

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Ochrana životního prostředí

Studijní obor: B-OZP



Eliška Vlnasová

DLOUHODOBÉ TRENDY MOKRÉ ATMOSFÉRICKÉ DEPOZICE SÍRY A DUSÍKU
- SROVNÁNÍ REGIONŮ SEVERNÍ POLOKOULE

*Long-term trends in sulphur and nitrogen wet deposition
- a comparison of Northern Hemisphere regions*

Typ závěrečné práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel:
doc. RNDr. Iva Hůnová, CSc.

Praha, 2023

Poděkování:

Ráda bych poděkovala svojí vedoucí práce docentce Ivě Hůnové za pomoc s vybráním tématu mojí bakalářské práce a za vstřícný přístup při všech konzultacích. V neposlední řadě bych jí ráda poděkovala též za inspiraci pro moje další studium v oboru ochrany ovzduší.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a veškerou použitou literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 16. 5. 2023

Eliška Vlnasová

Abstrakt:

Tato rešerše odborné literatury se zabývá časovými trendy mokré atmosférické depozice síry a dusíku v horizontu čtyřiceti let ve třech regionech severní polokoule, a to v Evropě, Severní Americe a v jihovýchodní Asii. Mokrá atmosférická depozice transportuje sloučeniny síry a dusíku z atmosféry k zemskému povrchu prostřednictvím vertikálních nebo horizontálních atmosférických srážek. Nadměrné hodnoty těchto látek v depozici mohou způsobit řadu environmentálních problémů, jako například změnu biodiverzity, degradaci lesních porostů nebo změnu chemismu vody či půdy. Proto je třeba tyto hodnoty sledovat a vyhodnocovat. Síra a dusík se do atmosféry dostávají mimo jiné i emisemi antropogenního původu. Změna těchto emisí síry a dusíku za poslední čtyři dekády nepochybně ovlivnila časový vývoj trendů mokré depozice a cílem této práce je vývoj zmapovat a zhodnotit. Kromě trendů síry a dusíku se práce zabývá i změnou poměru iontů v mokré depozici, zejména změnou poměru iontu NH_4^+ ku NO_3^- v mokré depozici dusíku. Mokrá depozice síry v souladu s významným snížením emisí sloučenin síry zaznamenává znatelný pokles v Evropě i v Severní Americe, ovšem mokrá depozice dusíku v těchto regionech klesá mnohem méně výrazně nebo dokonce stagnuje. V jihovýchodní Asii dochází naopak k rapidnímu zvýšení emisí, které silně ovlivňují i hodnoty celkové mokré, a tedy i celkové depozice. Ukazuje se, že jihovýchodní Asie se vymyká ostatním regionům nejen v kvantitě depozice síry a dusíku, ale i ve vývoji jejích časových trendů.

Klíčová slova: trendy emisí, Evropa, Severní Amerika, jihovýchodní Asie, formy dusíku, znečištění ovzduší, dálkový přenos, kyselá depozice

Abstract:

This scientific literature review examines the time trends of wet atmospheric deposition of sulphur and nitrogen over a four decade period in three regions of the Northern Hemisphere, namely Europe, North America and Southeast Asia. The wet atmospheric deposition processes transport sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere to the Earth's surface via vertical or horizontal pathways. Excessive levels of these deposited compounds can cause a number of environmental problems, such as change in biodiversity, degradation of forest stands or change in water and soil chemistry. It is therefore necessary to monitor and evaluate these trends. Sulphur and nitrogen can enter the atmosphere through anthropogenic emissions, among other sources. The change in sulphur and nitrogen emissions over the last four decades has undoubtedly influenced the time trends of wet deposition. The aim of this work is to evaluate these patterns in addition to the sulphur and nitrogen trends. This work also addresses the change in wet deposition ion ratios, in particular the change in the ratio of NH_4^+ to NO_3^- in the wet deposition of nitrogen. Wet deposition of sulphur, in line with a significant reduction in sulphur compounds emissions, records a noticeable decrease in both Europe and North America, but wet deposition of nitrogen in these regions is decreasing less markedly or it is even stagnating. Southeast Asia, on the other hand, is experiencing a rapid increase in emissions, which strongly influences the values of total wet and therefore total deposition. It turned out that Southeast Asia surpassed other regions in the quantity of sulphur and nitrogen deposition and differed in its temporal trends.

Keywords: emission trends, Europe, North America, Southeast Asia, nitrogen forms, air pollution, long-range transport, acid deposition

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	ATMOSFÉRICKÁ DEPOZICE.....	8
2.1	Mokrá depozice.....	8
2.2	Suchá depozice.....	9
2.3	Kyselá depozice.....	9
2.4	Měření a modelování depozice.....	10
2.5	Síra v atmosféře.....	11
2.6	Dusík v atmosféře.....	11
3	EVROPA.....	13
3.1.1	Monitoring a monitorovací sítě – EMEP.....	13
3.1.2	Časové trendy v Evropě.....	14
3.1.2.1	Trendy mokré depozice síry v Evropě.....	14
3.1.2.2	Trendy mokré depozice dusíku v Evropě.....	15
3.1.2.3	Trend poměru iontů v mokré depozici v Evropě.....	17
4	SEVERNÍ AMERIKA.....	18
4.1	Spojené státy americké.....	19
4.1.1	Monitoring a monitorovací sítě – NADP/NTN.....	19
4.1.2	Časové trendy v USA.....	19
4.1.2.1	Trendy mokré depozice síry v USA.....	19
4.1.2.2	Trendy mokré depozice dusíku v USA.....	21
4.1.2.3	Trend poměru iontů v mokré depozici v USA.....	22
4.2	Kanada.....	23
4.2.1	Monitoring a monitorovací sítě – CAPMoN.....	23
4.2.2	Časové trendy mokré depozice síry a dusíku v Kanadě.....	23
4.2.2.1	Trend poměru iontů v mokré depozici v Kanadě.....	24
5	JIHOVÝCHODNÍ ASIE.....	24
5.1.1	Monitoring a monitorovací sítě v jihovýchodní Asii.....	24
5.1.2	Časový vývoj v jihovýchodní Asii.....	25
5.1.2.1	Trendy mokré depozice síry v jihovýchodní Asii.....	25
5.1.2.2	Trendy mokré depozice dusíku v jihovýchodní Asii.....	26
5.1.2.3	Trend poměru iontů v depozici v jihovýchodní Asii.....	27
6	POROVNÁNÍ REGIONŮ.....	28
7	ZÁVĚR.....	30
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	32

1 ÚVOD

Atmosférická depozice je důležitým procesem samočištění atmosféry, při kterém dochází k přenosu látek z atmosféry k zemskému povrchu (Warneck, 1988; Seinfeld a Pandis, 1998; Hůnová, 2016). Síra i dusík se do atmosféry dostávají řadou biotických i abiotických procesů. Do atmosféry se ale mohou dostat i vlivem člověka, který jejich sloučeniny produkuje v nadměrné míře již od průmyslové revoluce. Někteří odborníci prosazují myšlenku, že vliv člověka vedl dokonce ke vzniku nové epochy planety Země, tzv. antropocénu (Crutzen a Stoermer, 2000). Pro demonstraci vztahu společnosti k produkci těchto látek do ovzduší a k jeho ochraně mohou sloužit trendy atmosférické depozice.

Samotný přenos látek může nastat buď prostřednictvím mokré depozice, tj. atmosférických srážek, nebo prostřednictvím suché depozice, tj. plynných látek ve vzduchu a látek přenášených sedimentačními procesy z atmosféry (Braniš a Hůnová, 2009). Hodnoty mokré atmosférické depozice se snáze měří a vyhodnocují, zatímco hodnoty suché depozice nejsou přímo měřitelné, jsou stanovovány výpočtem, a jejich kvantifikace je tedy mnohem nepřesnější. Z toho důvodu je předmětem této práce mokrá atmosférická depozice.

Měření atmosférické depozice je důležitým ukazatelem stavu životního prostředí. Nadměrná depozice má nepříznivý vliv na ekosystémy (například ztráta druhové bohatosti vřesovišť ve Velké Británii a v Nizozemsku, devadesátá léta dvacátého století, Fowler et al., 2020), ale i na antropogenní prvky krajiny (látky obsažené v depozici mohou způsobit degradaci materiálů). S podobnými problémy se potýkají všechny hustě obývané oblasti (Fowler et al., 2020). V těchto oblastech může atmosférická depozice sloučenin síry a dusíku společně s dalšími vlivy způsobovat zdravotní potíže tamějším obyvatelům.

Sledování a vyhodnocování světových trendů depozice síry a dusíku je důležitým krokem v poznání vlivu člověka na koloběh těchto prvků na Zemi. Zároveň, z dostatečného množství dat je možné relevantně vyhodnotit situaci a aktivně na ni reagovat, například stanovením přísnějších emisních limitů. V USA byly díky platnému Zákonu o ochraně ovzduší (EPA 1, 2015) sníženy emise oxidů síry a dusíku z 23,1–25,2 milionů tun v roce 1990 na 3,7–11,5 milionů tun v roce 2015 (Feng et al., 2021), což patrně zapříčinilo snížení jejich depozice a zlepšení stavu životního prostředí v nejvíce zatížených oblastech.

V neposlední řadě je důležité, že kvůli dálkovému přenosu látek atmosférou mohou emise z jednoho státu působit formou depozice na území jiného státu a tím ohrožovat jeho ekosystémovou stabilitu. V roce 1979 byla uzavřena Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší

přesahujícím hranice států, Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, která měla tuto problematiku uchopit a na jejímž základě mohly vznikat další úmluvy na území zainteresovaných států (Fowler et al., 2020). Trendy atmosférické depozice mohou být v tomto případě dobrým nástrojem pro vyhodnocování účinnosti těchto regulací a podkladem pro provádění navazujících opatření.

Cílem bakalářské práce je srovnat časové trendy vývoje mokré atmosférické depozice síry a dusíku v regionech severní polokoule. Studovanými oblastmi jsou Evropa, USA, Kanada a jihovýchodní Asie (hlavně Čína a Japonsko). Tyto oblasti byly rozděleny do tří hlavních regionů, které jsem určila podle studie Aas et al. (2019) na základě hlavních regionálních monitorovacích sítí: (i) Evropa (Program spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě, EMEP), (ii) Severní Amerika (Národní program pro atmosférickou depozici, NADP a Kanadská síť pro monitorování ovzduší a srážek, CAPMoN) a (iii) jihovýchodní Asie (Monitorovací síť kyselé depozice v jihovýchodní Asii, EANET). Práce sleduje, zda v posledních čtyřech dekadách mokrá depozice síry a dusíku klesá a zda dochází ke změně v poměru iontů dusičnanových (NO_3^-) a amonných (NH_4^+) v mokré depozici dusíku. Získaná data touto rešerší jsou pro lepší časovou orientaci uváděna v kontextu vydávaných opatření, která si kladla za cíl snížit dopady emisí.

2 ATMOSFÉRICKÁ DEPOZICE

2.1 Mokrú depozice

Mokrú atmosférickú depozice se k zemskému povrchu dostává formou atmosférických srážek, vertikálních či horizontálních. Jsou jí z ovzduší odstraňovány plynné i pevné látky. Jedná se o epizodický děj, který závisí na aktuálním počasí. Látky mohou být z atmosféry odstraňovány deštěm, sněhem či kroupami, tedy vertikální depozicí, nebo může mokrá atmosférickú depozice působit v podobě mlhy, námrazy či jinovatky, tedy horizontální depozicí (Braniš a Hůnová, 2009).

Vznik vertikální mokré atmosférické depozice, proces inkorporace látek do srážek, může nastat dvěma různými způsoby. První situace, vypršení (rainout), nastává, když jsou znečišťující látky kondenzačními jádry vznikajících kapek. Druhá situace, vymývání (washout), nastává, když jsou aerosoly či plyny zachytávány kapkami deště nebo sněhovými vločkami při průchodu atmosférou. Významný vliv může mít vymývání podoblačného znečištění z kouřových emisních vleček, protože jsou zde látky velmi koncentrované (Braniš a Hůnová, 2009).

Horizontální depozice může být nemalou součástí celkové mokré depozice. V některých oblastech může mlha přispívat velkou částí do k mokré depozici. Mlha bývá totiž delší dobu v kontaktu s povrchem a s rostoucí nadmořskou výškou přibývá jejího vlivu (Braniš a Hůnová, 2009).

Vysokohorská půda je vystavována vysoké mokré depozici kvůli vysokým srážkovým úhrnům, například v Alpách (Tørseth et al., 2012), a zároveň je více náchylná k acidifikaci, protože nemá dostatečnou pufrací schopnost. Mokrý depozice dusičnanů, síranů a siřičitanů má kyselé pH, zatím co mokrá depozice amoniaku a amonného kationtu má zásadité pH (Doney et al., 2007).

2.2 Suchá depozice

Suchá atmosférická depozice je depozice aerosolu a plynů. Jedná se o přímý přenos látek z ovzduší na zemský povrch, ale zároveň jde o mnohem pomalejší proces než při mokré depozici. Probíhá kontinuálně. U pevných látek, částic, jde zejména o gravitační sedimentaci, k receptorům se dostávají adsorpčními ději. Plyny působí na receptory přímo z atmosféry. Intenzitu suché depozice ovlivňuje hlavně atmosférická turbulence (Kopáček et al., 2019), tvar povrchu a jeho chemická podstata (Braniš a Hůnová, 2009).

2.3 Kyselá depozice

V důsledku oxidačních procesů jsou v atmosféře kyselé reagující ionty přítomny v plynné a kapalné fázi anebo v podobě aerosolu (Hůnová, 2016). Jejich přítomnost způsobuje snížení pH vody v atmosféře, která je přenášena k zemskému povrchu prostřednictvím atmosférických srážek a na receptory působí jako kyselá depozice. Tento jev bývá populárně nazýván „kyselý déšť.“ Zároveň může kyselá depozice působit na receptory i prostřednictvím suché depozice. Na vzniku kyselé depozice se podílejí právě především sloučeniny síry a dusíku.

Jejich depozice způsobuje okyselování prostředí (acidifikaci), čímž vytváří řadu environmentálních problémů. Kyselá atmosférická depozice síry a dusíku má negativní vliv na vodní a terestrické ekosystémy. Například nejznámější katastrofou u nás byl úhyn lesních porostů v Krušných horách v důsledku kyselé depozice (Hruška et al., 2009). Kyselá depozice způsobuje také eutrofizaci a vznik přízemního ozonu, čímž rovněž poškozuje životní prostředí (Fowler et al., 2020). Dále například nižší pH ve vodních ekosystémech vede k nižšímu obsahu uhličitánů, a to může být hrozbou pro bentické a pelagiální organismy, které formují vápenaté schránky. Zároveň depozice (společně se salinitou) určuje parciální tlak oxidu uhličitého CO₂ nad vodní hladinou a tím ovlivňuje cyklus výměny oxidu uhličitého mezi vodou a vzduchem (Doney et al., 2007).

V roce 2000 bylo asi 11 % území Evropy ohroženo acidifikací (Tørseth et al., 2012). Může trvat až desítky let, než se acidifikované prostředí vrátí do původního stavu (Cheng et al., 2022). Acidifikace prostředí je závažným environmentálním problémem, kterým se zabývá řada výzkumných skupin nejen ve světě, ale i v České republice (Kopáček et al., 2002; Hruška et al., 2009; Oulehle et al., 2017; Stuchlík et al., 2017).

2.4 Měření a modelování depozice

Pro měření depozice se používají standardně jednotky $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ nebo $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Při měření mokré depozice se srážky odebírají v pravidelných intervalech, stanovuje se pH, konduktivita a koncentrace iontů. Jedná se o velmi slabě koncentrované roztoky, chyba při odběru, výpar ze sběrného zařízení či kontaminace vzorku může způsobit značné nepřesnosti při následné analýze. Existuje několik typů odběru mokré depozice. První typ, wet-only, umožňuje pouze odběr čistých atmosférických srážek, kdy odběrové zařízení (zpravidla automatické), je exponováno pouze po dobu srážek a vzorek není kontaminován suchou depozicí. Druhý typ odběru, tzv. bulk, slouží pro stálé měření depozice, měří tedy mokrou složku ve formě srážek a neidentifikovatelnou část složky suché. Třetí typ používá odběrové zařízení podkorunových srážek. Tento typ odběru se nazývá „throughfall“ a je nejefektivnější a zároveň nejekonomičtější metodou. Zahrnuje adsorbovanou suchou depozici a zároveň i depozici mokrou. Výsledek tohoto odběru závisí na typu vegetace, ze které jsou srážky sbírány. Všechny tyto metody jsou vhodné pro kvantifikaci vertikální mokré depozice. Horizontální mokrá depozice se měří obtížně a vzorek obvykle bývá nedostatečně objemný pro další analýzu (Braniš a Hůnová, 2009).

Pro zjišťování suché depozice, kterou nelze měřit přímo, se používá výpočet. Je nutné znát koncentraci látky v atmosféře blízko k povrchu a příslušnou depoziční rychlost. Jelikož na výsledné hodnoty má vliv celý proměnný systém zemské atmosféry, ve zjišťování skutečné suché depozice panují značné nejistoty (Braniš a Hůnová, 2009).

K modelování atmosférické depozice se používá celá řada modelů, jako CHIMERE, CMAQ, EMEP, MSC-W, LOTOS EUROS, MATCH, MINNI, EURODELTA-Trends model (Theobald, et. al., 2019). Takovéto modely slouží k prognóze vývoje a jako základ pro zavádění dalších kroků v ochraně ovzduší. Také jsou užitečné pro zpětné zhodnocení vývoje a trendů depozice. Ukazuje se, že modely zahrnující dálkový přenos látek atmosférou mají nejméně přesné předpovědi pro letní období (Theobald et al., 2019). Mohlo by to být způsobené variabilitou atmosférické teploty a stabilitních podmínek atmosféry.

2.5 Síra v atmosféře

Síra je v atmosféře přítomna ve třech oxidačních stupních a ve všech skupenstvích. Nejčastěji se síra vyskytuje ve formě solí kyseliny sírové, které jsou součástí aerosolu. Ve srážkách tyto částice způsobují snížení pH – okyselení srážek. V plynné formě se v atmosféře síra vyskytuje přirozeně jako sulfan (produkt anaerobních reakcí a sopečné činnosti), anorganicky jako oxid siřičitý a z organických látek hlavně jako dimethylsulfid a dimethyldisulfid (Braniš a Hůnová, 2009).

Depozice síranů ovlivňuje a násobí přirozený mechanismus mikrobiální redukce síranů. Antropogenním zvýšením obsahu síry v atmosféře, především spalováním fosilních paliv a metalurgickým průmyslem, dochází k narušení přirozeného koloběhu síry mezi atmosférou a ostatními sférami. Právě spalování fosilních paliv je nejznámějším antropogenním zdrojem znečištění. Podílí se na něm především oxid siřičitý, který je nejčastěji spojován s londýnským smogem a řadou další ekologických katastrof (Hewitt, 2001; Braniš a Hůnová, 2009).

Sirovodík z přírodních procesů v atmosféře reaguje na oxid siřičitý. Ten následně reaguje s kyslíkem a vlhkostí ve vzduchu za vzniku aerosolových kapiček kyseliny sírové (reakce 1). Ty poté mohou reagovat třeba s amoniakem za vzniku solí (reakce 2), podle Hewitt (2001).



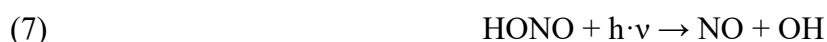
Z atmosféry se sloučeniny síry neúčinněji dostávají vymýváním z ovzduší. Oxidační produkt (oxid sírový) oxidu siřičitého ochotně reaguje s vodou za vzniku kyseliny sírové. To vede ke kyselé depozici a v důsledku k riziku acidifikace prostředí (Braniš a Hůnová, 2009).

2.6 Dusík v atmosféře

Dusík je hlavní složkou atmosféry. Chemická struktura molekuly dusíku N_2 se vyznačuje velice pevnou trojnou vazbou. Molekulární dusík je tedy málo reaktivní. Právě kvůli této vlastnosti musí být vstup dusíku zprostředkován nějakým mediátorem, například bakteriemi, nebo antropogenní činností. V atmosféře se dusík ve sloučeninách vyskytuje s oxidačními čísly od -III do IV. Mimo molekulární dusík má nejhojnější zastoupení oxid dusný N_2O . Ten relativně dlouho setrvává v atmosféře a velkou částí se podílí na skleníkovém jevu. Molekulární dusík i oxid dusný zaniká biologickou fixací. Na rozdíl od těchto přirozeně se vyskytujících plynů oxidy dusíku antropogenního původu, oxid dusný NO a oxid dusičitý NO_2 (označované jako NO_x), dávají za

vznik dusičnanům, které jsou součástí procesu okyselování srážek (Braniš a Hůnová, 2009; Hůnová, 2016)

Oxidované formy dusíku jsou emitovány z elektráren, průmyslu a dopravy (Fagerli a Ass, 2008). Podléhají řadě reakcí (reakce 3–7), na jejichž průběh má vliv sluneční záření. Fotochemické reakce probíhají s přísunem energie ve formě fotonů (Hůnová, 2016).



Pro vznik depozice jsou zásadní reakce, při nichž vzniká kyselina dusičná (reakce 8 a reakce 9). Suchá depozice probíhá jak plynnou kyselinou dusičnou, tak samotnými sloučeninami NO_x (Hůnová, 2016)



Další formou dusíku v atmosféře je amoniak NH_3 . Amoniak je redukována forma dusíku. Ta se do atmosféry dostává hlavně z živočišné a zemědělské produkce (Nopmongol et al., 2019). Jedná se o plyn zásaditého charakteru, jeho depozice je alkalická (Doney et al., 2007), vytvářející kationty NH_4^+ , které reagují za vzniku amonných solí. Ty jsou poté součástí aerosolů například společně s hydrogensíranu. Redukované formy dusíku (NH_y) vznikají několika reakcemi, viz níže reakce 10–13 (Hůnová, 2016). Díky jejich alkalickému charakteru jsou amonné ionty důležitou součástí neutralizačních procesů atmosféry, mají potenciál regulovat oxidační procesy oxidu siřičitého (Fowler et al., 2007).



Z rovnic je patrné, že reakce dusíku v atmosféře jsou vzájemně propojené a navazují na sebe. Pokud je v atmosféře dostatek látek, které mohou reagovat s amonným kationtem, suchá depozice redukováných forem dusíku roste. Při snížení emisí oxidu siřičitého tvorba dusičnanu amonného kompenzuje tvorbu síranu amonného, ale ne zcela. Ovšem v případě mokré depozice není rozdíl tak výrazný (Fagerli a Ass, 2008).

Organické formy dusíku v atmosférických srážkách tvoří nemalou část obsahu celkového dusíku. Označují se DON (Disolved Organic Nitrogen, rozpuštěný organický dusík).

3 EVROPA

3.1.1 Monitoring a monitorovací sítě – EMEP

Ve druhé polovině dvacátého století emise sloučenin síry a dusíku z průmyslu způsobovaly v Evropě enviromentální zátěž. Dne 28. 9. 1984 byl ve švýcarské Ženevě přijat protokol (v platnost vstoupil až v roce 1988) o Dlouhodobém financování programu spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě (Long-term Financing of the Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe). V rámci programu EMEP jsou každoročně publikovány celoevropské ročenky o stavu pevných částic, uhličitánů, anorganických látek, o stavu ozonu, o těžkých kovech, POPs a VOC sloučeninách v ovzduší. Celkový počet monitorujících stanic shromažďujících data pro EMEP je 352 (Hjellbrekke, 2020). První plošné vyhodnocování naměřených dat mokré depozice proběhlo v roce 1977 s celkovým počtem 60–80 monitorovacích stanic. Iniciovala ho Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj, OECD (Tørseth et al., 2012).

V České republice se na monitoringu a shromažďování dat podílí Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), na Slovensku Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), v Německu německá Agentura ochrany životního prostředí (Umweltbundesamt) a Leibnitzův institut pro výzkum troposféry (Leibniz Institute for Tropospheric Research, TROPOS), v Rakousku rakouská Agentura ochrany životního prostředí (Umweltbundesamt) a v Polsku Institut meteorologie a vodního hospodářství (Institute of Meteorology and Water Management) a Institut ochrany životního prostředí (Institute of Environmental Protection), uvádějí zdroje EMEP a Hjellbrekke, 2020.

3.1.2 Časové trendy v Evropě

3.1.2.1 Trendy mokré depozice síry v Evropě

V sedmdesátých a osmdesátých letech dvacátého století docházelo k silné acidifikaci prostředí kvůli kyselé atmosférické depozici, která vznikala z nadměrných emisí z průmyslu, dopravy, energetiky a spalování fosilních paliv. V důsledku vyhodnocení stavu ovzduší, které bylo průběžně analyzováno již od roku 1980, byl v roce 1985 dne 8. července přijat Helsinský protokol, který si kladl za cíl snížení emisí síry o 30 % (UNECE 1, 1995). Ten vstoupil v platnost v roce 1987. Již ke konci osmdesátých let vzrostlo pH atmosférických srážek o 0,5 až o 0,6 (Tørseth et al., 2012).

V osmdesátých letech dvacátého století se Evropa zabývala hlavně snižováním emisí síry, a tím v důsledku i snižováním samotné depozice síry (Fowler et al. 2007). Tehdy byla dle Tørsetha et al. (2012) mokrá depozice síry zredukována o 34 %. Překvapivě snížení depozice bylo vyšší než samotná redukce emisí, což mohlo být způsobené i nižšími srážkami v tomto období. Theobald et al. (2019) uvádějí, že v roce 1990 byla depozice síry $7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. V devadesátých letech dvacátého století mokrá depozice síry měla podle modelů v práci Theobald et al. (2019) průměrně klesat o 32–48 %, Tørseth et al. (2012) uvádějí snížení pouze o 24 %, kdy byla podle nich redukce emisí větší než redukce depozice. Studie i modely se shodují, že pro síru byl v tomto období trend výrazně klesající, ovšem modely mají tendenci pokles nadhodnocovat. Mokrá depozice klesala přibližně na 80 % území Evropy a nejvíce klesala ve východní a centrální Evropě (Theobald et al., 2019).

V roce 1994 byl přijat v Oslu protokol o dalším snížení emisí síry navazující na Helsinský protokol, v platnost byl uveden v roce 1998 a stanovoval cíle do roku 2010 (UNECE 2, 1995). Na začátku dvacátého prvního století pokračoval klesající trend mokré depozice síry, ale mírnějším tempem. Depozice mezi lety 2000–2009 poklesla o 25–38 %, hlavně na severu a západě Evropy. V jižní a jihovýchodní části Evropy neklesala mokrá depozice síry tak významně pravděpodobně kvůli rostoucím srážkovým úhrnům, kdy objem spadlých srážek vykompenzoval úbytek emisí síry. Na konci této dekády (okolo roku 2010) byla hodnota mokré depozice síry v Evropě nejnižší, hodnoty se pohybovaly okolo $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Theobald et al., 2019). Tørseth et al. (2012) uvádějí pokles mokré depozice pouze v tomto období o 12 %.

Tørseth et al. (2012) zároveň uvádějí, že na přelomu první a druhé dekády dvacátého prvního století bylo 15 % emisí síry v Evropě jen z loďní dopravy. Podle Fowler et al. (2007) v okrajových regionech jejich studie, zahrnujících hlavně evropská moře Atlantského oceánu a jeho severovýchodní východní část západně od Velké Británie, je mokrá depozice (ovšem nejen

síry) rostoucí až o 45 %, právě kvůli emisím z lodní dopravy. Jejich práce potvrzuje předchozí studie a udává značný pokles koncentrace síry ve srážkách od roku 1980 do roku 2000 o 40 % až o 60 %, ale v regionech s vyšším poměrem plochy moří klesá trend méně.

Tørseth et al. (2012) uvádějí, že pro síru je trend v období od roku 1980 do roku 2009 značně klesající, celkem depozice klesá o 80 %. Ovšem v letech 1990–2009 mokrá depozice síry klesá pouze o 64 %. Theobald et al. (2019) pro druhou dekádu tohoto období stanovuje roční klesající trend síry 3–5 %. Fowler et al. (2007) se ve své práci více méně shodují s Tørseth et al. (2012), uvádějí, že trend v tomto období klesal o 75 %.

Roku 1999 byl přijat Gothenburský protokol, který měl snížit hodnoty acidifikace, přízemního ozonu, míru eutrofizace a stanovit emisní cíle od roku 2010 do roku 2020 pro SO₂, NO_x, VOCs a NH₃ na základě předchozích protokolů. V platnost vešel v roce 2005 s postupnými úpravami, poslední proběhly v roce 2019 (UNECE 3, 1995). Keresztesi et al. (2019) uvádějí, že mezi lety 2000–2017 byla průměrná mokrá roční depozice 15,88 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, kdy kvůli množství spadlých srážek byly nejvyšší hodnoty naměřeny ve Slovinsku a nejnižší v Řecku. Na druhou stranu Marchetto et al. (2021) uvádějí mokrou depozici síry v období 2010–2014 pouze 2,14–4,19 kg·ha⁻¹·rok⁻¹. Nejvyšší depozice byla podle tohoto průzkumu naměřena ve východní až střední Evropě, naopak nejnižší v jižní Evropě. V případě Keresztesi et al. (2019) byla hodnota získána výpočtem. Výsledek byl vypočítán jako vážený průměr koncentrace iontů síry ve srážkách vynásoben množstvím srážek spadlých na daném území. Proto se pravděpodobně udaná hodnota liší. Podobný vývoj trendů uvádějí ročenky vydávané EMEPem. V roce 2015 byla koncentrace sloučenin síry ve srážkách nejvyšší ve východní Evropě, okolo 0,4–0,7 mg·l⁻¹, v západní Evropě byly hodnoty nízké (Hjellbrekke, 2015). V roce 2020 byla stále oblastí s nejvyšší koncentrací síry ve srážkách východní Evropa, ovšem průměrné hodnoty byly nižší a to 0,2–0,5 mg·l⁻¹ (Hjellbrekke, 2020).

Za poslední dvě dekády byl v Evropě jednoznačně určen klesající trend pro mokrou depozici síry, který se projevil hlavně ve Velké Británii, Švýcarsku a v průmyslových oblastech západního Německa a jižního Polska (Chang et al. 2022). Tato studie také uvádí, že mokrá depozice síry byla 2–5 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, tedy ve shodě s Marchetto et al. (2021).

3.1.2.2 Trendy mokré depozice dusíku v Evropě

O depozici dusíku se Evropa začala zajímat až později, pro oxidované formy dusíku byla stanovena omezení na začátku devadesátých let dvacátého století a pro redukované formy teprve až v Gothenburském protokolu. Od doby, kdy dochází k redukci emisí síry, více NH₃ reaguje za

vzniku dusičnanu amonného nikoliv za vzniku hydrogensíranu amonného. Kvůli snížení emisí síry je v atmosféře nadbytek látek schopných oxidovat molekuly dusíku, tedy předpokládá se, že koncentrace NO_x je vyšší, než kdyby nedošlo k redukci emisí asi o 15 % až o 30 % (Fagerli a Aas, 2008). Nicméně tento rozdíl údajně vykompenzoval pokles emisí NO_x . Do roku 1990 byl v jihozápadní Evropě (Španělsko, Portugalsko) zaznamenán významný rostoucí trend mokré depozice (přírůstek byl až 70 %), v Itálii byl trend také rostoucí, ale v devadesátých letech dvacátého století začal klesat. Ve východních zemích bylo snížení mokré depozice dusíku výraznější (Fagerli a Aas, 2008). NO_x produkované lodní dopravou vedly k vykompenzování klesajícího trendu emisí dusíku, pokles tedy nebyl tak významný. Nad oceány a v přímořských oblastech docházelo ke zvýšení koncentrace dusičnanů ve srážkách o 50 % až o 60 % (Fowler et al., 2007; Theobald et al., 2019). Ovšem v rozporu s tím Fagerli a Aas (2008) uvádějí, že zvýšení lodní dopravy na koncentraci oxidů dusíku ve srážkách v období 1980–2003 nemělo vliv.

V roce 1988 byl v Sofii přijat protokol zahrnující redukci oxidů dusíku (NO_x), v platnost byl uveden v roce 1991 (UNECE 4, 1995). V devadesátých letech dvacátého století depozice NO_x klesala především v severovýchodní Evropě, v ostatních regionech Evropy také, ale ne tak výrazně. Depozice redukováných forem také klesala. Ve východní Evropě klesala s výraznějším trendem než jinde, pravděpodobně v důsledku zásadních socioekonomických změn a ekologičtějšímu zemědělství. Naopak třeba v Lamanšském průlivu byl nárůst depozice NO_x jednak kvůli vysokým srážkám a jednak kvůli lodní dopravě (v roce 2000 byly emise v okolí průlivu La Manche nejvyšší v Evropě, Vet et al., 2014, což svědčí o závažnosti emisí lodní dopravy). V roce 1990 byla mokrá depozice oxidovaných forem asi $3,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a redukováných forem asi $5,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, následně mokrá depozice spíše rostla a pak v letech 1995–1996 byla depozice nízká, v důsledku velkého sucha (Theobald et al., 2019). Pro NO_x se v období 1990–2000 jedná o snížení o 12 %, kdy pokles emisí byl větší než pokles depozice, a pro NH_3 jde o snížení o 14 %, poměr redukce a emisí je stejný jako v případě oxidovaných forem (Tørseth et al., 2012).

Na přelomu milénia byla depozice NO_x nejnižší, asi $2,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, poté se trend jevil spíš stabilní. K poklesu dochází hlavně v centrální a západní Evropě. Mokrá depozice redukováných forem se od svého krátkodobého minima v polovině devadesátých let také stabilizovala, nebo mírně rostla (Theobald et al., 2019). V letech 2000–2009 mokrá depozice NO_x klesala o 12 % a depozice NH_3 o 11 %, v obou případech byla redukce emisí menší než snížení depozice (Tørseth et al., 2012). V jižní části severovýchodních států byl pokles výraznější než jinde, protože velká část redukováných forem je nad toto území přenášena dálkovým přenosem (z Polska 15–20 %, z Německa 11–15 %), v roce 2003 to bylo celkem asi 60 % (Fagerli a Aas, 2008).

Podle Tørseth et al. (2012) v období 1980–2009 klesla depozice oxidovaných forem dusíku o 30 % a redukovaných o 27 % a za období 1990–2009 klesla o 25 % u oxidovaných i redukovaných forem. Theobald et al. (2019) udávají pro NO_x klesající trend 1,2–2,3 % za rok a pro NH₃ 0,9–2,7 % za rok.

Gothenburgský protokol byl dalším milníkem pro depozici dusíku. Podle Keresztesi et al. (2019) byla mokrá depozice amonných kationtů v letech 2000–2017 3,43 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, pro oxidované formy dusíku uvádí 8,93 kg·ha⁻¹·rok⁻¹. Marchetto et al. (2021) uvádějí mokrou depozici redukovaných forem 3,22–5,14 kg·ha⁻¹·rok⁻¹ a oxidovaných forem 2,51–4,69 kg·ha⁻¹·rok⁻¹. Rozdílné výsledky obou studií depozice NO_x mohou být způsobeny vzájemným ovlivňováním iontů při dálkovém přenosu (Fowler et al., 2007), ale také způsobem sběru dat v této studii, viz výše. Nejvyšší mokrá depozice oxidovaných forem byla ve středovýchodní Evropě, nejnižší v jižní Evropě. Depozice redukovaných forem byla nejvyšší ve střední Evropě, ve východním Německu a na severu Švýcarska (Marchetto et al., 2021). Podle ročenky EMEP (Hjellbrekke, 2015) byla v roce 2015 koncentrace redukovaných forem dusíku ve srážkách nejvyšší také ve střední Evropě 0,5–0,7 mg·l⁻¹, dále od středu 0,4–0,6 mg·l⁻¹ a nejnižší hodnoty byly pouze v okrajových částech. Pro oxidované formy byly naměřeny nízké hodnoty pouze v severních částech Evropy (v severní Skandinávii, na severu Britských ostrovů a na Islandu), vysoké hodnoty ve střední Evropě 0,3–0,6 mg·l⁻¹ (Hjellbrekke, 2015). V roce 2020 pro redukované formy byla koncentrace nejvyšší na severu Itálie, v severním Německu a v jižním Dánsku, v Maďarsku a na východním pobřeží Španělska asi 0,4–0,7 mg·l⁻¹. Pro oxidované formy byly oblastmi s nejvyšší koncentrací hranice ČR s Polskem, Dánsko a jih Norska a také severní Polsko s hodnotami 0,3–0,6 mg·l⁻¹ (Hjellbrekke, 2020).

Chang et al. (2022) ve shodě s ostatními studii uvádí za poslední dvě dekády statisticky nevýznamně klesající trend pro depozici oxidovaných forem s průměrnou mokrou depozicí pohybující se mezi 2–8 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, pro redukované formy nevýznamný trend s průměrnou roční depozicí také přibližně 2–8 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, nejnižší hodnoty na západě a na severu Evropy.

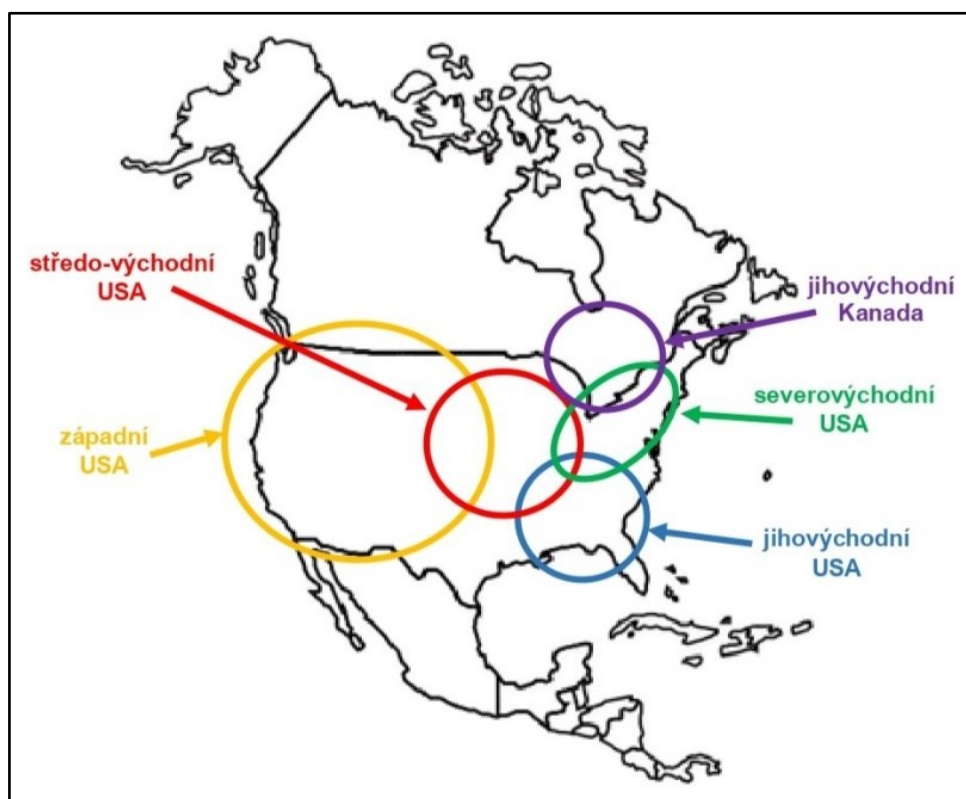
3.1.2.3 Trend poměru iontů v mokré depozici v Evropě

V období 1980–2000 byl poměr obsahu iontů SO₄²⁻ ku obsahu NO₃⁻ v mokré depozici významně vyšší než jedna, od té doby dochází ke snižování poměru, ovšem síranové anionty v tomto období stále převyšují, trend je významně klesající ve střední Evropě (Keresztesi et al., 2019; Chang et al., 2022). Oxidované formy síry a dusíku začaly na přelomu milénia v mokré depozici ustupovat, zatímco redukované formy dusíku přibývat.

Od roku 2000 převažují ve srážkách amonné ionty nad dusičnanovými napříč všemi evropskými zeměmi. Ve střední Evropě se výrazně zvyšuje poměr redukovaných ku oxidovaným formám. Důvodem změny poměru redukovaných a oxidovaných forem dusíku bude pravděpodobně zavedení regulací pro NO_x sloučeniny a zvýšení živočišné a zemědělské produkce. Chang et al. (2022) uvádí, že koncentrace redukovaných forem dusíku v mokré depozici je vysoká ve střední i východní Evropě a ve světovém měřítku je srovnatelná s Asií. Minimálně v několika významně zatížených oblastech tomu tak ještě okolo roku 2010 bylo, uvádějí Vet et al. (2014).

4 SEVERNÍ AMERIKA

V severovýchodní části USA a v jihovýchodní části Kanady byla historicky soustředěna majorita průmyslové výroby těchto obou států. Po zhodnocení dat jsem se rozhodla vývoj trendů v těchto dvou státech prezentovat jako jeden region, jelikož jak americké, tak kanadské monitorovací sítě a vládní orgány musely a musí úzce spolupracovat kvůli dálkovému přenosu látek (Lynch et al., 1999) a kvůli zachování sdílených ekosystémů, jak vodních, tak terestrických. Pro prostorovou orientaci v následující dvou podkapitolách poslouží Obrázek 1.



Obrázek 1 Schématické znázornění popisovaných oblastí v následujícím textu.

4.1 Spojené státy americké

4.1.1 Monitoring a monitorovací sítě – NADP/NTN

V roce 1978 vznikl Národní program atmosférické depozice (National Atmospheric Deposition Program, NADP), který se měl zaměřit na měření a vyhodnocování stavu atmosféry v USA. V roce svého založení měl program NADP 22 monitorovacích stanic (Lamb a Bowersox, 2000) a v současné době čítá asi 260 stanic (NADP 1, 1985). Pod NADP patří několik monitorovacích sítí, jako je například Národní síť pro vyhodnocování trendů (National Trends Network, NTN) a Síť monitoringu amoniaku v okolním prostředí (Ambient Ammonia Monitoring Network, AMoN), která má asi 100 monitorovacích stanic a pod NADP byla přidána v roce 2010. Od konce osmdesátých let dvacátého století se používá spojení NADP/NTN (NADP 2, 1985). V letech 1992–2019 pod NADP patřila i Síť integrovaného atmosférického výzkumu (Atmospheric Integrated Research Monitoring Network, AIRMoN), která poskytovala data každý den a tím značně pomohla zpřesnit výsledky průzkumů v těchto letech (NADP 2, 1985).

4.1.2 Časové trendy v USA

V následujících dvou kapitolách nebudou uváděna numerická data z ročenek NADP, která byla určena mým subjektivním odhadem podle datových map, mohou se tedy lišit. Nicméně mnou odhadnuté trendy vývoje depozice uváděny budou, jelikož se shodují s rešerší literatury.

4.1.2.1 Trendy mokré depozice síry v USA

V roce 1970 vchází v platnost Zákon o ochraně ovzduší (The Clean Air Act, CAA), který ustanovoval regulaci emisí ze stacionárních a mobilních zdrojů a který umožnil organizaci americké Agentuře pro ochranu životního prostředí (United States Environmental Protection Agency, EPA) ustanovit Národní standardy pro kvalitu ovzduší (National Ambient Air Quality Standards NAAQS, EPA 1, 2015). Již v roce 1977 byly vydány dodatky o předcházení zhoršení kvality ovzduší a její odchýlení od počátečního stavu, název byl tehdy doplněn částí „o znečištění ovzduší“ (The Clean Air Act and Air Pollution, CAAA, BOEM, 2010).

USA je a byla světovou ekonomickou velmocí, její průmyslová výroba se soustředí hlavně na východním břehu řeky Mississippi v severním cípu okolo tří velkých americko-kanadských jezer. Z plošných měření prováděných v sedmdesátých letech dvacátého století je jasné, že hlavní oblastí znečištění ovzduší a nejvíce zatíženou depozicí síry budou východní státy. Ve východních státech byla v sedmdesátých a osmdesátých letech mokrá depozice síry 9–11 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, nejvyšší hodnoty byly pozorovány na severovýchodě průměrně okolo

11 kg·ha⁻¹·rok⁻¹ (Nopmongcol et al., 2019). Podle Lynch et al. (1999) byl v osmdesátých letech dvacátého století a i na začátku devadesátých let dvacátého století zaznamenán největší úbytek mokré deponice síry ve dvacátém století. Ve východních státech se jednalo průměrně o úbytek 7,9 % za rok, pro severovýchodní USA 12 %, ovšem pro jihovýchodní USA se jednalo o přírůstek 2,7 % za rok. Pro západní státy byl úbytek mokré deponice síry 14,2 % za rok. Zároveň podle této studie byla na stanicích na východním břehu řeky Mississippi průměrně nižší deponice, zatímco na tom západní vyšší, to by mohlo poukazovat na rozvoj a prostorový přesun emisních zdrojů směrem na západ. Nejvyšší koncentrace síry ve srážkách byla zaznamenána také v severovýchodní části USA přesahující 2,5 mg·l⁻¹, v jihovýchodní 1,5 mg·l⁻¹, v centrálních státech okolo 1 mg·l⁻¹ a na západě USA 0–0,5 mg·l⁻¹ (Likens et al., 2001).

V roce 1990 vstupují v platnost další dodatky Zákona o ochraně ovzduší adresující problémy s kyselými dešti, přízemním ozonem, úbytkem ozonové vrstvy, viditelností a toxicitou ovzduší (BOEM, 2010). Dále v devadesátých letech dvacátého století bylo zavedeno obchodování s emisemi díky tzv. cap-and-trade programům. Což je v podstatě o obchodování s emisními povolenkami (EPA 2, 2016). V první polovině devadesátých let dvacátého století došlo ke snížení mokré deponice síry v celé USA o 22 % (Nopmongcol et al., 2019). Ti zároveň uvádějí, že v severovýchodní oblasti se deponice snížila jen málo a byla stále okolo 9 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, naopak na jihovýchodě ke snížení nedošlo. Lynch et al. (1999) uvádí pro roky 1995–1997 na severovýchodě úbytek o 3,2 % za rok, naopak na jihovýchodě přírůstek o 11,3 % za rok a na západě přírůstek o 19,9 % za rok. K výraznějšímu zhoršení dochází hlavně na Floridě a v jižní Illinois. Úbytek na severovýchodě je podle nich způsoben opatřeními CAA zavedenými v roce 1990, největší dopad měli na Pennsylvanii, Marylandu, Západní Virginii, Virginii a ve státě New York. Koncentrace ve srážkách byla nižší než v předchozí dekádě (Likens et al., 2001).

Na počátku milénia byly zavedeny státní implementační plány, vládní nástroje na regulaci a kontrolu emisí v jednotlivých státech, které umožňovaly individuální přístupy, tzv. SIP, State Implementation Plan. V roce 2002 celková deponice ve východních státech stále přesahovala 10 kg·ha⁻¹·rok⁻¹ a v západních oblastech byla menší než 5 kg·ha⁻¹·rok⁻¹ (Benich et al., 2022). Nopmongcol et al. (2019) uvádí pro mokrou deponici síry na severovýchodě v roce 2000 asi 7 kg·ha⁻¹·rok⁻¹ a na jihovýchodě asi 6 kg·ha⁻¹·rok⁻¹, kde mezi lety 2005–2010 došlo ke znatelnému snížení. Podle nich se deponice síry snížila v období 1990–2009 o 32 %. Likens et al. (2021) uvádějí pro rok 2006 koncentraci síry ve srážkách 2,5 mg·l⁻¹ v místech s nejvyšší mírou deponice, na severovýchodě okolo 2 mg·l⁻¹, na jihovýchodě okolo 1 mg·l⁻¹.

V roce 2011 ustanovila EPA pravidla, která měla za úkol omezit dálkový přenos látek atmosférou mezi státy, tzv. Cross-State Air Pollution Rule, CSAPR (EPA 3, 2016). Benich et al. (2022) uvádějí mokrou depozici síry v období 2002–2017 pro celou USA $7,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, nejvyšší hodnoty v Ohio Valley $13,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, na severovýchodě $11,48 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a na jihovýchodě $9,82 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. V kontrastu s tím Likens et al. (2021) vyobrazuje, že koncentrace v roce 2016 byla koncentrace ve srážkách (mimo severovýchod) nízká, a to do $1,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Ročenka NADP z roku 2021 ukazuje přetrvávající centrum znečištění v Louisianě, jinak v celé USA dochází k mírnému zlepšení, ovšem ne tak optimistickému, jako predikovali Nopmongcol et al. (2019). Podle Chang et al. (2022) byla v posledních dvaceti letech mokrá depozice ve východní části USA $2,1\text{--}5,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, okolo jezer $5,1\text{--}10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a na západě méně než $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$.

Údajně, mokrá depozice tvoří více než polovinu celkové depozice síry v celé USA již od sedmdesátých let dvacátého století, větší část tvoří mokrá depozice hlavně v západních státech (Nopmongcol et al., 2019). Podle Likens et al. (2021) ve východní USA stoupl pH od roku 1986 z 4,1 na přibližně 5 v roce 2016 a ti zároveň uvádějí, že koncentrace síry ve srážkách od osmdesátých let dvacátého století poklesla o 80 %. Všechny studie se shodují, že pokles mokré depozice síry v celé USA je znatelný, ovšem v centrech znečištění jsou hodnoty stále vysoké.

4.1.2.2 Trendy mokré depozice dusíku v USA

Depozici dusíku v sobě zohledňoval již Zákon o ochraně ovzduší z roku 1970. V sedmdesátých letech podle Nopmongcol et al. (2019) byla mokrá depozice oxidovaných forem $2\text{--}3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a redukovaných forem okolo $1,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a v osmdesátých letech dvacátého století byly hodnoty podobné. V polovině osmdesátých let dvacátého století podle Du et al. (2014) mokrá depozice redukovaných forem dusíku klesala, depozice oxidovaných forem také, ale méně, ovšem na konci této pětiletky opět vzrostla ještě na vyšší úroveň, než v roce 1985. To mohla způsobit vyšší frekvence automobilové dopravy na severovýchodě. Stejně jako v případě síry se i mokrá depozice dusíku jak redukovaných, tak oxidovaných forem, liší podle regionů a oblastí. Pro NO_x platí, že oblasti s největší depozicí jsou podobně situované jako pro síru, zatímco pro NH_y platí, že takové oblasti jsou posunuty více na západ. Koncentrace oxidovaných forem dusíku ve srážkách byla největší mezi New Yorkem a Erijským jezerem, v celé severovýchodní oblasti to bylo zhruba $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, v centrální USA a na jihovýchodě $0,4\text{--}1,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, další velmi zasažené oblasti byli jižní Nevada, Utah a Colorado až $1,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, západní USA měla hodnoty nízké. (Likens et al., 2021).

V roce 1990 byla mokrá depozice dusíku (oxidovaných i redukovaných forem) vyšší než v předchozích dvou dekádách (Nopmongcol et al., 2019). V devadesátých letech byla zavedena vládní opatření, která značně pomohla redukcí emisí (EPA 2, 2016; EPA 4, 2015; EPA 5, 2014; Du et al., 2014). K největšímu poklesu mokré depozice dusíku dochází v druhé polovině devadesátých let dvacátého století a v první polovině první dekády dvacátého prvního století (Du et al., 2014; Nopmongcol et al., 2019). Na konci devadesátých let dvacátého století byla mokrá depozice redukovaných forem soustředěna na středo-východě $3\text{--}4,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a vysoké hodnoty měly i centrální USA $1,5\text{--}3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Pro oxidované formy byly centry mokré depozice západní hranice státu New York, severní hranice Pensylvánie a přilehlé oblasti (NADP, 1985; Du et al., 2014). V období 1990–2009 byla v USA snížena mokrá depozice oxidovaných forem snížena o 29 % a redukovaných forem pouze o 9 % (Feng et al., 2021).

Největší klesající trendy pro oxidované formy dusíku byly zaznamenány na severovýchodě a jihovýchodě. Na těchto územích v první dekádě současného století byl trend pro NO_x klesající, ale v druhé dekádě rostoucí (Benich et al., 2022). Na přelomu dekád (v letech 2011–2012) byla depozice redukovaných forem na středo-východě větší než $3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, na severovýchodě přes $2,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ a v místech s nejvyšší mokrou depozicí až přes $5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Du et al., 2014). Při srovnání ročenek NADP za poslední dvacet let je patrné, že mokrá depozice NO_x vyšší v oblasti Ohio Valley, povodí Mississippi, a hlavně v jižní Louisianě, kde zůstávají hodnoty mokré depozice stále vysoké. Pro oxidované formy je vývoj k nižší depozici zřetelný, ale pro redukované formy není patrný. Podle Chang et al. (2022) byly hodnoty pro oxidované formy nižší, pokles mokré depozice oxidovaných forem má významný trend pouze na severovýchodě, kde naopak trend redukovaných forem není významný, ale pro západní oblasti je významně rostoucí.

Od osmdesátých let bylo zredukováno 66 % obsahu NO_x ve srážkách, zatímco téměř 0 % obsahu NH_y (Likens et al., 2021). Koncentrace redukovaných forem byla nejvyšší mezi lety 1989–2016 (Feng et al., 2021).

4.1.2.3 Trend poměru iontů v mokré depozici v USA

Poměr iontů $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_3^- - \text{N}$ byl v roce 1985 0,72, zatímco v roce 2012 to bylo 1,49 (Du et al., 2014). V období, kdy začala depozice oxidovaných forem v severovýchodní oblasti klesat, docházelo k poklesu celkové mokré depozice dusíku ve východní USA. Naopak na západě docházelo k nárůstu celkové mokré depozice, jelikož tam značně rostla mokrá depozice forem redukovaných hlavně kvůli chovu zvířat, rozvoji zemědělské činnosti a zvýšení používání hnojiv (Du et al., 2014; Nopmongcol et al., 2019; Benich et al., 2022). V napříč celou USA se však depozice dusíku jeví stabilní právě kvůli výměně iontů. Du et al. (2014) uvádějí, že v období

1985–2012 se zvýšil obsah redukovaných forem v mokré depozici na severu o 19 %, na jihu o 57 %, na středo-západě o 42 %, na západě dokonce o 101 % a v celé USA o 49 %. Poměr iontů síry a dusíku je proměnlivý a záleží na geografické poloze.

4.2 Kanada

4.2.1 Monitoring a monitorovací síť – CAPMoN

Kanadské monitorovací stanice se nacházejí předně při jižní hranici s USA. Pouze v jihovýchodních provinciích jsou stanice rozmístěny relativně rovnoměrně (Cheng et al., 2022). Kanadská síť monitorující ovzduší a srážky (The Canadian Air and Precipitation Monitoring Network, CAPMoN) průběžně monitoruje regionální trendy znečišťujících látek v atmosféře. Její zájmen je zejména problematika kyselých dešťů, smog, pevné částice a rtuť ve vzduchu a ve srážkách. Založena byla v roce 1983 a doplnila Kanadskou síť pro odběr vzorků srážek (Canadian Network for Sampling Precipitation, CANSAP) a Síť pro monitorování ovzduší a srážek (Air and Precipitation Network, APN), podle Government of Canada, 2002.

Níže uvedená data se týkají oblastí Kanady při hranici s USA, pokud není stanoveno jinak.

4.2.2 Časové trendy mokré depozice síry a dusíku v Kanadě

V Kanadě vyvolávala největší obavy kyselá depozice dusičnanových a síranových iontů. V roce 1985 měla série kyselých dešťů za následek úbytek lesního porostu v okrese Muskoka v provincii Ontario (Fowler et al., 2020). V roce 1989 měly naměřené srážky v severovýchodní USA a ve východní Kanadě ze 72 % nižší pH než 5. Ve středovýchodní Kanadě to bylo v osmdesáti osmi procentech případů a v oblastech na hranicích s USA na východním pobřeží Severní Ameriky až v devadesáti sedmi procentech případů (Feng et al., 2021).

V roce 1991 uzavřeli Spojené státy Americké a Kanada dohodu o snaze zmírnit dálkový přenos znečišťujících látek, tzv. Kanadsko-americkou dohodu o kvalitě ovzduší, Canada-United States Air Quality Agreement, AQA (EPA 4, 2015). Poté v roce 1995 se v USA stává účinnou první fáze Programu o kyselých deštích, Acid Rain Program, ARP, který je součástí amerického Zákonu o ochraně ovzduší, The Clean Air Act (EPA 5, 2014). Zavedením tohoto programu došlo ke snížení emisí ze spalování uhlí v USA, což znamenalo pro Kanadu menší množství přenášeného znečištění ze Spojených států amerických. Ve dvacátém století se kanadské Ontario potýkalo s dálkovým přenosem znečišťujících látek hlavně z oblasti Ohio Valley. Na přelomu milénia byl zaznamenán významný klesající trend pro mokrou depozici síry v Kanadě právě díky snížení produkce emisí z tepelných elektráren (Antoni et al., 2011). V období 1988–2007 mokrá depozice

oxidovaných forem dusíku celkově klesá, zatímco v devadesátých letech dvacátého století kvůli vyšší intenzitě dopravy depozice roste, a v období 2000–2011 opět klesá (Antoni et al., 2011). V období 1984–2011 byla celkem mokrá depozice síry a dusíku snižována o 0,07–1 kg·ha⁻¹ ročně. V roce 2016 oproti období 1989–1991 byla roční depozice síry a dusíku na jihu Kanady snížena o 77 % a okolo velkých amerických jezer až o 85–89 % (Feng et al., 2021).

Od období 2002–2007 roční mokrá depozice oxidovaných forem dusíku začala zprudka klesat, zatímco mokrá depozice redukováných forem rostla a v období 2006–2012 převýšila depozici oxidovaných forem (Antoni et al., 2011; Feng et al., 2021). V období 2000–2017 klesala mokrá depozice oxidovaných i redukováných forem dusíku nejvíce v centrální oblasti provincie Québec o 36 % a na jihovýchodě Kanady o 15–22 %, pro síru to bylo asi 51–61 % všude, ovšem nejvíce v jihovýchodní Kanadě. V období 2017–2018 byla mokrá depozice síry a dusíku v jihovýchodní části Kanady srovnatelná se severními a okrajovými částmi (Cheng et al., 2022).

4.2.2.1 Trend poměru iontů v mokré depozici v Kanadě

Trendy jsou v případě Kanady podobné jako v USA, oxidované formy dusíku s hlavně tvoří mokrou depozici hlavně na východě, redukováné formy spíše na západě, ale pro Kanadu jsou výsledky relativně vyrovnané (Cheng et al., 2022). Největší depozice NH_y je v provinciích Alberta a Saskatchewan.

5 JIHOVÝCHODNÍ ASIE

V regionu jihovýchodní Asie se budu zaměřovat hlavně na Čínu a Japonsko, tyto země mají na celkové depozici v jihovýchodní Asii podíl asi 75 %, samotná Čína přispívá asi šedesáti procenty a to hlavně z oblasti jihovýchodní Číny, která je nejvíce socioekonomicky vyspělou částí Číny (Kuribayashi et al., 2012). Zároveň se majorita měřících stanic nachází právě ve východní Číně a na území Japonska (Liu et. al, 2016).

5.1.1 Monitoring a monitorovací sítě v jihovýchodní Asii

Do roku 2000 v Asii neexistovaly nadnárodní programy pro měření a vyhodnocování dat depozice nebo koncentrace látek v srážkách. Data byla sice měřena, ale pouze jednotlivými správními orgány (př. Ministry of environment Japan), nebo univerzitami. Čínská zemědělská univerzita, China Agricultural University, spravuje v Číně 66 (Zhang et al. ,2021) monitorovacích stanic v rámci Národní sítě monitorující depozici dusíku, Nationwide Nitrogen Deposition

Monitoring Network. Například právě Zhang et al. (2021) pro svoji práci o změnách depozice dusíku v období 1980–2018 museli pro období do roku 2000 použít data získaná z recenzovaných článků.

V jihovýchodní Asii operuje od roku 2001 Východoasijská monitorovací síť kyselé depozice, Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, EANET, se sídlem v Japonsku, která se zabývá monitoringem nejen kyselé depozice, ale i znečištěním ovzduší. V rámci této skupiny spolupracují státy: Čína, Indonésie, Japonsko, Laos, Malajsie, Mongolsko, Myanmar, Filipíny, Jižní Korea, Thajsko, Rusko, Vietnam a Kambodža. Data a ročenky jsou od roku 2000 publikovány periodicky. V současné době mají síť EANET asi 61 monitorovacích stanic pro mokrou depozici a 54 stanic pro suchou depozici (EANET, 2019).

Většina těchto monitorovacích stanic ovšem měří bulk depozici. Data jsou často uváděna i v $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ nebo $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{měsíc}^{-1}$. Tyto dva faktory stanovují, že data bez adekvátního přepočtu hůře srovnatelná s Evropou a Severní Amerikou.

5.1.2 Časový vývoj v jihovýchodní Asii

5.1.2.1 Trendy mokré depozice síry v jihovýchodní Asii

V Číně byly v roce 1982 vydány první Standardy kvality okolního ovzduší, Ambient air quality standards, které měly snížit emise šesti tehdy největších polutantů (Wang et al., 2023). V jihovýchodní Asii se mokrá depozice síry v osmdesátých letech dvacátého století pohybovala mezi 9–11 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. V druhé polovině osmdesátých let dvacátého století byla depozice síry soustředěna mimo jiné i na území Severní Koreji. V devadesátých letech dvacátého století to bylo již 12–13 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ a vysoké hodnoty roční depozice síry se pohybovaly hlavně na území jihovýchodní Číny. V návaznosti na předchozí snahu o zlepšení kvality ovzduší byly standardům v letech 1988, 1996, 2000 a následně i v 2012 a 2018 vystaveny dodatky (Wang et al., 2023). V období 2001–2005 do celkové depozice přispěl 3 % výbuch sopky Miyakejina v červnu roku 2000 (sopka se nachází asi 180 km jižně od Tokia). V tomto období byla mokrá depozice síry v jihovýchodní Asii nejvyšší a to okolo 15,24 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Pro celé období 1981–2005 to bylo průměrně 12,37 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Kuribayashi et al., 2012). Z uvedených dat je zřejmé, že trend mokré depozice síry byl výrazně rostoucí a maximum depozice se vyskytovalo na počátku 21. století.

V období 1981–2005 se zvýšil dálkový přenos síranů ve výškách 1500–2000 m nad zemí z území Číny na území Japonska dvaapůlkrát. Čína je dlouhodobě hlavním zdrojem látek pro

depozici síry v Japonsku (Lui et al., 2016; Yagama et al., 2021). Přestože se v Japonsku pod touto hladinou snížila koncentrace síranů o 25 %, depozice v Japonsku stoupla o více než třetinu. V ročních obdobích, kdy je více srážek, je mokrá depozice významnější (v jihovýchodní Číně spadne průměrně více srážek, hodnoty mokré i bulk depozice tam budou vysoké, uvádějí Lui et al., 2016), v Číně to nastává hlavně léte, v Japonsku na jaře. Japonské pobřeží je vystaveno vysoké depozici i v zimě kvůli zimním monzunům (Kuribayashi et al., 2012).

Od osmdesátých let dvacátého století do první poloviny první dekády dvacátého století vzrostl vliv emisí z Číny na celkové emise jihovýchodní Asie z 65 % na 72 %. Průměrný přírůstek depozice síry za rok v jihovýchodní Asii byl 2,5 % ročně (Kuribayashi et al., 2012). Liu et al. (2016) uvádějí bulk depozici síry v letech 2000–2013 okolo $23 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, ve východní Číně to bylo dokonce okolo $36 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, ovšem v druhé polovině tohoto období to bylo pro celou Čínu méně než v první polovině, tedy je zde patrný lehce klesající trend.

Lui et al. (2016) také stanovují, že největší příspěvek pro depozici síry v Číně má spalování fosilních paliv s hodnotami okolo 76 %. EANET potvrzuje, že mezi lety 2003 a 2017 dochází ke znatelnému snížení mokré depozice síry nejen v Číně, ale i v Japonsku a Jižní Koreji, naopak k nárůstu pro některé oblasti ve Vietnamu, Indonésii, Malajsii a Mongolsku.

5.1.2.2 Trendy mokré depozice dusíku v jihovýchodní Asii

Již první čínské Standardy kvality ovzduší, Ambient air quality standards, na počátku osmdesátých let dvacátého století zahrnovaly oxidované formy dusíku (Wang et al., 2023). V roce 1980 byla bulk depozice oxidovaných forem dusíku asi $3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a redukovaných forem asi $5,1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Bulk depozice oxidovaných forem byla v první polovině osmdesátých let dvacátého století stále okolo $3,5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, v druhé polovině stoupla na hodnoty okolo $4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a tam setrvala až do roku 1995, kdy nastal značný nárůst. Naopak redukované formy v druhé polovině osmdesátých let dvacátého století začaly prudce stoupat na hodnoty $12\text{--}13 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Zhang et al., 2020). Další strmý nárůst byl zaznamenán v roce 1995.

V druhé polovině devadesátých let dvacátého století byla bulk depozice redukovaných forem až $25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, oxidovaných až $8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Bulk depozice NO_x zůstává od té doby stabilní. Maximální depozice dusíku byla okolo roku 2000 (Zhang et al., 2020). Wang et al. (2023) uvádějí, že ve standardech vydávaných čínskou vládou v roce 2000 bylo upuštěno od zájmu o snížení oxidovaných forem dusíku, ale v další úpravě v roce 2012 byly oxidované formy dusíku zařazeny zpět. Ovšem žádný z těchto doposud standardů nezahrnuje redukované formy dusíku.

Podle Zhang et al. (2020) se celková depozice dusíku začala stabilizovat okolo roku 2005. Ti také uvádějí zajímavý fakt, že depozice dusíku v Číně pochází z 86 % z emisí z domácí antropogenních zdrojů. Čína tedy velkým dílem znečišťuje sama sebe, ale zároveň se podstatně podílí na znečišťování ostatních států. V období 1980–2010 došlo v Číně k nárůstu emisí NO_x a NH_y , ale emise NO_x následně klesaly v důsledku opatření a tím klesala i celková depozice dusíku.

V letech 2011–2015 byla mokrá depozice oxidovaných forem okolo $4,2 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a redukovaných okolo $5,9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Yu et al., 2019). V letech 2016–2018 byla mokrá depozice celkového dusíku asi $13,5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Yu et al., 2019) a bulk depozice dusíku asi $15\text{--}16 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Zhang et al., 2020), zatímco celková depozice redukovaných forem (bulk i suchá) zůstává stabilní, bulk depozice redukovaných forem klesá (Zhang et al., 2020). Pro oxidované formy je to naopak. Díky Plánu nulového nárůstu používání hnojiv, Zero Increase Action Plan for national fertilizer use, údajně dochází v období 2010–2020 v Číně ke snížení emisí amoniaku ze zemědělství (Yu et al., 2019). V roce 2018 se bulk depozice redukovaných forem pohybovala okolo $9,5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a oxidovaných forem okolo $9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Zhang et al., 2020). To ovšem ukazuje na rostoucí trend v posledních pěti letech. V poslední dekádě byla většina území Číny ohrožena acidifikací, a to teoreticky jen z celkové depozice dusíku, bez uvážení depozice síry (až $40 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$).

Trendy depozice redukovaných forem dusíku v Japonsku od roku 2000 se zdají být stabilní, nejvyšší hodnoty má depozice v období 2005–2007 a 2010–2014. Pro oxidované formy se zdá být trend lehce rostoucí s nejvyššími hodnotami v období 2010–2013 (EANET, 2019).

Mokrá depozice dusíku je v letech 2003–2017 nejvyšší v Malajsii, silně rostoucí trend se objevuje na Filipínách a v Myanmaru. V období 2015–2017 je značný rostoucí trend v městských oblastech ve Vietnamu, a i v Číně (EANET, 2019).

5.1.2.3 Trend poměru iontů v depozici v jihovýchodní Asii

Ve druhé polovině dvacátého století převažovaly v depozici ionty síry podobně jako v USA a Evropě. Depozice síry prokazatelně klesala, ale stále je řádově vyšší než depozice dusíku. Společně s depozicí síry klesala i depozice oxidovaných forem dusíku, ale celková depozice dusíku ještě na přelomu tisíciletí rostla. Poté začala klesat, protože začala klesat depozice redukovaných forem v bulk depozici (Zhang et al., 2020). To znamená snížení mokré depozice NH_y a zvýšení suché depozice NH_y . Mohlo by to být kvůli efektivnímu snižování emisí NO_x a emisí síry, které reagují s amoniakem a dávají tak vznik mokré depozici redukovaných forem.

Podle Zhang et al. (2020) v roce 2018 převažovaly redukované formy, ale je vidět, že se poměr iontů v následujících letech bude měnit.

6 POROVNÁNÍ REGIONŮ

V osmdesátých letech minulého století se v Evropě, ve Spojených státech amerických a v Kanadě začala veřejnost zajímat o kyselou atmosférickou depozici. Série kyselých dešťů v sedmdesátých a osmdesátých letech devadesátého století, ztráta lesních porostů (ČR, Německo, Polsko, Apalačské pohoří a další) a problémové smogové situace vyzvaly společnost k uvažování o stavu životního prostředí (Fowler et al., 2020).

S depozicí síry a dusíku nepochybně souvisí jejich emise, které přímo hodnoty depozice ovlivňují. V rámci zavedených opatření začaly emise a tím i depozice v Evropě a v Severní Americe značně klesat již od osmdesátých let dvacátého století. V devadesátých letech dvacátého století byl pokles depozice síry v Severní Americe a Evropě nejvýznamnější vůbec, protože emise byly efektivně snižovány. Evropané si oproti Američanům tehdy vedli lépe. V jihovýchodní Asii byly tehdy hodnoty emisí srovnatelné se Severní Amerikou (Ass et al., 2019). O depozice dusíku se v Evropě a Severní Americe v osmdesátých letech dvacátého století nevědělo mnoho, nebyla dostatečně omezována a její hodnoty tehdy v Evropě spíše rostly a v Severní Americe klesaly pouze nevýznamně. V obou regionech byla depozice dusíku na začátku devadesátých let nejvyšší. V jihovýchodní Asii se maximum depozice objevuje až o 10 let později. Hodnoty celkové depozice síry a dusíku byly v jihovýchodní Asii nejvyšší na počátku současného milénia. Přestože jihovýchodní Asie projevuje snahu o regulaci emisí, na depozici to nemá tak zásadní vliv jako v ostatních regionech, ovšem lze se domnívat, že kdyby k regulacím nedošlo, situace by byla značně horší (Vet et al., 2014; Xing et al., 2015).

V období 2000–2007 se hodnoty mokré depozice síry v jihovýchodní Asii pohybovaly v hodnotách až pětinašobně vyšších než v Severní Americe, hodnoty mokré depozice dusíku byly až třikrát vyšší než v Severní Americe. Na území Evropy v tomto období mokrá depozice síry a dusíku jednoznačně klesá, v jižní Evropě řádově více, naopak na severním pobřeží Skandinávie lehce roste kvůli vyšším srážkám. V USA dochází k poklesu ve východní části, ovšem na západní zvolna roste. V jihovýchodní Číně dochází k nárůstu mokré depozice až o 65 %, ale z části také kvůli vysokým srážkám (Vet et al., 2014). V posledních deseti letech je mokrá depozice v Evropě a v Kanadě stabilní nebo mírně klesající, v USA lehce roste depozice oxidovaných forem dusíku, depozice síry klesá. V jihovýchodní Asii depozice stále roste, stejně tak rostou emise. Mezi další

znečišťovatele v Asii patří také Indie, kde v období 1990–2015 byl zaznamenán výrazný nárůst emisí i mokré depozice síry (Aas et al., 2019). Zároveň kvůli nárůstu emisí z lodní dopravy jsou nadměrným koncentracím síry vystavovány i moře a oceány hlavně na jižní polokouli, nejhůře se na tom zdá být indické moře. Acidifikace oceánů je problematická hlavně v pobřežních oblastech, kvůli přísunu živin z lidské činnosti, dálkovému přenosu látek atmosférou a kvůli dalším stresovým faktorům, jako je třeba nadměrný rybolov (Doney et al., 2007).

Vet et al. (2014) ukazují, že celková depozice dusíku roste i na africkém kontinentě, hlavně v Nigérii, ve Středoafričské republice a v Etiopii. V budoucnosti bude třeba obrátit pozornost i na tyto rozvojové země.

V druhé polovině 20. století rostly emise oxidů dusíku z mobilních zdrojů (auta, lodní doprava) napříč regiony. Emise redukovaných forem dusíku začaly růst hlavně v agrikulturní oblastech (hnojiva, chov zvířat apod.). Tomu odpovídá i poměr iontů NH_4^+ ku NO_3^- v mokré i suché depozici, který je v Severní Americe a v Evropě v současnosti větší než jedna. V devadesátých letech v Evropě docházelo k poklesu depozice redukovaných forem hlavně v zemích bývalého Sovětského svazu, kde do teď zůstává nejvyšší. Pravděpodobně ještě nedošlo k úplné adaptaci na západní hospodářství. Přibližně v období 2000–2010 klesá depozice oxidovaných forem více než redukovaných v Evropě i v Severní Americe, kde depozice NH_y převýšila depozici NO_x krátce po roce 2010 (Liu et al., 2016). Redukované formy jsou dominantou depozice dusíku i v Jižní Americe a západní Africe (Vet et al., 2014). Liu et al. (2016) také uvádějí, že naopak v jihovýchodní Asii dochází k opačnému trendu. Od osmdesátých let celkově klesají hodnoty mokré depozice NH_y , která sice i v roce 2015 stále převyšovala NO_x (Yu et al., 2019), ale trend poměru iontů je klesající, a to hlavně v severní Číně. V jihovýchodní Asii má ve dvacátém prvním století větší podíl na depozici dusíku suchá nikoliv mokrá depozice. V tomto případě by tedy bylo dobré zaměřit detailnější výzkum na poměr a na trendy mokré i suché depozice v jihovýchodní Asii a zpracovat jej v samostatné práci.

V neposlední řadě je třeba zhodnotit, jaké následky může mít zvýšená depozice síry a dusíku. Pro reakce a výsledný dopad depozice existuje mnoho proměnlivých faktorů. Některé ekosystémy snášejí zátěž lépe, pro některé může být i lehká změna fatální. Například v Kanadě byly v roce 2006 překročeny hodnoty kritické zátěže pro povrchové toky a vodní plochy na území provincií Alberta, Manitoba a Saskatchewan kvůli způsobu zemědělského hospodaření na špatně propustné préríjní krajině. Na jižním cípu Ontaria byly též překročeny hodnoty kritické zátěže, tentokrát kvůli mokré depozici NO_x , 30 % chráněných území čelilo úbytku diverzity a změně chemismu půd a ekosystémů (Aherne a Posch, 2013).

Aherne a Posch (2013) také uvádějí, že snížení emisí dusíku nemusí být vždy pozitivní pro lesní ekosystémy, redukce NO_x zlepšuje kvalitu vod, ale může negativně ovlivnit růst lesů a jejich schopnost zachycovat oxid uhličitý. Redukce emisí síry má zase kladný vliv na zmírnění acidifikace půdy, ale v Evropě a v Severní Americe se po snížení emisí začal objevovat nedostatek síry v pěstovaných plodinách. Ovšem redukce emisí a v důsledku depozice vede k obnově ekosystémů a bezpochyby by se mělo pokračovat tímto směrem v budoucnosti.

O tom, že znečištění ve formě oxidů síry a dusíku má vliv na lidské zdraví není pochyb (Hewitt, 2001). Všechny studie ukazují největší depozici v aglomeracích, kde je nejvyšší hustota obyvatelstva. Studium a analýza celosvětových trendů depozice má nepochybně svoje místo v environmentálních vědách a je praktickým nástrojem pro zavádění opatření, která vedou ke zlepšování stavu životního prostředí vůbec.

7 ZÁVĚR

Mokrý depozice síry a dusíku prošla nemalým vývojem. V osmdesátých a devadesátých letech dvacátého století trend mokré depozice síry prokazatelně klesal v Evropě i v Severní Americe. Pokles mokré depozice, který měl největší vliv na celkové hodnoty depozice v těchto regionech, byl soustředěn v průmyslových centrech, kde pokles emisí v důsledku zavedených opatření značně ovlivnil vývoj časových trendů. V Evropě se jednalo hlavně o oblasti v západním Německu, v jižním Polsku a na jejich hranicích s Českou republikou, kde tehdy nadměrná depozice síry významně poškozovala lesní porosty. V Severní Americe byla takovým průmyslovým centrem severovýchodní USA a jižní Kanada, kde mokrá depozice ohrožovala chemismus velkých americko-kanadských jezer a vegetaci rozsáhlých lesů. Mokrá depozice dusíku byla středem zájmu politiků až později, její vývoj vrcholil v devadesátých letech dvacátého století. Poté došlo k relativní stabilizaci, která přetrvává dosud.

Časový vývoj poměru iontů v mokré depozici dusíku dosáhl jasných trendů. Dochází k plynulé změně poměru redukováných forem ku oxidovaným formám dusíku. Redukované formy produkované především zemědělstvím dosahují svých největších hodnot ve střední až středovýchodní Americe a v Evropě hlavně ve východních státech. Oxidované formy jsou v těchto světových regionech na ústupu, zatím co v jihovýchodní Asii je trend opačný.

V jihovýchodní Asii mokrá depozice síry a dusíku rostla již od osmdesátých let dvacátého století a její maximum bylo zaznamenáno během první dekády dvacátého prvního století. Přesto, že studie uvádějí snižování depozice síry i redukováných forem dusíku, se nedá hovořit

o výrazném snížení míry znečištění. V jihovýchodní Asii jsou trendy dost pesimistické a s nejasným budoucím vývojem, který závisí na mnoha faktorech.

Shromáždění informací k sestavení přehledu světových trendů mokré depozice tak, aby dostatečně reprezentovaly aktuální situaci a mohly i předpovědět její vývoj, podléhá řadě překážek. Recenzované články jsou často orientované jen na konkrétní oblast, nikoliv na celý region. Dále se často liší metodika měření a datové analýzy. Některé studie pracují částečně i s modely. V těchto studiích se často ukazuje, že modely mají tendenci podhodnocovat hodnoty mokré depozice, respektive nadhodnocovat její pokles. Studie jsou různě staré a jsou vypracovány za různá časová období, což může také působit zkreslení při porovnávání dat. V neposlední řadě především při srovnání Evropy a Severní Ameriky s jihovýchodní Asií mohou být data uváděna v jiných jednotkách.

Rešerše odborné literatury nemusí poskytovat přesný obraz reality z výše uvedených důvodů. Pro komplexní a přesný popis vývoje časových trendů mokré depozice by bylo vhodné zpracovat celkový přehled mokré depozice z dat získaných samotnými měřicími stanicemi a následně tato data prezentovat v podobě grafu či mapy.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Aas, W., Mortier, A., Bowersox, V., Cherian, R., Faluvegi, G., et al., 2019. Global and regional trends of atmospheric sulfur. *Scientific Reports* 9, 953.
- Arhene, J. & Posch, M., 2013. Impacts of nitrogen and sulphur deposition on forest ecosystem services in Canada. *Current Opinion in Environment Sustainability* 5, 108–215.
- Benish, S. E., Bash, J. O., Foley, K. M., Apple K. W., Hogrefe, C., et al., 2022. Long-term regional trends of nitrogen and sulfur deposition in the United States from 2002 to 2017. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 12749–12767.
- BOEM. 2010. Air Quality Act (1967) Or The Clean Air Act (CAA). [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.boem.gov/air-quality-act-1967-or-clean-air-act-cao>.
- Braniš, M. & Hůnová, I., 2009. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*, Karolinum, Praha, 351 s.
- Crutzen, P. J. & Stoermer, E. F., 2000. The „Anthropocene”. *Global Change Newsletters* 41, 17–18.
- Doney, S. C., Mahowald, N., Lima, I., Feely, R., Mackenzie, F. T., et al., 2007. Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system. *PNAS* 104, 14580–14585.
- Du, E., Vries, W., Galloway, J. N., Hu, X., Fang, J., 2014. Changes in wet nitrogen deposition in the United States between 1985 and 2012. *Environmental Research* 9, 095004.
- EANET. 2019. Summary of Fact Sheet of the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET). [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2020/04/0-Summary-of-Factsheets_compressed.pdf.
- EPA 1. 2015. Clean Air Act Requirements and History. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-requirements-and-history>.
- EPA 2. 2016. What Is Emissions Trading?. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.epa.gov/emissions-trading-resources/what-emissions-trading>.
- EPA 3. 2016. Overview of the Cross-State Air Pollution Rule (CSAPR). [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.epa.gov/csapr/overview-cross-state-air-pollution-rule-csapr>.

- EPA 4. 2015.U.S.-Canada Air Quality Agreement. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.epa.gov/power-sector/us-canada-air-quality-agreement>.
- EPA 5. 2014. Acid Rain Program. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://www.epa.gov/acidrain/acid-rain-program#overview>.
- Fagerli, H. & Ass, W., 2008. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003. *Environmental Pollution* 7, 41–47.
- Feng, J., Vet, R., Cole, A., Zhang, L., Cheng, I., et al., 2021. Inorganic chemical components in precipitation in the eastern U.S. and Eastern Canada during 1989–2016: Temporal and regional trends of wet concentration and wet deposition from the NADP and CAPMoN measurements. *Atmospheric Environment* 254, 118367.
- Fowler, D., Smith, R. I., Muller, J. B. A., Cape, J. N., Sutton, M., et al., 2007. Long Term Trends in Sulphur and Nitrogen Deposition in Europe and the Cause of Non-linearities. *Water, Air, & Soil Pollution* 7, 41–47.
- Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J., Heal, M. R., Grennfelt, P., et al., 2020. A chronology of global air quality. *The Royal Society Publishing* 378, 20190314.
- Government of Canada. 2002. Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN) [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/4baa2ee4-a8aa-457a-af26-aa13e96ee2f4>.
- Gu, F., Zhang, Y., Huang, M., Bo, T., Yan., H., 2015. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981 – 2010. *Atmospheric Environment* 123, 171–179.
- Hewitt, C. N., 2001. The atmospheric chemistry of sulphur and nitrogen in power station plumes. *Atmospheric Environment* 35, 1155–1170.
- Hjellbrekke, A., 2020. Data Report 2020. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds. EMEP. Dostupné z: https://projects.nilu.no/ccc/reports/EMEP_CCC-Report_1_2022_Data_Report_2020.pdf.
- Hjellbrekke, A., 2015. Data Report 2015. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds. EMEP. Dostupné z: <https://projects.nilu.no/ccc/reports/cccr1-2017.pdf>.
- Hruška J., Oulehle, F., Krám, P., Skořepová I., 2009. Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy 2. Vliv depozic síry a dusíku na půdy a lessy. *Živa* 3, 141–144.

- Hůnová., Iva., 2016. Atmosférická depozice dusíku. *Chemické listy* 11, 779–784.
- Chang., C.-T., Yang, C.-Y., Huang, K.-H., Huang, J.-C., Lin, T.-C., 2022. Changes of precipitation acidity related to sulfur and nitrogen deposition in forests across three continents in north hemisphere over last two decades. *Science of Total Environment* 806, 150552.
- Cheng, I., Zhang, L., He, Z., Cathcart, H., Houle, D., 2022. Long-term declines in atmospheric nitrogen and sulfur deposition reduce critical loads exceedances at multiple Canadian rural sites, 2000–2018. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 14631–14656.
- Kereszteszi, Á., Brisan, M.-V., Nita, I.-A., Bodor, Z., Szép, R., 2019. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environmental Science Europe* 31, 50.
- Kopáček, J., Bednář, J., Žák, M., 2019. *Jak vzniká počasí*. Karolinum, Praha, 333 s.
- Kopáček, J., Stuchlík, E., Veselý, J., Schaumburg, J., Anderson, I. C., et al., 2002. Hysteresis in Reversal of Central European Mountain Lakes from Atmospheric Acidification. *Water, Air and Soil Pollution* 2, 91–114.
- Kuribayashi, M., Oshara, T., Morino, Y., Uno, I., Kurkova, J., Hara, H., 2012. Long-term trends of sulfur deposition in East Asia during 1981–2005. *Atmospheric Environment* 59, 461–475.
- Lamb., D. & Bowersox., V., 2000. The national atmospheric deposition program: an overview. *Atmospheric Environment* 34, 1661–1663.
- Likens., G. E., Butler, T. J., Claybrooke, R., Vermeylen, F., Larson, R., 2021. Long-term monitoring of precipitation chemistry in the U.S.: Insights into changes and condition. *Atmospheric Environment* 245, 118031.
- Liu., X., Xu, W., Du, E., Pan, Y., Goulding, K., 2016. Reduced nitrogen dominated nitrogen deposition in the United States, but its contribution to nitrogen deposition in China decreased. *PNAS* 113, E3590–E3591.
- Liu, L., Zhang, X., Wang, S., Zhang, W., Lu, X., 2016. Bulk sulfur (S) deposition in China. *Atmospheric Environment* 135, 41–49.

- Lynch, J. A., Bowersox, V. C., Grimm, J. W., 2000. Changes in sulfate deposition in eastern USA following implementation of Phase I of Title IV of the Clean Air Act Amendments of 1990. *Atmospheric Environment* 34, 1665–1680.
- Marchetto, A., Simpson, D., Aas, W., Fagerli, H., Hansen, K., et al., 2021. Good Agreement Between Modeled and Measured Sulfur and Nitrogen Deposition in Europe, in Spite of Marked Differences in Some Sites. *Front. Environ. Sci.* 9, 734556.
- NADP 1. 1985. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://nadp.slh.wisc.edu/pubs/Annual-Data-Summaries/>.
- NADP 2. 1985. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://nadp.slh.wisc.edu/about/>.
- Nopmongcol, U., Beardsley, R., Kumar, N., Knipping, E., Yarwood, G., 2019. Changes in United States deposition of nitrogen and sulfur compounds over five decades from 1970 to 2020. *Atmospheric Environment* 209, 144–151.
- Oulehle, F., Chuman, T., Hruška, J., Krám, P., McDowell, W. H., et al., 2017. Recovery from acidification alters concentrations and fluxes of solutes from Czech catchments. *Biogeochemistry* 132, 251–272.
- Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics. Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley and Sons, New York, 1326 s.
- Stuchlík, E., Bitušík, P., Hardekopf, D. W., Hořická, Z., Kahounová, M., et al., 2017. Complexity in the Biological Recovery of Tatra Mountain Lakes from Acidification. *Water, Air, & Soil Pollution* 228, 184.
- Theobald, M. R., Vivanco, M. G., Aas, W., Andersson, C., Ciarelli, G., et al., 2019. An evaluation of European nitrogen and sulfur wet deposition and their trends estimated by six chemistry transport models for the period 1990–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 379–406.
- Tørseth, K., Aas, W., Breivik, K., Fjæraa, A. M., Fiebig, M., et al., 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 5447–5481.
- UNECE 1. 1995. The 1985 Helsinki Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z:

- <https://unece.org/environment-policy/air/1985-helsinki-protocol-reduction-sulphur-emissions-or-their-transboundary>.
- UNECE 2. 1995. Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-further-reduction-sulphur-emissions>.
- UNECE 3. 1995. Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-abate-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone>.
- UNECE 4. 1995. Protocol concerning the Control of Emissions of Nitrogen Oxides. [online] [cit. 17. 4. 2023] Dostupné z: <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-concerning-control-emissions-nitrogen-oxides>.
- Vet, R., Artz, R. S., Carou, S., Shaw, M., Ro, C.-U., et al., 2014. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* 93, 3–100.
- Wang, Z., Tan, Y., Guo, M., Cheng, M., Gu, Y., et al. 2023. Prospect of China's ambient air quality standards. *Journal of Environmental Sciences* 123, 255–269.
- Warneck, P., 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Academic Press, Inc., San Diego.
- Xing, J., Mathur, R., Pleim, J., Hogrefe, C., Gan, C.-M., et al., 2015. Observations and modeling of air quality trends over 1990–2010 across the Northern Hemisphere: China, the United States and Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2723–2747.
- Yagama, S., Ban, S., Xu, M., Sakurai, T., Itahashi, S., Matsuda, K., 2021. Trends of sulfur and nitrogen deposition from 2003 to 2017 in Japanese remote areas. *Environmental Pollution* 289, 117842.
- Yu, G., Jia, Y., He, N., Zhu, J., Chen, Z., et al., 2019. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience* 12, 424–429.
- Zhang, Y., Mathur, R., Bash, J. O., Hogrefe, C., Xing, J., Roselle, S. J., 2018. Long-term trends in total inorganic nitrogen and sulfur deposition in the US from 1990 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 9091–9106.

Zhang, W., Weng, X., Qi, L., Mengjuan, H., Aohan, T., et al., 2020. Changes of nitrogen deposition in China from 1980 to 2018. *Environment International* 144, 106022.