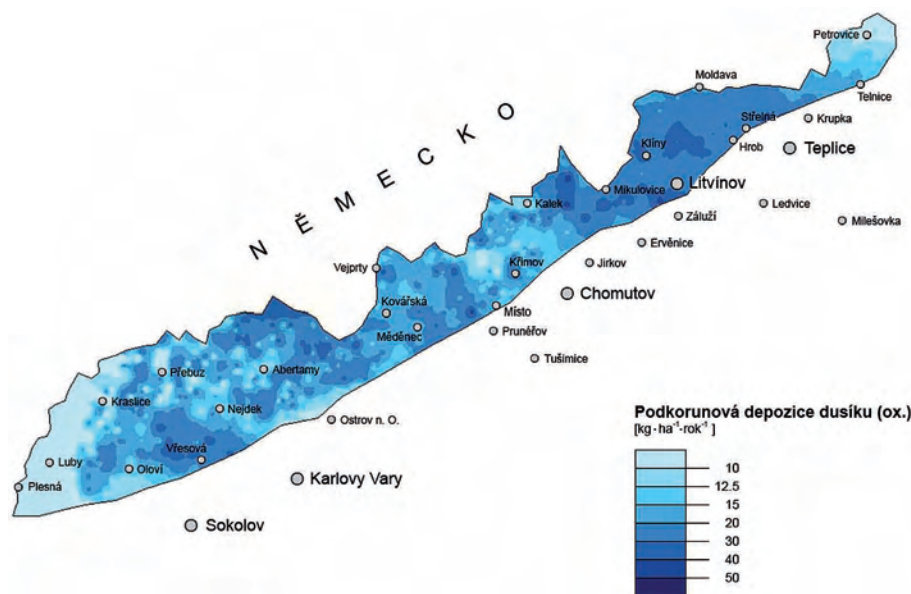
očekávat v podkorunové kyselé depozici jehličnatého porostu více jak 100 mol. H^+ $ha^{-1}.rok^{-1}$ zachycené v námraze (podíl mokrého depozičního toku síry dosahuje 20 % a podíl mokrého depozičního toku dusíku 80 %). Vzhledem k předpokladu zvýšené toxicity námrazy lze na území s největším množstvím kyselé depozice v námraze (nad 1 000 m n. m.) očekávat zvýšené projevy poškozování lesních porostů (vyšší hodnoty diskolorace a defoliace).

Pro rok 2004 s nejvyšší průměrnou potenciální podkorunovou depozicí (oxidovatelná forma) je na obrázku 18 znázorněno, kdo tuto zátěž smrkových porostů způsobuje. Z obrázku 18 vyplývá, že průměrná roční potenciální podkorunová depozice vodíkových iontů 2 682,3 mol $ha^{-1}.rok^{-1}$ byla vyvolána z 36,07 % emisemi SO_2 a NO_x ze zahraničí, na české emisní zdroje kategorie REZZO 1 + 2 + 3 připadá 53,91 %. Nejvyšší podíl 45,55 % vykazují emisní zdroje REZZO 1 z České republiky, podíl zdrojů REZZO 2 + 3 z ČR dosahuje 8,36 %, liniové zdroje ČR vykazují podíl 0,02 %. Nejvyšší podíl zahraničních zdrojů na průměrné kyselé depozici vykazují emisní zdroje SO_2 a NO_x z Německa - 23,72 %.

Na obrázku 19 je znázorněno, kdo zátěž smrkových porostů potenciální podkorunovou depozicí vodíkových iontů depozicí způsobuje v roce 2005. Průměrná roční potenciální podkorunová depozice vodíkových iontů 2 107,8 mol $ha^{-1}.rok^{-1}$ byla vyvolána z 37,7 % emisemi SO_2 a NO_x ze zahraničí, na české emisní zdroje připadá 52,3 %. Nejvyšší podíl 43,9 % vykazují emisní zdroje REZZO 1 (velké zdroje) z České republiky, podíl zdrojů REZZO 2 + 3 (střední a malé zdroje) z ČR dosahuje 8,4 %, liniové zdroje ČR (REZZO 4) vykazují podíl 0,02 %. Nejvyšší podíl zahraničních zdrojů na roční kyselé depozici 20,5 % vykazují emisní zdroje SO_2 a NO_x z Německa. Z podílů vyplývá, že se snižuje podíl českých zdrojů REZZO 1 a roste mírně podíl zdrojů ze střední Evropy (kromě Německa) a ze vzdálenějších oblastí Evropy.

ZÁVĚR

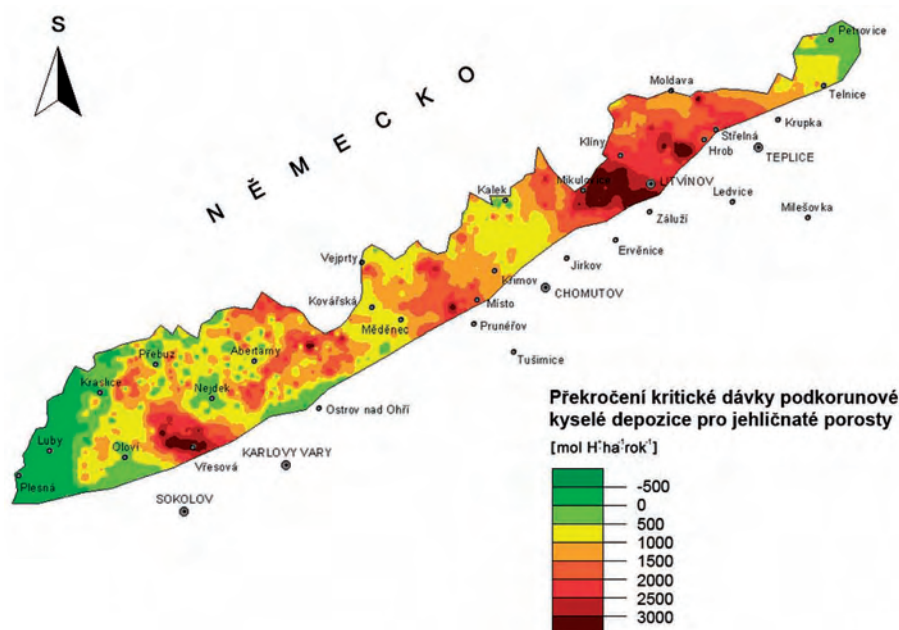
Pro PLO Krušné hory platí, že i v současných emisních podmínkách střední Evropy jsou oslabené smrkové porosty těchto území stále vystavovány poškození, které může být vyvoláno nenadálým vývojem meteorologických faktorů, zejména vzestupem a následným poklesem teploty vzduchu. Spouštěcím faktorem velkoplošné defoliace mohou být jak jednorázové extrémní výkvy teploty vzduchu v předjaří, tak opakující se periody sucha, i přímé poškození asimilačních orgánů dřevin ozonem nebo synergické poškození pudy imisemi ve formě kyselých depozic. Tyto formy poškození se mohou projevovat především v oblastech PLO Krušné hory, kde dochází k překročení CLH nebo CLN. Jaký rozsah tato území dosahují, vyplývá z modelového výpočtu potenciálních podkorunových depozic síry, dusíku a iontů vodíku.



Obr. 14.

Prostorové rozložení potenciální podkorunové depozice dusíku (suma suchého a mokrého depozičního toku) v jehličnatém porostu na území PLO Krušné hory v roce 2005 - modelový výpočet

Area distribution of total annual potential throughfall nitrogen deposition (sum of dry and wet deposition flow) for coniferous stands in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2005 - model calculation



Obr. 15.

Plošné znázornění překročení kritické dávky kyselé podkorunové depozice pro smrk CLH = 1 463 mol. H⁺ ha⁻¹.rok⁻¹ (podle DE VRIESE et al. 2002) v oblasti PLO Krušné hory v roce 2004 - modelový výpočet

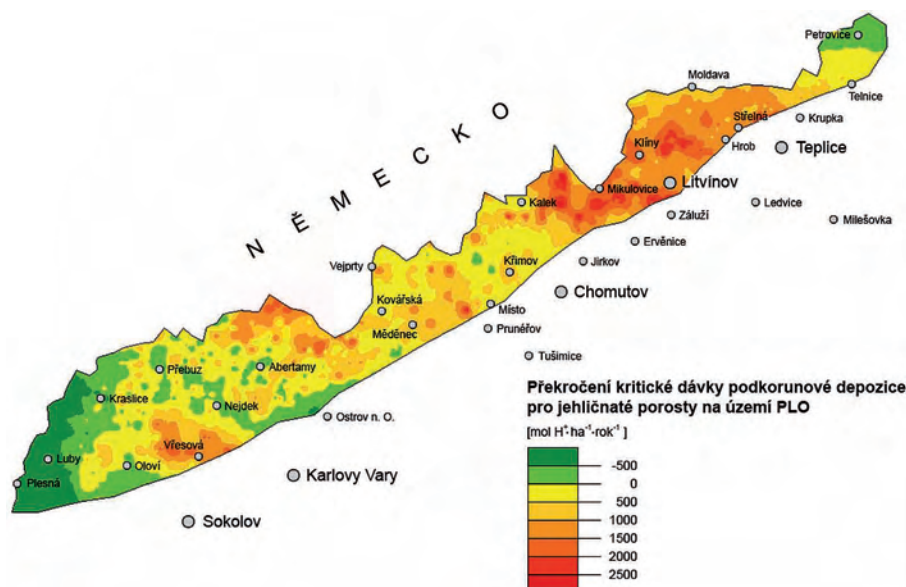
Area representation of the exceeded critical load of acid throughfall deposition for spruce CLH = 1,463 mol. H⁺ ha⁻¹.year⁻¹ (according to DE VRIES et al. 2002) in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2004 - model calculation

Z výsledků překročení kritických dávek pro kyselou depozici (CLH) vyplývá, že na 75 % území PLO Krušných hor pokračuje i v současných emisních podmínkách acidifikace jehličnatých porostů, která je vyvolána v průměru z 37,7 % antropogenními emisemi SO₂ a NO_x ze zahraničí a z 52,3 % antropogenními emisemi z území České republiky. Z výsledků překročení kritických dávek pro depozici dusíku (CLN) vyplývá, že na více než 65 % území PLO Krušné hory probíhají i v současných emisních podmínkách procesy eutrofizace smrkových porostů.

Na území PLO Krušné hory je v důsledku vstupů kyselé depozice dosahován na 25 % území mírný stupeň ohrožení lesních půd (kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena do 500 mol. H⁺ ha⁻¹.rok⁻¹). Na více než 24 % území PLO Krušných hor je dosažen středně vysoký stupeň ohrožení lesních půd, tzn. že kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena o více jak 500 mol. H⁺ ha⁻¹.rok⁻¹. Na více než 16 % území PLO Krušných hor je dosažen vysoký stupeň ohrožení lesních půd, kritická dávka kyselé depozice smrkových porostů je překročena do 1 000 mol. H⁺ ha⁻¹.rok⁻¹. Téměř na 10 % území PLO Krušných hor je dosažen velmi vysoký až extrémní stupeň ohrožení lesních půd, kritická dávka podkorunové kyselé depozice smrkových porostů je překročena o více jak 1 500 mol. H⁺ ha⁻¹.rok⁻¹.

Nejvíce ohroženými oblastmi PLO Krušné hory jsou území Mosteckého městského lesa, v prostoru Medvědí skály, v okolí Kamenného a Mezihořského vrchu, v prostoru mezi Mračným vrchem a Loučnou, oblast od Vřesové přes Kammenný vrch, Jedlovník až po Jindřichov, území v blízkosti Pruněřova u obce Hradiště, v oblasti Božídarského Špičáku a lokalitě Klínovce, dále v několika izolovaných lokalitách v oblasti Komářího vrchu u hranic s Německem.

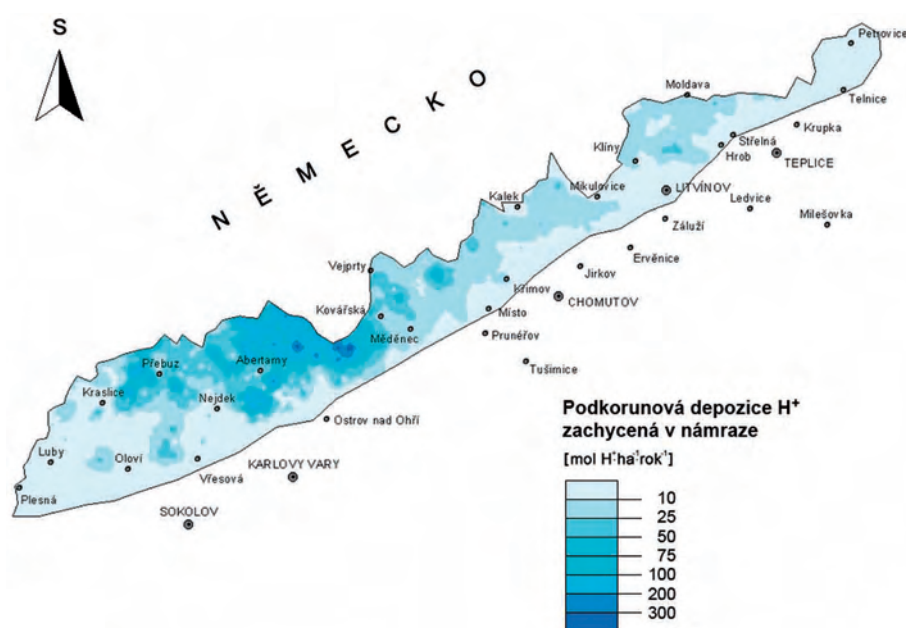
Odvozená data potenciálních depozičních toků síry, dusíku a iontů vodíku rozšiřují databázi ekologických poměrů (edafoklimatických, expozičních, atd.) struktury lesních typů PLO Krušných hor a mohou tak přispět k hodnocení příčin chřadnutí lesních porostů, k hodnocení příčin změn zdravotního stavu smrkových porostů i k posouzení úspěšnosti revitalizačních opatření při obnově lesního porostu.



Obr. 16.

Plošné znázornění překročení kritické dávky kyselé podkorunové depozice pro smrk CLH = 1 463 mol. H⁺ ha⁻¹·rok⁻¹ (podle DE VRIESE et al. 2002) v oblasti PLO Krušné hory v roce 2005 - modelový výpočet

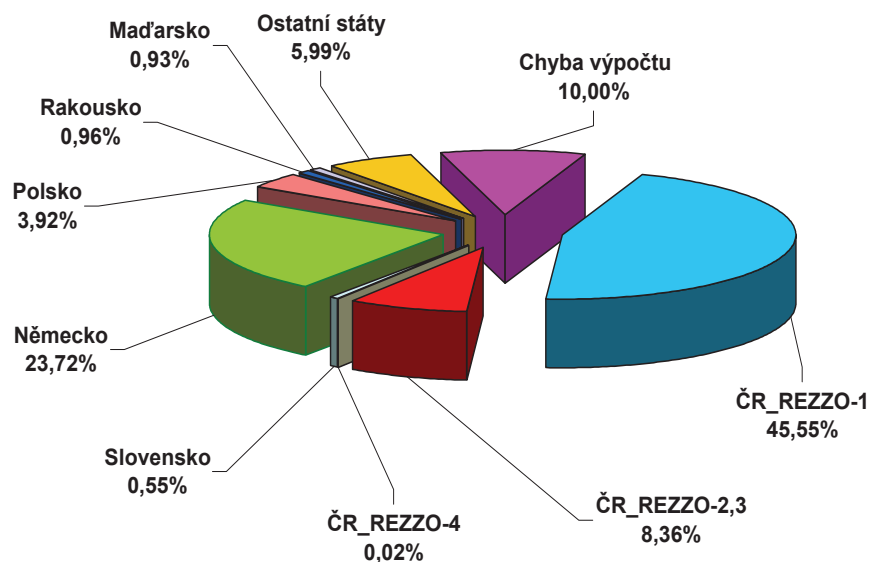
Area representation of the exceeded critical load of acid throughfall deposition for spruce CLH = 1,463 mol. H⁺ ha⁻¹·year⁻¹ (according to DE VRIES et al. 2002) in the NFR of the Krušné hory Mts. in 2005 - model calculation



Obr. 17.

Prostorové rozložení potenciálního množství mokré podkorunové kyselé depozice vodíkových iontů (suma mokrého depozičního toku síry a dusíku – oxidovatelná forma) zachycená v námraze v jehličnatých porostech na území přírodní lesní oblasti Krušné hory v roce 2004 - modelový výpočet

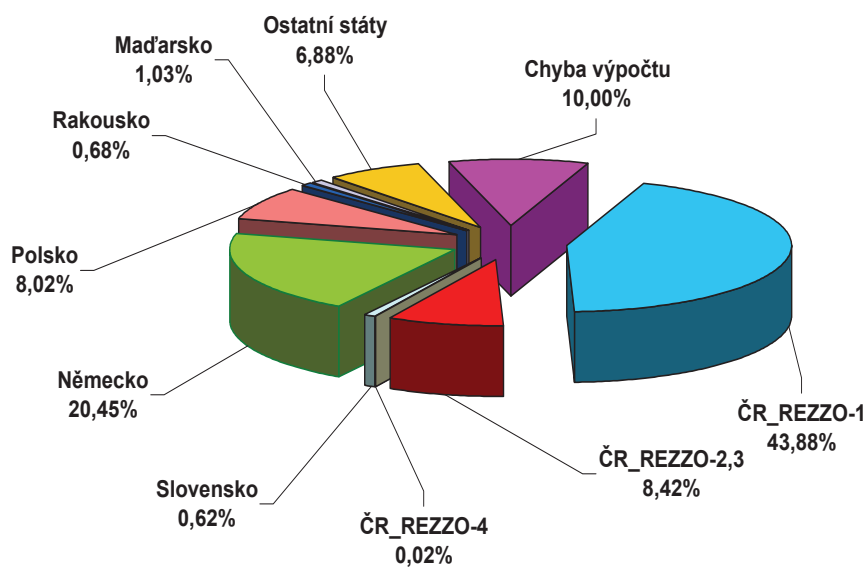
Spatial distribution of the potential amount of wet throughfall acid deposition of hydrogen ions (sum of wet sulphur and nitrogen deposition flows – oxid. form) measured in hard rime in coniferous forest stands in the Natural Forest Region of the Krušné hory Mts. in 2004 - model calculation



Obr. 18.

Podíl emisních zdrojů na průměrné roční potenciální podkorunové depozici H⁺ v oblasti Krušných hor v roce 2004

The share of emission sources in the average annual potential throughfall deposition of H⁺ in the region of the Krušné hory Mts. in 2004



Obr. 19.

Podíl emisních zdrojů na průměrné roční potenciální podkorunové depozici H⁺ v oblasti Krušných hor v roce 2005

The share of emission sources in the average annual potential throughfall deposition of H⁺ in the region of the Krušné hory Mts. in 2005

Poděkování:

Príspevek byl zpracován za podpory grantů MSM 6215648902 „Revitalizace horských lesních ekosystémů poškozených imisemi“, projektu Grantové služby LČR „Lesnické hospodaření v imisní oblasti Krušných hor“ a MZe ČR.

LITERATURA

- ÅGREN CH. 1993. The limits of tolerance. In: Critical Loads for Air Pollutants. Göteborg (Sweden), Secretariat on Acid Rain: 4 s.
- BAER M., NESTER K. 1988. Numerical simulation of SO₂ concentration and dry deposition fields in the TULLA experiment. Acid Deposition at High Elevation. M. H. Unsworth, D Fowler: 553-568.
- BARRETT M. 2004. Atmospheric emission from large point sources in Europe. Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, Air Pollution and Climate, 17: 60 s.
- BAŤKA M., BEDNÁŘ J., BRECHLER J., KOPÁČEK J. 1984. Aplikace trajektoriového modelu na hodnocení transportu znečištění ovzduší v oblasti Čech. Ochrana ovzduší, 11: 161-164.
- BUBNÍK J. 1979. Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů. Praha, MLVH ČSR: 42 s.
- BUBNÍK J., KEDER J., MACOUN J., MAŇÁK J. Systém modelování stacionárních zdrojů – Metodický pokyn odboru ochrany ovzduší MŽP výpočtu znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů „SYMOS 97“. Věstník MŽP ČR, ročník 1998, částka 3, s. 22-57.
- DE VRIES W., REINDS G. J., VAN DOBBEN H., DE ZWART D., AAMLID D., NEVILLE P., POSCH M., AUÉ J. C. H., VOOGD E. M. 2002. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe. Technical Report. Brussels, Geneva, EC, UN/ECE: 175 s.
- MESOPUFF 1994. A revised user's guide to MESOPUFF II Version 5.1. EPA-454/B-94-025,
- FOTYMA E., FOTYMA M. Soil monitoring for the content of mineral nitrogen in Poland. Soil monitoring. In: Proceedings from the IV. international conference Brno, 31. 5. - 1. 6. 1999, s. 55-57.
- HERTZ J., BUCHER P., RIEDMANN A. 1992. Deposition und Schwebstaub. In: Förderer L. (ed.): Immissionsökologische Untersuchungen im Wald des Kantons Zürich, Zürich, s. 53-62.
- Kolektiv 2003a. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2002. Praha, Český hydrometeorologický ústav: 158 s.
- Kolektiv 2003b. Forest Condition in Europe. Results of the 2002 Large-scale survey. Technical Report. Geneva and Brussels, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), UNECE and ECE: 115 s.
- Kolektiv 2004a. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2003. Praha, Český hydrometeorologický ústav: 155 s.
- Kolektiv 2004b. Forest Condition in Europe. Results of the 2003 Large-scale survey. Technical Report. Geneva and Brussels, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), UNECE and ECE: 127 s.
- Kolektiv 2005. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky - stav k 31. 12. 2004. Praha, MZe ČR: 119 s.
- Kolektiv 2005a. EMEP Report 1: 146 s.
- Kolektiv 2005b. Životní prostředí v Evropě. Stav a výhled v roce 2005 (česká verze). Brusel, EU: 450 s.
- Kolektiv 2005c. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2004. Praha, Český hydrometeorologický ústav: 168 s.
- Kolektiv 2005d. Forest Condition in Europe. 2005 Technical Report. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Geneva and Brussels, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), UNECE and ECE: 99 s. + 21 příloh.
- Kolektiv 2006a. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky - stav k 31. 12. 2005. Praha, MZe ČR: 135 s.
- Kolektiv 2006b. Forest Condition in Europe. 2006 Technical Report. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) and Department of Wood Science University of Hamburg: 57 s. + 21 příloh.
- Kolektiv 2006c. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2005. Praha, Český hydrometeorologický ústav: 216 s.
- KULHAVÝ J., DRÁPELOVÁ I. 2006. Depoziční toky a chemismus lyzimetrických vod ve smrkové monokultuře při různém stupni způsobu obhospodařování - (2005). Beskydy, 19: 35-42.
- LOCHMAN V. Výsledky výzkumu vlivu lesních porostů na chemismus srážkové a půdní gravitační vody a chemismus půd ve VÚLHM Jiloviště-Strnady. In: Černý J. (ed.): Kyselá atmosférická depozice a její důsledky. Sborník přednášek z pracovního semináře Praha 16. 4. 1985, s. 52-54.
- LOCHMAN V. 2000. Vývoj depozice imisních látek, chemismu půdní vody a půdy na výzkumných plochách Šerlich a složení vody v povrchovém zdroji. In: Slodičák M. (ed.): Lesnické hospodaření v imisní oblasti Orlických hor. Sborník referátů z celostátního semináře, Opočno 31. 8. - 1. 9. 2000. Strnady, VÚLHM: 31-36.
- POSCH M., DE SMET P. A. M., HETTELINGH J.-P., DOWNING R. J. 1999. Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. CCE Status Report, 175 s.
- TICKLE A. Critical loads for nitrogen and their use in national and international NGO campaigning. In: Report of the Third International NGO strategy Seminar on Air Pollution, Göteborg, Sweden, April, 1992, 10 -12, s. 18-23.
- ULRICH B. 1987. Stability, elasticity and resilience of terrestrial ecosystems with respect to matter balance. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, Biological Studies, 61.
- ULRICH B., MAYER R., KHANNA P. K. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe. Soil Science, 130: 193-199.
- VESTRENG V., KLEIN H. 2002. Emission data reported to UNECE/EMEP. Oslo, Norwegian Meteorological Institute, Research Note no. 73: 101 s.
- VITÁSEK E. 1987. Numerické metody. Technický průvodce 67. Praha, Státní nakladatelství technické literatury: 516 s.

DEVELOPMENT OF THE POTENTIAL DEPOSITION FLOWS OF SULPHUR, NITROGEN AND HYDROGEN IONS IN THE TERRITORY OF THE KRUŠNÉ HORY MTS. NATURAL FOREST REGION (NFR) IN 2002 - 2005

SUMMARY

Analyses of expert studies indicate that the deposition of sulphur and nitrogen compounds contributes to the acidification of soils and surface waters, and to the leaching of nutrients required by plants, which result in damage to fauna and flora (Kolektiv 2005b). Damage to forest stands and their decline occur due to air pollution with SO_2 and NO_x . Oxidation of SO_2 and NO_x in the atmosphere and the subsequent dissolution of the products of oxidation in rain drops give rise to sulphuric acid, nitric acid and their salts. According to Brömsted-Lowry's conception, acid is a hydrogen-containing compound. Aqueous solutions of acids release proton – a hydrogen ion. Deposition of hydrogen ions from the anthropogenic SO_2 and NO_x emissions in the forest ecosystem results in the increasing (intensifying) acidification of the soil environment. The development of protons from SO_2 , NO , NO_2 , SO_4^{2-} and NO_3^- depositions in the forest ecosystem was corroborated by numerous experimental measurements of lysimetric and gravimetric waters made in the past (LOCHMAN 1985, 2000, HERTZ, BUCHER, RIEDMANN 1992, FOTYMA 1999) as well as by currently running experiments (KULHAVÝ, DRÁPELOVÁ 2006). In natural forest regions of the Czech Republic, the deposition flows of sulphur and nitrogen reach values exceeding their highest tolerated critical doses set up for the most important commercial tree species of spruce, oak, beech and pine. The government decree no. 22 of January 2004 claims that with respect to the long-term air pollution load, the current level of air pollution and atmospheric depositions represent continuously a serious risk for the stability of forest ecosystems in exposed regions. In the territory of the Czech Republic, this type of damage to forest stands shows particularly in mountain areas from elevations of about 700 m a. s. l.

First evidence about the acidification of forest soils and degradation of forest ecosystems due to atmospheric depositions was presented by ULRICH et al. (1980) several years later. Acidification of forest soils is understood as a natural process inducing decalcification and podsolization, which is considerably accelerated by the introduction of acid anthropogenic H^+ deposition. The introduction of acid deposition into the soil triggers a chain of reactions that cause accelerated soil acidification after exhaustion of soil buffer capacity. The increasing soil acidity results in the development of ionic compounds of heavy metals and metaloids (Al, Mn, Fe) in the soil, which are referred to as cationic acids. In reaction with water, the cationic acids may generate protons, which represent potential cell poisons for the root system of plants and for soil microorganisms (ULRICH 1987). In addition to acidification, forest stands are affected also by eutrophication, which is induced by the deposition flow of nitrogen from NO_x and ammonia emissions.

It further follows from the survey into the health condition of forest stands in the territory of the Czech Republic made within ICP Forests (Kolektiv 2003a, 2004a, 2005, 2006a,b) that the defoliation of conifers (main species being Norway spruce *Picea abies*) over 60 years of age has been exhibiting a nearly steady state with only mild fluctuations already since 2001. The sum of defoliation in classes 2 + 3 + 4 increased from 62.6% in 2004 to 62.7% in 2005. Defoliation class 2 increased in the coniferous species from 61.5% in 2004 to 61.7% in 2005. Only 9.7% of all surveyed coniferous species were found without any kind of damage and with a possible defoliation reaching only up to 10%.

Development of the health condition of forest stands in the Czech territory remains to be affected by SO_2 and NO_x emissions. After a major decrease of SO_2 and NO_x emissions in the 1990s, a trend can be observed from ca 2001 of very slowly decreasing or stagnating SO_2 emissions and very slowly increasing or stagnating NO_x emissions. Of the countries of Central Europe (Czech Republic, Poland, Germany, Austria, Hungary, Slovakia) the annual amount of SO_2 emissions ranged in the period of 2002 - 2005 between 2.1 - 2.6 mil. tons and the annual amount of NO_x emissions ranged from 2.7 - 2.8 mil. tons. With respect to short-term climatic extremes and still high amounts of sulphur and nitrogen oxides emissions discharged from emission sources in Europe, the defoliation of coniferous and broadleaved forests in the territory of Czech Republic was "maintained" at the highest levels in Europe in 2002 - 2005. The situation results from the fact that even a lower concentration of harmful substances and especially the introduction of acid depositions from SO_2 and NO_x emissions in combination with short-term unfavourable climatic situations (e. g. air temperature fluctuation in early spring, extended growing season ending with a rapid onset of winter) induces damage to tree species. For example, a synoptical situation developed at the end of winter in mid-March 2005 over Central Europe, which caused a rapidly growing air temperature in the territory of the Krušné hory Mts. (NFR) at elevations of about 1,100 m a. s. l. above +10 °C (17 March 2005 +10.7 °C). The coming two days brought a severe drop in temperature, which was repeatedly falling below -3 °C (20 March 2005 -3.8 °C).

Intensity of the acidification and eutrophication of forest stands in the natural forest regions of the Czech Republic is apparently most affected by sulphur and nitrogen deposition flows whose source are anthropogenic emissions of sulphur dioxide and nitrogen oxides. The goal of this study was to assess the development of potential deposition flows of sulphur, nitrogen and hydrogen ions in the Natural Forest Region (NFR) of the Krušné hory Mts. in 2002 - 2005 by means of a model calculation. Another goal of the deposition study was to assess – again on the basis of a comparison of derived deposition flows with critical doses – the level of acidification and eutrophication for coniferous stands, to establish the share of frost deposit in the input of acid deposition, and to determine the participation of emission sources in the total potential acid deposition of hydrogen ions.

Model calculation of the deposition flows of sulphur, nitrogen and acidic H^+ deposition was made from gaseous concentrations of SO_2 , NO_x (as NO and NO_2) and from their dry and wet deposition flows. Calculation of dry sulphur and nitrogen deposition was carried out through the calculation of deposition rates by means of the resistance model. Calculation of wet sulphur and nitrogen deposition dwells on the parametrization used in MESOPUFF II model (1994). Model calculation of total potential sulphur and nitrogen deposition employs relief-charac-

terizing data (network of reference points), data on SO_2 and NO_2 amounts discharged from the emission sources and their technical parameters (chimney heights, temperature efficiency, service time in year, etc.), meteorological data defining dispersal and deposition conditions (wind direction and velocity, air temperature, atmospheric precipitation amounts, global radiation, air humidity), and air-pollution records needed for calibration (SO_2 , NO_x , NO , NO_2) and chemical reduction (O_3).

The network of reference points (grids) was aligned to represent main relief forms in the studied territory – highland plateaus, summit elevations, slopes and major valleys. Within the grid pattern, a calculation was made of potential deposition flows of sulphur, nitrogen and hydrogen ions. The NFR of the Krušné hory Mts. can be divided into two mutually different parts: a part of mountains with highland plateaus situated at the highest altitudes reaching above 1,100 m a. s. l., and a part of slopes with altitudes reaching from foothills to elevations of ca 600 m a. s. l. Geographic coordinates (longitude, latitude and elevation above sea level) for 1,257 points (grids) were defined from the topographic map 1 : 50,000.

The derived values of potential dry, wet and acid depositions represent values measured above the forest stand. The measurement of throughfall precipitation and its chemical analysis show that depositions intercepted by the stand are on average 2 - 3x higher than depositions in the open area precipitation. The throughfall deposition was derived from a comparison of wet sulphur and nitrogen (wet-only, bulk and throughfall) depositions that are monitored in the Czech territory. The measured ratio was used for the conversion of model-derived potential sulphur and nitrogen depositions for the open area above the forest stand.

For the NFR of the Krušné hory Mts., a derivation of sulphur and nitrogen depositions above the forest stand was possible on the basis of the density of area coverage by coniferous stands (in per cents). We based our calculations on an assumption that 100% of the forest stand coverage would intercept the highest throughfall deposition by throughfall precipitation (established from the analysis of throughfall precipitation). Bare plots will be represented (coverage 0%) by the value of open area deposition (clearcuts due to air pollution, water surfaces, grasslands, etc.). Coverage data were obtained for all reference points from the Landsat satellite (Stoklasa Tech.). The potential throughfall deposition was calculated by using Langrange interpolation polynomial (VITÁSEK 1987) based on the above mentioned assumption. This means that the throughfall deposition in the coniferous stand would range between the open area deposition and the highest throughfall deposition at coverage of 100%.

Results from the model calculation of the potential throughfall depositions of sulphur, nitrogen and hydrogen ions in the period 2002 - 2005 derived for the coniferous stand are summarized in table 4. They show that the mean annual throughfall sulphur deposition was 11.75 – 24.45 kg $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$, mean annual throughfall nitrogen deposition amounted to 14.04 – 24.24 kg $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$, and mean annual throughfall acidic deposition (from the oxidable forms of sulphur and nitrogen) reached 2,107.8 – 2,682.3 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$.

Regarding the bedrock and sulphur consumption by the coniferous stand, a critical dose of annual sulphur deposition used for the NFR of the Krušné hory Mts. was 15 kg S $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. The critical dose of sulphur deposition flow is permanently exceeded in the potential throughfall sulphur deposition of the coniferous stand on more than 22% of the NFR area.

The critical load of nitrogen deposition (CLN) from which its surplus occurs (which induces damage to stands due to eutrophication) ranged in the coniferous stands between 10 - 15 kg N $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ (TICKLE 1992, ÅGREN 1993). Critical nitrogen load used in the NFR of the Krušné hory Mts. was 15 kg N $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ (CLN). The critical load of nitrogen deposition flow is permanently exceeded in the potential throughfall nitrogen deposition (oxidable forms) of the coniferous stand on more than 65% of the NFR area.

For the solution of relation between the health condition of forest stands, environment acidification due to the introduction of throughfall acid deposition and damage to forest soil, a critical load of acid deposition ($\text{CLH} = \text{H}^+ = \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) was used for spruce at 1,463 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ (DE VRIES et al. 2002). The critical dose takes into account buffering capacity of the vegetation and soil as well as its direct influence on acidification processes. The area distribution of the overdosed critical acid deposition for spruce is illustrated in figures 15 - 16. The critical load of acid deposition in Norway spruce stands (1,463 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) is exceeded on more than 75% of the NFR area at the present time. This indicates that a mild degree of danger to forest soils is observed on about 25% of the NFR Krušné hory Mts. area due to excessive inputs of acid deposition (critical load of acid deposition in the spruce stands being exceeded up to 500 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$). Medium degree of danger to forest soils is reached on more than 24% of the NFR area, which indicates that the critical load of acid deposition in the spruce stands is exceeded by more than 500 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. High degree of danger to forest soils is reached on more than 16% of the NFR area with the critical load of deposition in the spruce stands being exceeded up to 1,000 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Nearly 10% of the NFR area exhibit very high to extremely high degree of danger to forest soils with the critical dose of throughfall acid deposition in the spruce stands exceeded by more than 1,500 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$.

Figure 17 illustrates the share of potential acid deposition intercepted by the coniferous stand in the form of hard rime in the annual sum of wet throughfall deposition of hydrogen ions. The spatial distribution of the values of intercepted throughfall acid deposition of hydrogen ions in the form of hard rime shows a considerable influence of altitude. The highest values of throughfall acid deposition in range 300 - 400 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ can be expected nearby the Klínovec massif and in the surroundings of Božidarský Špičák Mt. These maximums of acid deposition in hard rime represent more than a 13% proportion in the annual sum of wet throughfall acid deposition (from oxidable form). The lowest values below 10 mol. $\text{H}^+ \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ are measured in sheltered valleys and in localities situated at the lowest elevations. With respect to anticipated increased hard rime toxicity, we can expect increased manifestations of damage to forest stands (higher values of discoloration and defoliation) in areas with the highest amount of acid deposition in hard rime (above 1,000 m a. s. l.).

The share of emission sources in the potential deposition of H^+ (mol. $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$), which formed from dry and wet throughfall depositions of sulphur and nitrogen in the NFR of the Krušné hory Mts. in the period from 2004 - 2005, is shown in figures 18 and 19. It follows out from the figure 19 that the mean annual acid deposition of hydrogen ions amounting to 2,107.8 mol. $\text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ calculated for year 2005 was induced at 37.7% by SO_2 and NO_x emissions imported from abroad and at 52.3% by emissions from the Czech sources. The highest share

(43.9%) showed the REZZO 1 emission (big) sources from the Czech Republic. The REZZO 2 + 3 (medium-size and small) sources of emissions in the Czech Republic were responsible for 8.4% and the REZZO 4 (linear) sources in the Czech Republic for 0.02%. The highest share of foreign sources in the annual acid deposition (20.5%) is shown by SO₂ and NO_x emission sources from Germany.

The results of exceeded critical rates for acid deposition indicate that the acidification of coniferous forests continues in the NFR of the Krušné hory Mts. in the current emission situation, which is induced on average at 37.7% by anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x from abroad, and at 52.3% by anthropogenic emissions from the Czech territory. The results of exceeded critical rates for nitrogen deposition indicate that processes of the eutrophication of spruce stands continue in the current emission situation on more than 65% of the NFR Krušné hory Mts. area.

Acknowledgements:

The study was funded by the Grants MSM 6215648902 "Revitalization of the mountains forest ecosystems damage by air pollution", project of Grant Agency of the Forests of the Czech Republic "Forestry Management in the Krušné hory Mts." and the Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

Recenzováno

ADRESA AUTORA/CORRESPONDING AUTHOR:

RNDr. Pavel Hadaš, Ústav ekologie lesa, LDF MZLU
Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika
tel.: 545 134 188; e-mail: hadas@mendelu.cz