

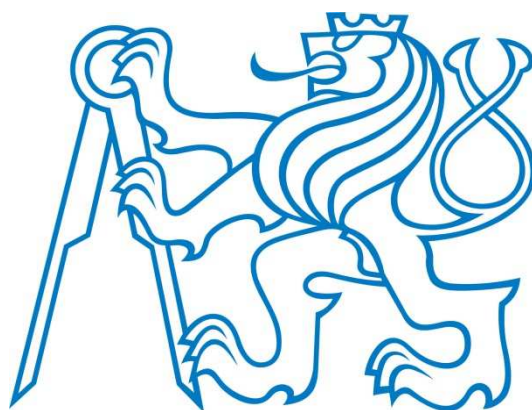
ČESKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie

Vliv meteorologických faktorů na atmosférickou depozici dusíku v podmínkách ČR

Diplomová práce



Bc. Vít Bäumelt

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Křeček, CSc.**

Praha, květen 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bäumelt Jméno: Vít Osobní číslo: 396537
Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství
Studijní obor: (3904T007) Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv meteorologických faktorů na atmosférickou depozici dusíku v podmínkách ČR
Název diplomové práce anglicky: Impact of meteorological factors on the atmospheric deposition of nitrogen on the territory of the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

Tato studie by měla zahrnovat:

- Rozbor problematiky atmosférické depozice dusíku v geografických podmínkách ČR.
- Rešerši dosavadních metod stanovení atmosférické depozice dusíku.
- Analýzu vlivu určujících meteorologických faktorů.
- Možnosti a omezení matematického modelování jednotlivých složek této depozice.

Seznam doporučené literatury:

- IPCC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. The fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO, Geneva.
- Lazaridis, M. (2011): First principles of meteorology and air pollution. Springer Netherlands, 362 pp.
- Shaw, E.M. (2011): Hydrology in practice. 4th edition, Span Press, London, 560 pp.
- Sutton, M.A. et al (eds) (2014): Nitrogen deposition, critical loads and biodiversity. Springer Netherlands, 535 pp.

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Josef Křeček, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

23.2.2017

Datum převzetí zadání


Bäumelt

Podpis studenta(ky)

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 11.6. 2017


.....
podpis autora práce

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Josefovi Křečkovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce a za jeho užitečné rady při její tvorbě a Českému hydrometeorologickému ústavu v Praze za poskytnutí dat srážkové depozice.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá atmosférickou depozicí dusíku na území České republiky. Atmosférická depozice dusíku je počítána pomocí Canopy budget modelu, který zohledňuje vliv lesních porostů na depozici. Cílem práce je posouzení vlivu meteorologických veličin na celkovou depozici dusíku. Stanovení atmosférické depozice pomocí Canopy budget modelu je velmi cenné z hlediska možného srovnání s jinými metodami stanovení depozice v ČR. Literární rešerše obsahuje charakteristiky atmosféry, atmosférické depozice a dusíku. Kapitola materiál a metody obsahuje informace o lokalitách měření depozice a Canopy budget modelu. V další části jsou výsledky atmosférické depozice a jejích složek, posouzení vlivu meteorologických faktorů na depozici dusíku, srovnání Canopy budget modelu s jinými metodami výpočtu depozice a možnosti a omezení matematického modelování celkové depozice dusíku z jednotlivých složek depozice.

Klíčová slova: atmosférická depozice dusíku, meteorologické faktory, Canopy budget model, možnosti matematického modelování depozice dusíku.

Abstract

The diploma thesis deals with the atmospheric deposition of nitrogen on the territory of the Czech Republic. Atmospheric nitrogen deposition is calculated using the Canopy Budget Model, which takes in account the impact of forest Canopies on deposition. The aim of the thesis is to assess the impact of meteorological variables on total nitrogen deposition. Determination of atmospheric deposition by Canopy budget model is very valuable in terms of possible comparison with other methods of determination of deposition in the Czech Republic. Literary research includes characteristics of the atmosphere, atmospheric deposition and nitrogen. The Material and Methods chapter contains informations about localities and principles of the Canopy budget model. In the next part are the results of atmospheric deposition and its components, assessment of influence of meteorological factors on nitrogen deposition, comparison of Canopy budget model with other methods of deposition calculation and possibility and limitation of mathematical modeling of total deposition of nitrogen from individual deposition components

Key words: **atmospheric deposition of nitrogen, meteorological factors, Canopy budget model, possibilities of mathematical modeling of nitrogen deposition.**

Obsah

1	Úvod	9
2	Literární rešerše	10
2.1	<i>Atmosféra</i>	10
2.1.1	Původ a historický vývoj atmosféry	10
2.1.2	Složení atmosféry	10
2.2	<i>Historie znečištění ovzduší</i>	13
2.3	<i>Atmosférická depozice</i>	13
2.4	<i>Vznik atmosférické depozice</i>	14
2.5	<i>Typy atmosférické depozice</i>	15
2.5.1	Mokrá depozice	15
2.5.2	Suchá depozice	16
2.5.3	Měření depozice	16
2.6	<i>Faktory ovlivňující atmosférickou depozici</i>	17
2.6.1	Zdroje znečištění	17
2.6.2	Emise	18
2.7	<i>Dusík v atmosféře</i>	19
2.7.1	Oxidy dusíku	19
2.7.2	Koloběh dusíku	20
3	Materiál a metodika	25
3.1	<i>Lokality</i>	25
3.2	<i>Výpočet atmosférické depozice z podkorunových srážek</i>	26
3.3	<i>Canopy budget model</i>	26
4	Výsledky a diskuse	29
4.1	<i>Srážky</i>	29
4.2	<i>Koncentrace</i>	31
4.3	<i>Depozice</i>	33
4.4	<i>Porovnání různých metod měření depozice dusíku v ČR</i>	41
4.4.1	ČHMÚ	41
4.4.2	CAMx	44
4.4.3	Canopy budget model	45
4.4.4	Porovnání trendů ČHMÚ a Canopy budget modelu (2000-2015)	46
4.5	<i>Vlivy meteorologických faktorů</i>	46
4.5.1	Srážky	46
4.5.2	Ostatní meteorologické faktory	47
4.6	<i>Matematické modelování</i>	53
4.6.1	Modelování na vybraných stanicích	57
5	Závěr	61
6	Seznam literatury	62
7	Přílohy	65
7.1	<i>Grafy atmosférické depozice a meteorologických veličin</i>	65

Seznam obrázků

Obr. 1 Vertikální profil atmosféry	11
Obr. 2 Schéma procesů, kterým podléhají znečišťující látky v ovzduší.....	14
Obr. 3 Koloběh dusíku.....	21
Obr. 4 Přírodní a antropogenní procesy produkující N_r a denitrifikace	23
Obr. 5 Globální toky NO_y a NH_x	23
Obr. 6 Scénář globální spotřeby dusíkatých hnojiv.....	24
Obr. 7 Složky tvořící celkovou depozici.....	28
Obr. 8 Průměrné srážkové úhrny stanic (2000-2015).....	30
Obr. 9 Průměrné roční srážkové úhrny (2000-2015)	31
Obr. 10 Koncentrace iontů srážek typu bulk.....	32
Obr. 11 Koncentrace iontů srážek typu throughfall.....	32
Obr. 12 Poměr průměrných koncentrací iontů srážek throughfall a bulk	33
Obr. 13 Stanice – průměrné celkové depozice dusíku (2000-2015)	34
Obr. 14 Průměrné roční celkové depozice dusíku	35
Obr. 15 Celkové depozice dusíku v letech 2003 a 2004.....	36
Obr. 16 Průměrné složky mokré a suché depozice dusíku (2000-2015).....	36
Obr. 17 Podíly složek mokré a suché depozice na celkové depozici dusíku	37
Obr. 18 Mokrý a suchý složka depozice	38
Obr. 19 Průměrné složky throughfall depozice a Canopy uptake dusíku (2000-2015)	38
Obr. 20 Podíly složek throughfall depozice a Canopy uptake na celkové depozici dusíku.....	39
Obr. 21 Throughfall depozice a Canopy uptake.....	40
Obr. 22 NO_3-N a NH_4-N depozice	40
Obr. 23 Staniční síť sledování kvality atmosférických srážek a atmosférické depozice, 2008.....	41
Obr. 24 Pole suché roční depozice dusíku ($NO_x - N$) 2008	42
Obr. 25 Pole celkové roční mokré depozice dusíku, 2008	43
Obr. 26 Pole celkové roční depozice dusíku, 2008	43
Obr. 27 CAMx – schéma modelu atmosférické depozice dusíku.....	44
Obr. 28 Celková atmosférická depozice dusíku v lesích ČR, 2008	44
Obr. 29 Canopy budget model - depozice dusíku v roce 2008	45
Obr. 30 Závislost srážek a celková depozice dusíku.....	47
Obr. 31 Závislost TDN na meteorologických faktorech.....	49
Obr. 32 Korelace met. veličin a TDN - rozptyly	51
Obr. 33 Závislost TDN na meteorologických faktorech – průměry stanic (2000-2015).....	52
Obr. 34 Závislost TDN na meteorologických faktorech – roční průměry (2000-2015)	53
Obr. 35 Rozptyl poměrů mokré depozice na TDN	54
Obr. 36 Rozptyl poměrů throughfall depozice na TDN.....	55
Obr. 37 Rozptyl modelovaných TDN z mokré depozice vůči vypočítané TDN	56
Obr. 38 Rozptyl modelovaných TDN z throughfall depozice vůči vypočítané TDN.....	56
Obr. 39 Luisino údolí – modelování TDN	57
Obr. 40 Buchlovice-Medlovice – modelování TDN	58
Obr. 41 U dvou louček– modelování TDN.....	58
Obr. 42 Červík – modelování TDN.....	59
Obr. 43 Průměr stanic – modelování TDN	59

Obr. 44 Buchlovice-Medlovice - závislost TDN a meteorologických faktorů	65
Obr. 45 Lesní potok - závislost TDN a meteorologických faktorů	66
Obr. 46 Červík - závislost TDN a meteorologických faktorů.....	67
Obr. 47 Pluhův Bor - závislost TDN a meteorologických faktorů	68
Obr. 48 Uhlířská - závislost TDN a meteorologických faktorů	69
Obr. 49 Jezeří - závislost TDN a meteorologických faktorů	70
Obr. 50 Lazy - závislost TDN a meteorologických faktorů.....	71
Obr. 51 U dvou louček - závislost TDN a meteorologických faktorů.....	72
Obr. 52 Luisino údolí WD - závislost TDN a meteorologických faktorů	73
Obr. 53 Modrý potok - závislost TDN a meteorologických faktorů	74

Seznam tabulek

Tab. 1 Složení vzduchu atmosféry.....	11
Tab. 2 Globální toky dusíku (Tg N/rok)	22
Tab. 3 Staniční síť sledování atmosférické depozice – bulk a wet-only	25
Tab. 4 Staniční síť sledování atmosférické depozice – throughfall	26
Tab. 5 Korekční faktory bulk depozice	27
Tab. 6 Srážkové úhrny bulk a throughfall.....	29
Tab. 7 Celkové atmosférické depozice dusíku na stanicích v ČR (2000-2015).....	34
Tab. 8 Porovnání TDN počítané Canopy budget modelem a metodou dle ČHMÚ.....	46
Tab. 9 Korelace meteorologických faktorů a atmosférické depozice	50
Tab. 10 Průměr odchylek stanic modelů TDN vůči vypočítané TDN	57

1 Úvod

Atmosféra dala díky svým unikátním vlastnostem potřebnou podmínku pro vznik života na Zemi. Podmínek vzniku života je samozřejmě více, ale atmosféra je jednou z nejdůležitějších. Ve složení atmosféry má největší zastoupení dusík, dalším významným plynem je kyslík. Zbylé plyny zaujímají pouhé procento celku, ale i tak jsou některé z těchto plynů nezbytné pro život.

V atmosféře jsou kromě vzduchu i další látky. Jsou to především vodní pára a jemné prachové částice. Vodní pára kondenzuje a dopadá zpět na zem v podobě atmosférických srážek.

Srážková voda není chemicky čistá. Obsahuje mnoho rozpuštěných látek. Dochází tak k depozici látek z atmosféry do jiného prostředí (hydrosféra, pedosféra, biosféra). Tímto procesem se atmosféra čistí, jiné prostředí může být naopak zatíženo. Příkladem negativního působení atmosférické depozice je acidifikace či eutrofizace. Výše zmíněný jev, kdy dochází k atmosférické depozici ze srážek, se nazývá mokrá depozice. Suchá atmosférická depozice naopak označuje přímou depozici látek ze vzduchu do okolního prostředí. Součet suché a mokré depozice tvoří celkovou atmosférickou depozici.

Pro posouzení vlivu celkové atmosférické depozice na okolní prostředí je nutná její kvantifikace. Měření obou složek depozice je možné pouze pomocí nepřímých metod měření. Navíc do procesu látkové výměny vstupuje i vegetace, která některé deponované látky z atmosféry přijímá a jiné naopak vylučuje. Mnohé metody při stanovení celkové depozice tuto skutečnost opomíjejí.

Cílem diplomové práce je určit vliv vstupujících meteorologických faktorů na celkovou atmosférickou depozici dusíku v ČR. Atmosférické srážky jsou v procesu stanovení atmosférické depozice dusíku klíčovým vstupem. Proto je v práci zkoumán jejich vliv na výslednou depozici dusíku. Pro posouzení celkové atmosférické depozice dusíku na území ČR byla použita data o koncentracích deponovaných látek ve srážkové vodě na stanicích provozovaných ČHMÚ. K výpočtu atmosférické depozice dusíku je použit Canopy Budget Model (Thimonier, et al., 2005), který zohledňuje i vliv vegetace. Vstupem tohoto modelu jsou data o koncentracích iontů ve srážkách jak pod vegetací, tak mimo vegetaci. Samotné výsledné hodnoty celkové atmosférické depozice dusíku jsou také velmi důležité, neboť používaných metod stanovení celkové depozice dusíku v ČR není příliš mnoho. Nabízí se tak možnost porovnání s dosavadními metodami, u kterých existují pochybnosti o podhodnocení celkové depozice (Bridges, et al., 2002).

2 Literární rešerše

2.1 Atmosféra

2.1.1 *Původ a historický vývoj atmosféry*

Původní atmosféra na Zemi měla před 4,6 mld. lety naprosto jiné složení. Neobsahovala kyslík a skládala se z plynů jako H_2 , CH_4 , N_2 , NH_3 , H_2O , CO a CN . Během ochlazování planety postupně začalo docházet ke kondenzaci vodní páry v mracích. Voda z mraků z počátku ani nedopadla na zem, protože se vypařila kvůli horkému vzduchu v atmosféře. Ochlazování nadále pokračovalo, až se teploty na zemském povrchu dostaly pod bod varu vody. Intenzivní deště tak zaplavily deprese na zemském povrchu a vytvořily se oceány. Tento dynamický proces zapříčinil obrovské snížení obsahu vodní páry (H_2O) a oxidu uhličitého (CO_2) v atmosféře. Po snížení obsahu CO_2 v atmosféře narůstá podíl obsahu dusíku (N_2) v atmosféře (Lazaridis, 2011).

S rozvojem primitivní formy života v moři dochází díky fotosyntéze k obohacování atmosféry kyslíkem (O_2). Po vytvoření vrstvy ozonu (O_3) v atmosféře, která chrání před UV zářením, začíná vznikat život i na zemi. Z celkového množství kyslíku vzniklého fotosyntézou pouhých 10 % zůstalo v atmosféře, zbylých 90 % je obsaženo v různých horninách, především ve vápenci ($CaCO_3$). V atmosféře existuje dynamická rovnováha mezi fotosyntézou, vazbou CO_2 na uhlíkaté horniny, procesy hoření a emisemi plynů z vulkánů. Proto koncentrace CO_2 a O_2 v atmosféře zůstávají během poslední miliardy let téměř neměnné. K určitému vývoji složení atmosféry však dochází neustále. Změny ve složení se mohou projevit na ekosystémech a životním prostředí (Lazaridis, 2011).

Nebýt vody, nebyla by možná fotosyntéza a atmosféra Země by se podobala atmosféře Venuše, kde CO_2 tvoří 95 % obsahu atmosféry, zbytek je tvořen převážně H_2O a N_2 . Právě dusík (N_2), pocházející z nitra Země, je se svými 78 % hlavní složkou atmosféry. Je tomu tak především díky jeho chemické stálosti a malé rozpustnosti ve vodě (Lazaridis, 2011).

2.1.2 *Složení atmosféry*

Atmosféra se skládá ze tří základních složek

- 1) směsi plynů, které tvoří suchý vzduch
- 2) vody ve všech třech skupenstvích
- 3) aerosolů (pevných či kapalných částic)

- Suchý vzduch

Směs plynů tvořící „suchý“ vzduch neobsahuje vodu ani aerosoly. „Suchý“ vzduch obsahuje v malých koncentracích i další plyny. Jsou nimi oxidy dusíku (NO , N_2O_5 , NO_2), oxid siřičitý (SO_2), oxid uhelnatý (CO), peroxid vodíku (H_2O_2), amoniak (NH_3), kyselina dusičná (HNO_3), kyselina sírová (H_2SO_4), radon (Rn) a jód (I_2).

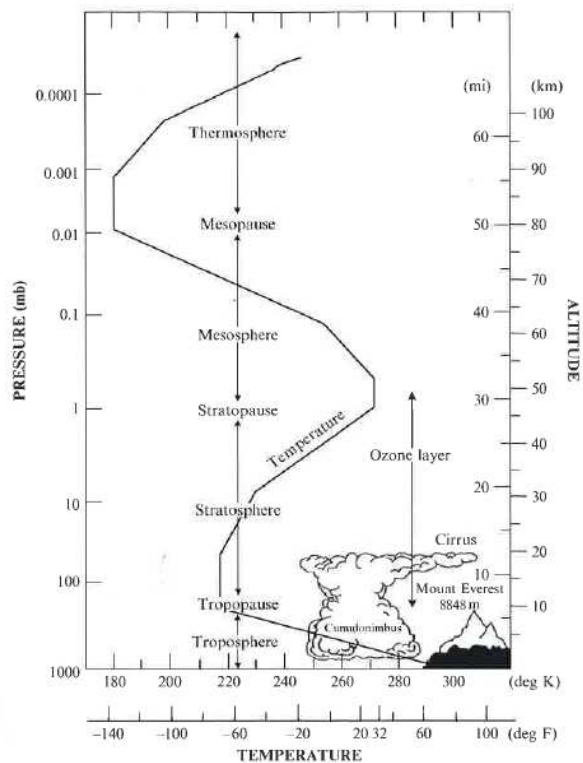
Složení „suchého“ vzduchu je v atmosféře až do výšky 85 km konstantní. Ačkoliv s výškou klesá hustota vzduchu, jeho procentuální složení je stejné. To znamená, že je vzduch dobře

promíchaný. Ve výškách nad 85 km dochází ke změnám ve složení atmosféry. Logicky se tak oblast do výšky 85 km nazývá homoféra a nad 85 km heteroféra.

Tab. 1 Složení vzduchu atmosféry (Lazaridis, 2011)

Name of gas	Symbol	Composition		Density (g/m ³)	Molecular weight	Critical temperature	Mean molecular velocity at 0°C
		Volume	Mass				
Nitrogen	N ₂	78.08	75.51	1,250	28.016	-147.2	454 m/s
Oxygen	O ₂	20.95	23.14	1,429	32.000	-118.9	425 m/s
Argon	Ar	0.93	1.3	1,786	39.944	-122.0	380 m/s
Carbon dioxide	CO ₂	0.03	-0.5	1,977	44.010	31.0	362 m/s
Neon	Ne	18.18 × 10 ⁻⁴	120 × 10 ⁻⁵	900	20.183	-228.0	-
Helium	He	5.24 × 10 ⁻⁴	8.10 ⁻⁵	178	4.003	-258.0	1,202 m/s
Methane	CH ₄	~2.2 × 10 ⁻⁴	-	717	16,04	-	-
Crypton	Kr	1.14 × 10 ⁻⁴	29.10 ⁻⁵	3,736	83,7	-63.0	-
Nitrous oxide	N ₂ O	(0.5±0,1) × 10 ⁻⁴	-	1,978	44,016	-	-
Hydrogen	H ₂	~0.5 × 10 ⁻⁴	0.35 × 10 ⁻⁵	90	2,016	-239.0	1,700 m/s
Xenon	Xe	0.087 × 10 ⁻⁴	3.6 × 10 ⁻⁵	5,891	131,3	16.6	-
Ozone	O ₃	(0-0.07) × 10 ⁻⁴	~0.17 × 10 ⁻⁵	2,140	48,0	5.0	-
		ωωζ (1-3) × 10 ⁻⁴	-	-	-	-	-

Veškerý život je vázán na spodní vrstvu atmosféry, která se nazývá troposféra. Ta dosahuje výšky 8 až 16 km v závislosti na zeměpisné šířce. V troposféře je 80 % celkové hmoty vzduchu a téměř všechna vodní pára. Je tak nejdůležitější vrstvou atmosféry z meteorologického hlediska. Mezi hlavní charakteristiky troposféry patří pokles teploty a tlaku vzduchu s rostoucí výškou, narůstající rychlost větru s výškou a výskyt vody ve všech třech skupenstvích (Obr. 1).



Obr. 1 Vertikální profil atmosféry (Lazaridis, 2011)

- Voda v atmosféře

Atmosféra obsahuje kromě „suchého“ vzduchu také vodní páru (vlhkost). Vodní pára vzniká evaporací vody z přírodních zdrojů (oceány, jezera, řeky), sublimací ledu a evapotranspirací z rostlin. Množství vodní páry v atmosféře je proměnné v čase a prostoru. Může se podílet 0 až 4 % na složení atmosféry.

Přítomnost vodní páry v atmosféře je důležitá kvůli následné kondenzaci, díky které se vytváří oblačnost. Srážky jsou nezbytné pro život na Zemi. Vodní pára se také chová jako zdroj termální energie pro atmosféru. Toto, ve vztahu s obrovskými přesuny tepla mezi zemským povrchem a atmosférou, má za následek vznik odlišností v počasí. Celých 25 % ze slunečního záření, která dopadá na zemský povrch, je spotřebováno na evaporaci vody a tato energie je následně uvolněna z atmosféry při kondenzaci vody.

- Aerosoly v atmosféře

Atmosférické aerosoly se skládají z pevných nebo kapalných částic, které jsou obsaženy ve vzduchu. Aerosoly jsou jak přírodního (větrná eroze, sopečný prach, odpařená mořská sůl), tak antropogenního (emise z dopravy, průmyslu a domácností) původu. Aerosoly vypouštěné ve formě pevných částic se nazývají primární aerosoly. Zatímco aerosoly vzniklé z molekul vodní páry ve vzduchu se nazývají sekundární aerosoly.

Hlavním mechanismem odstranění aerosolů z atmosféry je suchá a mokrá depozice. Suchá depozice je spojena s gravitační silou. Mokrá depozice je vázána na srážkovou činnost. Doba zdržení částic aerosolů v atmosféře je od několika dní až po několik týdnů, neboť záleží na počasí. Podle velikosti se dělí aerosoly na jemné částice (průměr do 2,5 μm) a hrubé částice (průměr větší než 2,5 μm).

Aerosoly mají několik důležitých vlastností (Lazaridis, 2011):

- jsou kondenzačními jádry pro tvorbu oblačnosti
- podílí se na chemických reakcích v atmosféře a ovlivňují ekosystémy (ozónová díra, acidifikace, eutrofizace)
- mají dopad na lidské zdraví
- rozptylem a absorpcí mění intenzitu slunečního záření
- při vysoké koncentraci snižují viditelnost (smog)
- Jak se sleduje atmosférická depozice dusíku v ČR

Sledováním chemického složení atmosférických srážek se v rámci monitoringu kvality ovzduší zabývá ČHMÚ. V rámci geochemického monitoringu malých povodí (GEOMON) měří chemismus srážek, jako významný vstup znečištění do prostředí i Česká geologická služba (ČGS). V menším rozsahu měří složení srážek z hlediska ovlivnění lesních porostů Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM), dále Akademie věd ČR, a v minulosti i Výzkumný ústav vodohospodářský (VÚV). Odběry jsou prováděny různými metodami, v závislosti na účelu měření. Data jsou shromažďována v národní imisní databázi ISKO (Informační systém kvality ovzduší).

Monitoring suché depozice dusíku v ČR je založen výhradně na měřeních koncentrací oxidů dusíku pomocí chemiluminiscenční metody. Není zohledněn příspěvek NH_3 , plynné HNO_3 a částic NH_4^+ a NO_3^- , suchá depozice je tak pravděpodobně významně podceněna.

Z látek měřených v relativně podrobné síti stanic je možné vytvořit pomocí GIS mapy znázorňující jejich prostorovou variabilitu. To se v ČR běžně provádí pro NH_4^+ a NO_3^- u mokré depozice, a pro NO_x v suché depozici. Mapy jsou pravidelně publikovány v grafických ročenkách ČHMÚ a jsou volně dostupné na webových stránkách ČHMÚ (www.chmi.cz). Měření NH_4^+ a NO_3^-

v aerosolu a NH_3 jsou natolik řídká, že neumožňují vytvoření map a slouží pouze pro orientační představu.

Na základě hodnocení dat naměřených v ČR byly publikovány i studie dlouhodobých časových trendů a změn v prostorové variabilitě depozice dusíku a zpřesnění kvantifikace celkové depozice dusíku zahrnutím naměřených složek s využitím modelových výpočtů. Výsledky dlouhodobého monitoringu ČHMÚ ukazují, že dochází k poklesu depozice dusíku, k mnohem razantnějšímu poklesu docházelo u depozice síry (Braniš, et al., 2009). Jak ve světě, tak v ČR se poměr oxidovaných a redukovaných forem anorganických iontů N mění ve prospěch NH_4^+ .

Pro získání přesnějších informací o depozici dusíku je potřeba se více zaměřit i na další, dosud jen výjimečně měřené látky, především ty, které mohou významně přispět k depozici dusíku, jako je NH_3 a plynná HNO_3 . tak bude možné celkovou atmosférickou depozici dusíku přesněji kvantifikovat a přispět k lepšímu poznání jeho vlivu na ekosystémy (Hůnová, 2016)

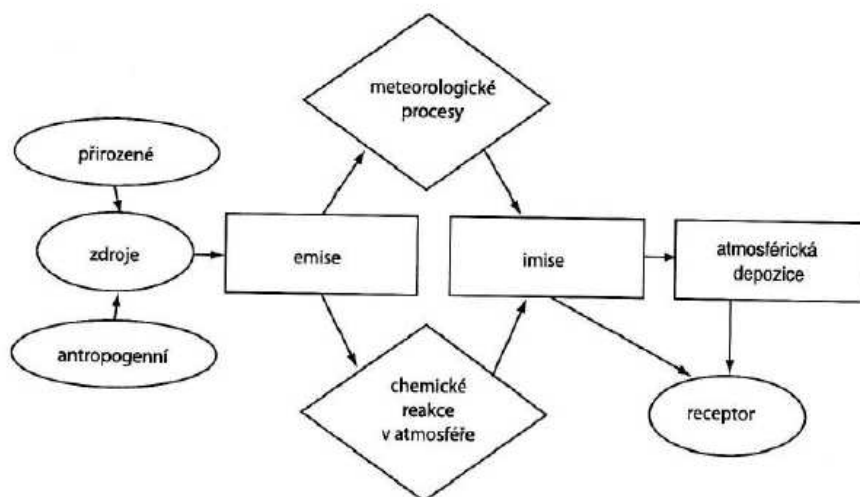
2.2 Historie znečištění ovzduší

Znečištění ovzduší je často považováno za problém současné doby, neboť dochází na mnoha místech planety k jeho zvyšování. Člověk však znečišťuje ovzduší již od počátku své existence. Lidé žijící v jeskyních byli vystaveni škodlivým látkám vzniklým hořením ohně. Tenkrát však lidstvo sužoval problém samotného přežití, a tak vnímalo pouze pozitivní vlastnosti ohně. S rozvojem zemědělství dochází ke změně zastoupení využití území. Klesá procento lesních porostů a zvyšuje se zastoupení orné půdy. Dále se začíná rozvíjet i živočišná výroba.

První dochované zmínky o zhoršené kvalitě ovzduší pocházejí ze starověkého Říma (ČHMÚ, 2015). Vliv člověka na znečištění ovzduší je však až do doby průmyslové revoluce z globálního hlediska velice nepatrný. Druhým zásadním důvodem nízkého ovlivnění globálního klimatu člověkem byl i nízký počet obyvatel. Světová populace dosáhla 1 mld. obyvatel až okolo roku 1820. Současně (2017) svět obývá okolo 7,5 mld. obyvatel. Během posledních zhruba padesáti let dochází k nárůstu světové populace o 1 mld. přibližně za pouhých 13 let. Od druhé poloviny 20. století se začíná měřit na území dnešní ČR kvalita ovzduší prostřednictvím ČHMÚ. Do stejné doby jsou datovány i počátky legislativní ochrany ovzduší (ČHMÚ, 2015).

2.3 Atmosférická depozice

Znečišťující látky v atmosféře podléhají mnohým změnám. Nejprve dochází k emisí znečišťující látky ze zdroje do atmosféry. Z hlediska vlivu člověka na životní prostředí je dobré rozlišit zdroje na přirozené a antropogenní. Přirozeným zdrojem se rozumí všechny zdroje, které nemají spojitost s lidskou činností. Vlivem meteorologických procesů dochází k přenosu a rozptylu látek v atmosféře. Současně dochází k transformaci těchto látek vlivem chemických reakcí uvnitř atmosféry. Imise udávají koncentrace znečišťujících látek v ovzduší. Termín atmosférická depozice označuje proces, při kterém dochází k přenosu znečišťujících látek z atmosféry směrem k zemskému povrchu (Hůnová, 2009). Díky atmosférické depozici dochází na jedné straně k samočištění atmosféry, ale na druhé straně jsou znečišťující látky přeneseny do jiného prostředí (pedosféra, hydrosféra, biosféra), pro které mohou představovat ekologickou zátěž (eutrofizace, acidifikace).



Obr. 2 Schéma procesů, kterým podléhají znečišťující látky v ovzduší (Braniš, et al., 2009)

2.4 Vznik atmosférické depozice

Atmosférická depozice označuje přenos znečišťujících látek z atmosféry k zemskému povrchu. Obvykle se sleduje v časových krocích. Její jednotkou je $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ nebo $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Zemským povrchem je myšlen obecně povrch planety. Tímto povrchem může být hydrosféra, pedosféra, biosféra či kryosféra. Díky atmosférické depozici dochází k samočištění atmosféry. Naopak exponované prostředí může být přenosem látek zatíženo. Jedná se o přirozený proces koloběhu látek v přírodě. Bez existence depozice by docházelo ke kumulaci znečišťujících látek v atmosféře (Hůnová, et al., 2004). Proces atmosférické depozice se sleduje ze dvou důvodů. Prvním z nich je význam chemického složení atmosféry. Déšť, sněžení a další typy meteorologických procesů zbavují ovzduší plyných a pevných částic včetně škodlivin antropogenního původu. Druhým důvodem sledování depozice je mechanismus látkového vstupu do geosystému (Moldan, 1992).

Atmosférické srážky v různých koncentracích obsahují téměř všechny látky, které se v atmosféře vyskytují (Hůnová, et al., 2004). Různé znečišťující příměsi se dostávají do srážkové vody buď již při vzniku srážkových elementů (vodních kapek nebo ledových částic) uvnitř oblaků, tj. znečištění oblačné vody nebo během pádu v podoblačné vrstvě vzduchu. První z výše zmíněných mechanismů se v odborné literatuře označuje termínem „rainout“ (oblačné vypršení), zatímco druhý „washout“ (podoblačné vymývání).

Během vypršení působí znečišťující látky přímo při vzniku srážek jako kondenzační jádra (Hůnová, et al., 2004). Vypršení aerosolů probíhá pohlčováním kondenzačních jader, zachycováním částic na základě principu Brownova pohybu a gradientem napětí vodní páry. Pro většinu aerosolů je nejdůležitější pohlcování kondenzačních jader. Účinnost tohoto principu roste s nižším počtem aerosolových částic a s větším podílem rozpustných částic v aerosolu (Moldan, 1977).

Během vymývání jsou plyny a pevné částice zachycovány padajícími dešťovými kapkami pod oblaky při průchodu troposférou (Hůnová, et al., 2004). Účinnost zachycování je do jisté míry úměrná na velikosti částic. Začíná být účinná u velikosti částic s průměrem větším než $1\ \mu\text{m}$. Vymývání hraje důležitou roli zejména v nízkých vrstvách ovzduší s vysokými koncentracemi

obřích částic, tzn. především pro antropogenně znečištěné ovzduší (Moldan, 1977). Pokud je koncentrace znečišťujících látek v podoblačném prostoru vyšší než v oblačném prostoru, dochází ke zvýšené účinnosti vymývání. Neméně důležitou roli hraje i typ srážek. Ze srovnání povrchu a pádové rychlosti dešťové kapky a sněhové vločky je zřejmé, že účinnost vymývání je větší v případě sněhových vloček. Účinnost vymývání je dále proměnlivá v průběhu srážkové činnosti. Nejvyšší je logicky během prvních minut srážkové události, kdy dochází k vymytí velkého množství znečištění z ovzduší.

Jisté znečištění srážek je naprosto přirozeným a nutným jevem. Kondenzační jádra vykazují pozitivní působení některých přirozených složek znečištění v ovzduší na kondenzační pochody. Následně při samotném vzniku a počáteční fázi vývoje hydrometeorů dochází k jejich infekci znečištěním (Bednář, 1989).

2.5 Typy atmosférické depozice

Součet mokré a suché atmosférické depozice tvoří celkovou atmosférickou depozici. Mokrú depozice je vázána na srážky, a to jak na vertikální (dešť, sníh, kroupy, mrholení atd.), tak na horizontální (mlha, námraza, jinovatka). Velice známým pojmem je i kyselá depozice.

Suchá depozice tvoří významnou část celkové depozice v oblastech poblíž zdrojů emisí, tj. v městských a příměstských oblastech. V oblastech vzdálených od emisních význam suché depozice klesá a na celkovou depozici má vliv zejména mokrá depozice.

2.5.1 Mokrá depozice

Mokrú atmosférická depozice vyjadřuje podíl hmotnosti atmosférické depozice na plošnou jednotku povrchu země za časovou jednotku. Mokrú depozice je vázána na srážkovou činnost (Černý, 1985) a je tedy epizodickým dějem. Mokrú depozice přenáší na zem látky obsažené ve vodě deště, sněhu (vertikální srážky), ale i např. v mlze a námraze (horizontální srážky). Mokrú depozice vertikálního původu je mnohem významnější. Horizontální depozice nabývá na významu především v horských oblastech a dalších místech se zvýšeným výskytem tvorby mlh, např. v okolí velkých řek. Velká vzájemná odlišnost je ve složení mezi srážkami mořského a kontinentálního původu. Srážky mořského původu vykazují větší podíl iontů Cl^- a Na^+ , pevninské jsou naopak charakteristické větším zastoupením iontů NO_x , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{+2} a K^+ (Moldan, 1983). Srážková voda efektivně odstraňuje ze vzduchu prachové částice, dále zachycuje a rozpouští atmosférické plyny. Je základem samočisticího procesu atmosféry. Koncentrace rozpuštěných látek ve srážkách bývají poměrně nízké. Pokud dojde k tvorbě srážek v inverzní vrstvě atmosféry, mohou být koncentrace velmi vysoké (Moldan, 2009).

Dlouhodobý průměrný roční srážkový úhrn (1961-1990) je v ČR 674 mm, tj. $674 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$. V každém litru srážkové vody je obsaženo přibližně 10 g rozpuštěných látek (Moldan, 1991). Dochází tak k přenosu celé řady prvků, mezi nejvýznamnější patří C, S, N, Ca, Cl, Na, K, Mg, Si, Al a Fe. Měření vertikální složky mokré depozice je technicky nejsnadnější. Mokrú depozice se sleduje na základě chemické analýzy odběrů vzorků srážek. Vlivem vymývání částic prachu z podoblačné vrstvy je mineralizace během počáteční fáze srážkové epizody nejvyšší. V další fázi klesá mineralizace až na téměř konstantní hodnotu a v poslední fázi může nepatrně stoupat (Šantroch, 1985). Sleduje se také vliv meteorologických faktorů na mokrou depozici. Mokrú depozice je zkoumána na základě celkové chemické analýzy ze srážkových vzorků pro vybrané ionty (SO_4^{2-} - S, NO_3^- - N, NH_4^+ - N, H^+ (pH), Cl^- , F^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+}) v souvislosti s jejich dopadem na

životní prostředí. Prostorová depoziční zátěž ČR je určena z pole koncentrací iontů ve srážkách a z pole ročních srážkových úhrnů, které bylo vytvořeno na základě údajů ze 750 srážkoměrných stanic (Vysoudil, 2002).

2.5.2 Suchá depozice

Suchou atmosférickou depozici tvoří soubor procesů absorpce plynů a depozice aerosolových částic. Gravitační sedimentace větších částic neboli prašný spad je podstatnou složkou suché depozice. Prašný spad je významný především v oblastech s nízkými srážkovými úhrny a logicky také ve znečištěných oblastech. Zemský povrch, pokrytý vegetací nebo holý, absorbuje plyny z atmosféry, nejvíce reaktivní SO₂, NO_x a NH₃ (Moldan, 2009). Suchá depozice je mnohem pomalejší proces ve srovnání s vymýváním pod srážkami. Probíhá však neustále na rozdíl od mokré depozice, která je jevem epizodickým. Z dlouhodobých bilancí vyplývá, že v průmyslových oblastech má suchá depozice větší podíl na celkové depozici proti mokré depozici. Vesnické oblasti mají obě složky depozice přibližně vyrovnané a v horských oblastech, kde vzduch obsahuje malé množství znečišťujících látek, je složka suché depozice zanedbatelná a výrazně převyšuje mokrá depozice (Moldan, 1985).

Turbulentní difuze je hlavním mechanismem přenosu plynů a malých částic k zemskému povrchu. Sedimentace je významná u velkých částic. K vlastnímu zachytu částic dochází přes tenkou vrstvu (méně než 1 mm) přiléhající k povrchu. V této vrstvě je laminární proudění a přenos je řízen molekulárními procesy. Zachycení na povrchu probíhá pomocí řady mechanismů podle druhu povrchu. U vegetace dochází k zachytu přes průduchy rostlin (Závodský, 1985).

Velikost suché depozice se nemusí měřit přímo, lze ji vypočítat z údajů o koncentraci vybraných plynných složek v ovzduší a na základě analýz celkového prašného spadu, aerosolových částic a srážkové vody. Údaje o suché depozici v tuhé formě jsou na rozdíl od plynných a suchých depozicí ucelenější (Vysoudil, 2002). Suchou depozici, která je spojena se spadem částic, lze měřit pomocí několika jednoduchých i složitých zařízení, která simulují povrch vegetace a jiných útvarů na zemském povrchu. Odběrová zařízení jsou různých tvarů a z různých materiálů. Všechny však musí být chráněna před vlivem mokré depozice (Moldan, 1985).

Nárůst problematiky kyselých dešťů v Americe, Evropě a Asii vedl k rozvoji výzkumu procesů suché depozice (Sutton, et al., 2014). Výzkum suché depozice je důležitý i z ekologického hlediska. V látkové bilanci toků mezi atmosférou a ostatními složkami přírodního prostředí představuje suchá depozice jeden z rozhodujících členů, přičemž přesnost jejího stanovení je zatím nedostatečná (Závodský, 1985).

2.5.3 Měření depozice

Měření srážkové depozice v blízkosti lesních porostů probíhá pomocí srážkoměrů, které mohou být neustále otevřené – měří srážky s prašným spadem (bulk) nebo otevřené pouze během srážkové činnosti – měří čisté srážky (wet-only). Případně lze měřit srážkovou depozici pod korunami lesních porostů (throughfall deposition).

- Depozice čistých srážek (wet-only deposition)

Tato metoda měří pouze mokrou složku depozice. Srážkoměry čistých srážek se pomocí senzoru automaticky otvírají a zavírají při počátku a konci srážkové události. Je zabráněno vniknutí

částic a plynů během období bez srážek. Výhodou je, že depozice z čistých srážek podává cenné informace o chemii atmosférické depozice na velkém rozpětí proudění vzdušných hmot. Srážkoměry čistých srážek potřebují k provozu elektrickou energii a stálou údržbu a nefungují přesně v případech přívalů sněhových srážek (Clarke, et al., 2010).

- Depozice srážek s prašným spadem (bulk deposition)

Odběr vzorků srážek je odebírán kontinuálně otevřenou plastovou nálevkou, která je součástí plastové nádoby. Nálevka částečně odebírá i vzorky částic a plynů během období bez srážek, tj. suchou depozici. Zahrnuje také působení horizontální depozice. Pro výpočet celkové depozice je použití srážkoměrů s prašným spadem méně vhodné, neboť je mokrá depozice zatížena chybami z vlivu suché a horizontální depozice. Pro výpočet celkové mokré depozice je vhodnější použití srážkoměrů s čistými srážkami. Srážkoměry s prašným spadem jsou však výhodnější z hlediska finančního, nezávislosti na el. energii a malé náročnosti údržby (Clarke, et al., 2010).

- Depozice podkorunových srážek (throughfall deposition)

Podkorunová depozice je odebírána pod korunami lesních porostů. Metoda měření je totožná s metodou srážek s prašným spadem, liší se pouze v umístění pod korunami lesních stromů proti volnému prostoru. Srážkové úhrny této depozice jsou sníženy o intercepci a stok po kmenech (stemflow). Podkorunová depozice spolu se stokem po kmenech dává informace o depozici působící na lesní půdu (Clarke, et al., 2010).

2.6 Faktory ovlivňující atmosférickou depozici

2.6.1 Zdroje znečištění

Čistý vzduch, který neobsahuje žádný prach ani plynné, případně kapalné znečišťující látky, je ideálním pojmem. V přírodním prostředí se tak s čistým vzduchem nesetkáme (Holoubek a Komárek, 1982). Znečištění je definováno jako nežádoucí změna ve fyzikálním, chemickém nebo biologickém charakteru ovzduší. Problematika znečištění ovzduší je stále aktuální, protože přímé či nepřímé následky mají dopad na každého jedince. Vědní obor chemie ovzduší, který podrobně zkoumá tuto problematiku, se neustále vyvíjí (Nábělková a Nekovářová, 2010).

Vnášení nečistot do ovzduší se nazývá znečišťování ovzduší neboli emisemi. Pojem emise je označením činnosti nebo děje. Znečištění ovzduší neboli imise naopak charakterizují stav znečištění v důsledku emisí (Holoubek a Komárek, 1982).

Znečišťující látky jsou od zdrojů transportovány ovzduším k příjemcům. V ovzduší také dochází k jejich transformaci na jiné látky, které mohou být více či méně nebezpečné oproti původním látkám. Z hlediska přímého dopadu znečištění na jedince je nejdůležitější obsah znečišťujících látek v přízemní vrstvě atmosféry. V průmyslově vyspělých zemích jsou nejrozšířenějším zdrojem znečištění tyto sloučeniny: oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO₂), těkavé organické látky (VOC) a celkové rozptýlené pevné částice (Virtanen a Hämeikoski, 1989).

Zdroje znečištění můžeme rozdělit podle původu na přirozené a antropogenní. Z pohledu ochrany životního prostředí jsou důležité antropogenní zdroje, neboť tyto zdroje jsou produkty

lidské civilizace a můžeme je tak ovlivnit na rozdíl od zdrojů přírodních. Z hlediska prostorového působení rozlišujeme zdroje na objemové, plošné, liniové a bodové. Z časového pohledu pak na zdroje okamžité a kontinuální. Znečištění může mít rozsah lokální, regionální či globální.

Lokální znečištění ovzduší je charakteristické pro města. Je sice malého plošného rozsahu, ale svou vazbou na velké sídelní oblasti často postihuje velké množství obyvatel. Příkladem je aglomerace Prahy, Ostravy a přilehlého okolí s přesahem do Horního Slezska. Často je spojeno s výskytem smogových situací. Regionální znečištění zasahuje obvykle velké územní celky až části kontinentů. Příkladem regionálního znečištění jsou kyselé deště způsobené znečištěním atmosféry oxidy dusíku a síry. Tento problém v osmdesátých letech postihoval velkou část střední Evropy, díky následné transformaci průmyslu spolu s odsířením tepelných elektráren byl však velmi redukován. Globální znečištění logicky pokrývá celou planetu Země (Nábělková a Nekovářová, 2010).

- **Přirozené zdroje**

Přirozené zdroje jsou definovány jako zdroje přírodního původu, tedy jako veškeré zdroje, které nejsou spojeny s lidskou činností. Mezi přirozené zdroje patří například vulkanická činnost, bakteriální činnost či prашné bouře (Braniš a Hůnová, 2009). Dále různé znečišťující příměsi, jako např. částice sopečného popela, jemné krystalky mořských solí, půdní a prachové částičky, složky organického původu (produkty rozkladu organických látek, pylová zrna, spóry, výtrusy, malá semínka rostlin, bakterie), kosmický prach a produkty vznikající při hoření meteoritů (Bednář, 1989).

- **Antropogenní zdroje**

Zdroje antropogenního původu jsou spjaty s lidskou činností. Mezi nejdůležitější zdroje patří výroba elektrické energie, doprava, průmysl, zemědělství a likvidace odpadu. Automobilová doprava se podílí jednou třetinou na celkové emisi všech škodlivých plynů (Skok, 2003). Hlavní příčinou nadměrného znečišťování atmosféry je produkce znečišťujících látek průmyslovou činností. Od doby průmyslové revoluce dochází v globálním měřítku stále k nárůstu průmyslové činnosti. Jejich odstraňování či snižování jejich produkce je klíčovým problémem ochrany čistoty ovzduší (Vysoudil, 2002).

Zdroje dělíme podle uspořádání na bodové, lineární, plošné a objemové (Hůnová a Janoušková, 2004). Bodové zdroje uvolňují emise z jasně definovaného místa, jako např. komín či kouřovod. Sledování a měření těchto zdrojů je cenově i technicky poměrně snadné. Lineárními zdroji jsou především dopravní komunikace. Ze všech druhů dopravy má silniční doprava největší podíl na znečišťování ovzduší. Plošným zdrojem je typicky město či velké průmyslové objekty, jako jsou rafinerie. Dalšími příklady mohou být povrchové lomy či skládky. S objemovými zdroji se nesetkáme příliš často a označují spíše zdroje s velkým plošným rozsahem jako je např. jaderný výbuch (Braniš a Hůnová, 2009).

2.6.2 Emise

Pojem znečišťování ovzduší označuje vypouštění neboli emise znečišťujících látek do atmosféry. Jde tedy o činnost nebo děj. Množství emisí udává míru znečištění (Hemerka a Vybíral, 2010). Emisemi se rozumí vypouštění nebo únik příměsí do atmosféry, jinými slovy primární

znečišťování ovzduší. Jsou to příměsi vypouštěné přímo ze zdrojů. V obecném slova smyslu emise zahrnují celou řadu různých činností zamožujících zemskou atmosféru (tuhými, kapalnými i plynnými škodlivinami, elektromagnetickým zářením, teplotou, hlukem atd.). V užším slova smyslu znamenají vypouštění hmotných látek tuhého, kapalného nebo plynného skupenství ze zdrojů do ovzduší, které negativně ovlivňují životní prostředí (Holoubek a Komárek, 1982). Emisní tok udává množství příměsi, obvykle její hmotnost, vstupující za časovou jednotku ze zdroje znečištění do ovzduší (Hůnová a Janoušková, 2004).

V současné průmyslově vyspělé době se spotřebovává velké množství přírodních zdrojů a energie k výrobě zboží a služeb pro potřeby obyvatelstva. Veškerá tato činnost je spojena s vypouštěním emisí do atmosféry. Tyto emise tedy nazýváme primárními škodlivinami, neboť látky jako je např. oxid siřičitý či oxidy dusíku se dostávají do vzduchu přímo v důsledku lidské činnosti. Sekundární škodliviny jako je např. ozón vznikají v ovzduší důsledkem chemických reakcí mezi primárními škodlivinami s dalšími látkami obsaženými ve vzduchu (Virtanen a Hämekoski, 1989). Sekundární znečišťování je někdy souhrnně označováno jako chemismus atmosféry. Patří sem chemické reakce jako např. oxidace, změny skupenství některých plynných látek na jemné dispersní částičky tuhých látek a fotochemické změny, kterou vedou ke vzniku smogu (Kurfürst, 1982).

Množství produkovaných emisí ze zdrojů se obvykle zjišťuje pomocí měření či výpočtu. Měření specifických emisí je nejpřesnějším způsobem kvantifikace emisí. Je však cenově poměrně nákladné a zároveň i technicky náročné. Naproti tomu alternativní metodou je výpočet emisí, prováděný pomocí emisních faktorů, kdy se pomocí údajů o množství a druhu paliva spočítají emise jednotlivých látek (Braniš a Hůnová, 2009). Emisní faktory jsou obvykle vyjádřeny v hmotnostních jednotkách emitovaného polutantu na jednotku hmotnosti, objemu, tepelného výstupu, vzdálenosti nebo trvání děje emise polutantu. Emisní faktory se odvozují měřením u zdrojů, teoretickými výpočty nebo kombinací měření a výpočtů (Hůnová a Janoušková, 2004).

Na výslednou atmosférickou depozici má vliv řada dalších faktorů. Ze schématu (Obr. 2) je patrné, že mezi další procesy ovlivňující atmosférickou depozici patří meteorologické procesy a chemické reakce v atmosféře, které následně ovlivňují imise. Imise následně působí atmosférickou depozicí na receptory (člověka, vegetaci atd.).

2.7 Dusík v atmosféře

2.7.1 Oxidy dusíku

Nejvíce zastoupenou formou dusíku v atmosféře je molekulární dusík (N_2), který je díky silné trojné kovalentní vazbě velice stabilní a téměř nereaktivní. Chemicky reaktivní jsou sloučeniny dusíku jako např. oxid dusný (N_2O), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2), kyselina dusičná (HNO_3) a amoniak (NH_3).

Oxid dusný je bezbarvý plyn, který vzniká emisí z přírodních zdrojů, jeho dalším zdrojem je také mikrobiologická činnost v půdě. Ovlivňuje zemské klima především svou velkou tepelnou kapacitou a dlouhé době setrvání v atmosféře.

Oxid dusnatý vzniká spalováním při vysokých teplotách, zatímco oxid dusičitý vzniká při spalování jen v malém množství. NO_2 vzniká především oxidací NO v atmosféře. Velká část NO_2 a

NO vzniká bakteriální činností v půdě během denitrifikace. Kyselina dusičná vzniká oxidací SO_2 v atmosféře a NH_3 z přírodních zdrojů.

Oxidy dusíku ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) jsou velice důležité z pohledu chemie atmosféry. Vysoké koncentrace NO_x v atmosféře vznikají často z antropogenních zdrojů. Studie z USA ukazují, že z antropogenních zdrojů NO_x pochází 45 % z dopravy, 30 - 35 % z výroby elektrické energie v elektrárnách a zbylých 20 % obecně z průmyslu.

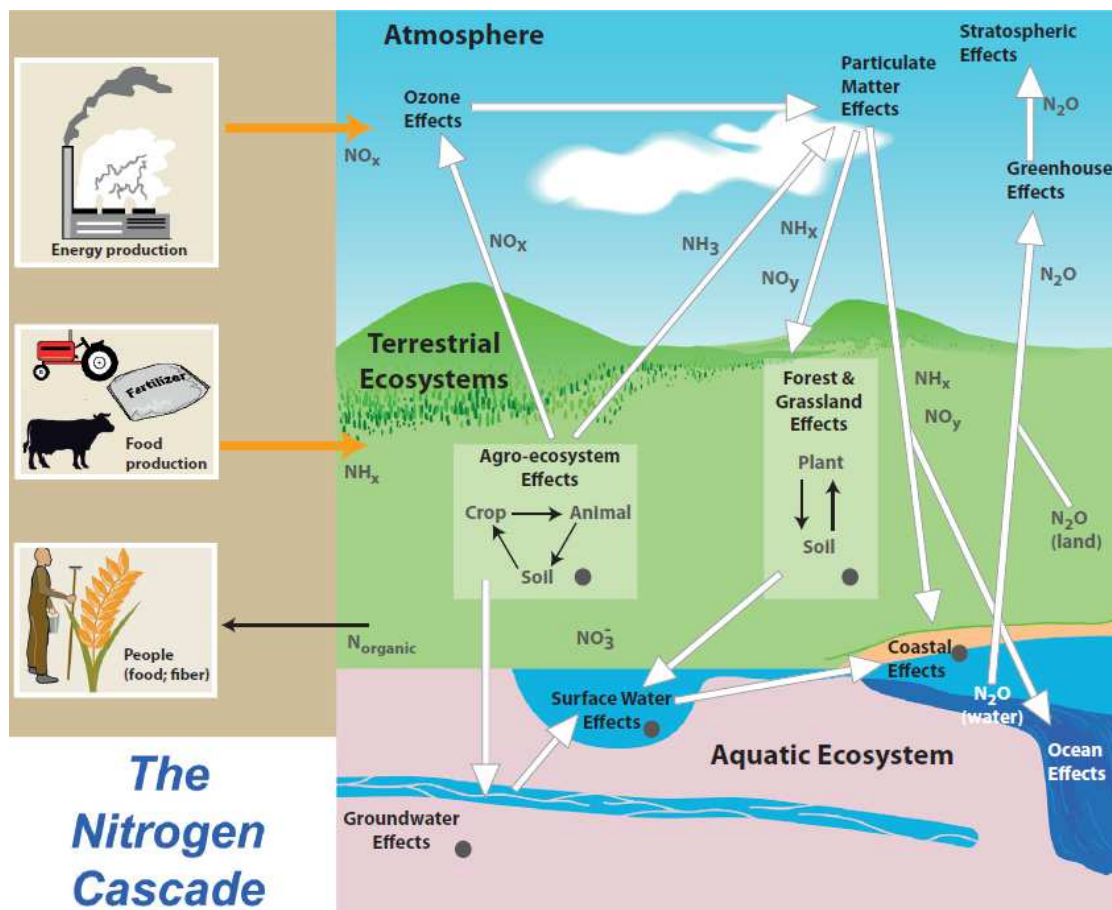
Reaktivní dusík (NO_y) je souhrnem NO_x spolu s produkty oxidace NO_x , jako jsou kyselina dusičná (HNO_3), kyselina dusitá (HNO_2), radikál $\text{NO}_3\bullet$, oxid dusičný (N_2O_5), kyselina pereoxidusičná (HNO_4) a další sloučeniny dusíku (Lazaridis, 2011).

2.7.2 Koloběh dusíku

Globální toky dusíku a uhlíku jsou úzce propojeny a jsou základem biogeochemických procesů na Zemi. Skládá se z přírodních toků dusíku z atmosféry do suchozemských a mořských ekosystémů, při kterých dochází k biologickému vázání dusíku (biological nitrogen fixation - BNF). V procesu BNF jsou běžně velmi stálé a nereaktivní molekuly dusíku N_2 redukovány na amonné sloučeniny. Navázaný dusík je následně transformován mikroorganismy na různé skupiny aminokyselin a oxidovaných sloučenin, nakonec se díky mikrobiologické denitrifikaci v půdě, sladké a mořské vodě vrací zpět do atmosféry v původní N_2 podobě. Během vázání dusíku vznikají různé sloučeniny obsahující reaktivní dusík (N_r), jako NH_3 , NH_4 , NO , NO_2 , HNO_3 , N_2O , HONO a další (Fowler, et al., 2013).

V atmosféře mají oxidy dusíku (NO_x) klíčovou roli při tvorbě fotochemického ozonu, dalších oxidů a radikálů. Obdobně emise oxidu dusného (N_2O) následnou denitrifikací mají klíčovou roli v radiační bilanci Země a v chemii ozonové vrstvy ve stratosféře, kde dochází k fotolytickému rozkladu N_2O (Fowler, et al., 2013).

Nebýt antropogenního vlivu, tak by BNF a produkce NO_x z blesků byly jediné zdroje nového N_r na Zemi. N_r je základem pro všechny organismy, zvýšené tvorby N_r bylo využito v zemědělství ke zvýšení výnosů plodin a k produkci potravin pro rostoucí světovou populaci. Bylo odhadnuto, že na počátku 21. století je skoro polovina světové populace závislá na dusíkatých hnojivech z hlediska produkce potravin. Mezi tři hlavní antropogenní zdroje N_r patří (1) Haber-Bosch syntéza, používaná k získání NH_3 z N_2 , především při výrobě hnojiv, ale i jako surovina pro jiný průmysl; (2) pěstování luštěnin a ostatních plodin, které zvyšují BNF; (3) spalování fosilních paliv v dopravě (IPPC, 2013).



Obr. 3 Koloběh dusíku (IPPC, 2013)

Velikost antropogenní produkce dusíku dosahuje přibližně stejné hodnoty jako je přirozená produkce dusíku. Hodnota celkového dusíku v koloběhu se tak zdvojnásobila. Dusík patří mezi nejvýznamnější biogenní prvky, tudíž změny jeho množství v koloběhu výrazně ovlivňují produktivitu ekosystémů a biodiverzitu. Sloučeniny dusíku jsou prekurzory troposférického ozonu. Zvýšení NO_x v atmosféře tak zhoršuje kvalitu ovzduší (Fowler, et al. 2013). Tři nejdůležitější problémy spojené s narušením cyklu dusíku s ohledem na globální změnu jsou: (1) Jaké jsou interakce s cyklem uhlíku a účinky na zachytávání uhlíku; (2) Jaké jsou účinky zvýšené N_r na radiční vazbu dusičnanových aerosolů a troposférického ozonu; (3) Jaké jsou dopady přebytku N_r na člověka a ekosystémy - zdraví, biodiverzita, eutrofizace (IPCC, 2013).

Prakticky veškerý antropogenní N_r se dostává do životního prostředí, buď při vzniku (spalování fosilních paliv), nebo poté, co je použit k produkci potravin či v průmyslu. Pokud nedojde k transformaci N_r na inertní N_2 , projeví se jeho negativní důsledky. N_r ovlivňuje klimatickou změnu, slábnutí stratosférického ozonu, ale přispívá také ke vzniku smogu, acidifikaci půdy a vody. Zvyšuje produkční schopnost ekosystémů, což může vést k eutrofizaci a následnému snížení biodiverzity. Jakmile se atomy dusíku stanou reaktivními, každý z těchto atomů může přispět k výše zmíněným změnám.

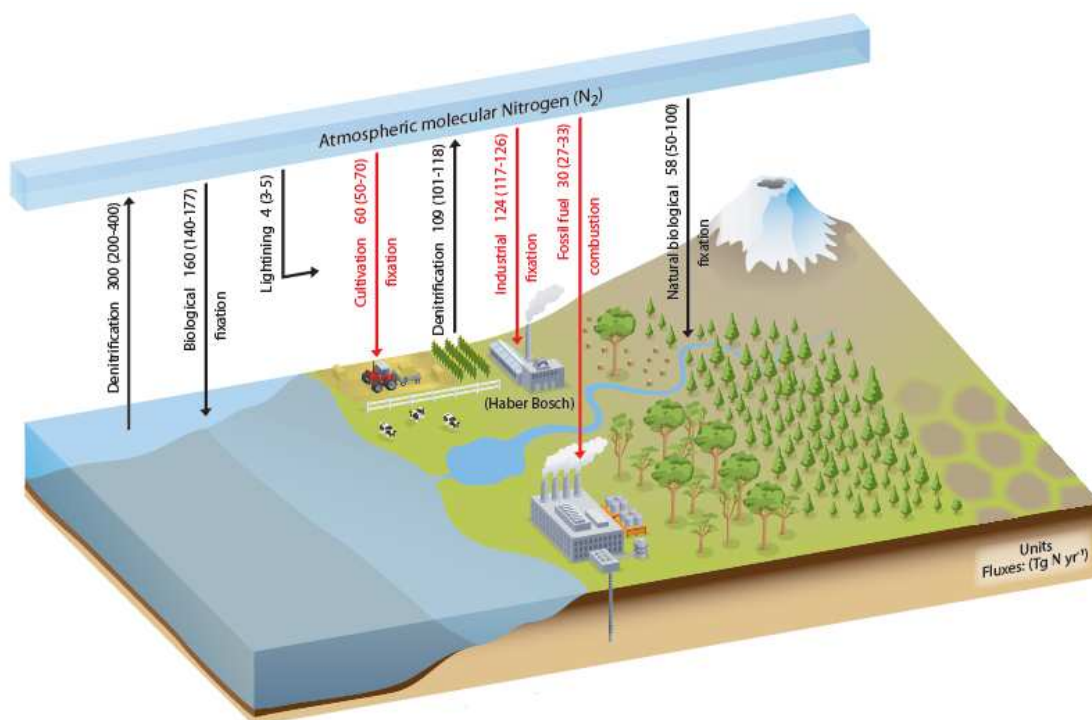
Koloběh dusíku je tedy postupný přenos molekuly N_r atmosférou, suchozemskými ekosystémy, sladkovodními ekosystémy a mořskými ekosystémy, který se projeví mnoha důsledky v každém z těchto prostředí.

N_r je důležitým prvkem růstu rostlin a půdních mikroorganismů. Rostliny a mikrobiologické procesy mají následně důležitou roli v koloběhu uhlíku. Vyšší koncentrace CO₂ zvyšují účinnost fotosyntézy. Následkem je rychlejší růst rostlin, vedoucí k většímu ukládání uhlíku v suchozemských ekosystémech. Růst rostlin je ale omezen množstvím dostupného N_r v půdě. To znamená, že ekosystémy s nízkým obsahem dusíku mají sníženou schopnost ukládání uhlíku, zatímco ekosystémy s vyšší depozicí N_r umožní větší schopnost ukládání uhlíku.

V roce 2005 bylo antropogenní činností vyprodukováno 214 Tg reaktivního dusíku (N_r) z dusíku (N₂). Spalování fosilních paliv v dopravě tvořilo 30 Tg N_r, výroba hnojiv 124 Tg N_r a BNF v zemědělství 60 Tg N_r. Přírodní zdroje vyprodukovaly celkem 222 Tg N_r. Z těchto zdrojů je naprosto dominantní BNF s 218 Tg N_r. Poměr mořského a pevninského přírodního BNF přibližně odpovídá poměru plochy oceánů a pevniny. Mořský BNF tvoří 160 Tg N_r a pevninský 58 Tg N_r. Zbylé 4 Tg N_r vznikají z blesků (IPCC, 2013). Roční denitrifikace N_r na N₂ činí 109 Tg N_r na pevnině, resp. 300 Tg N_r v oceánech. Zbylé množství N_r se ukládá v ekosystémech, transportuje řekami a depozicí do oceánů nebo je emitováno v podobě N₂O (Obr. 4).

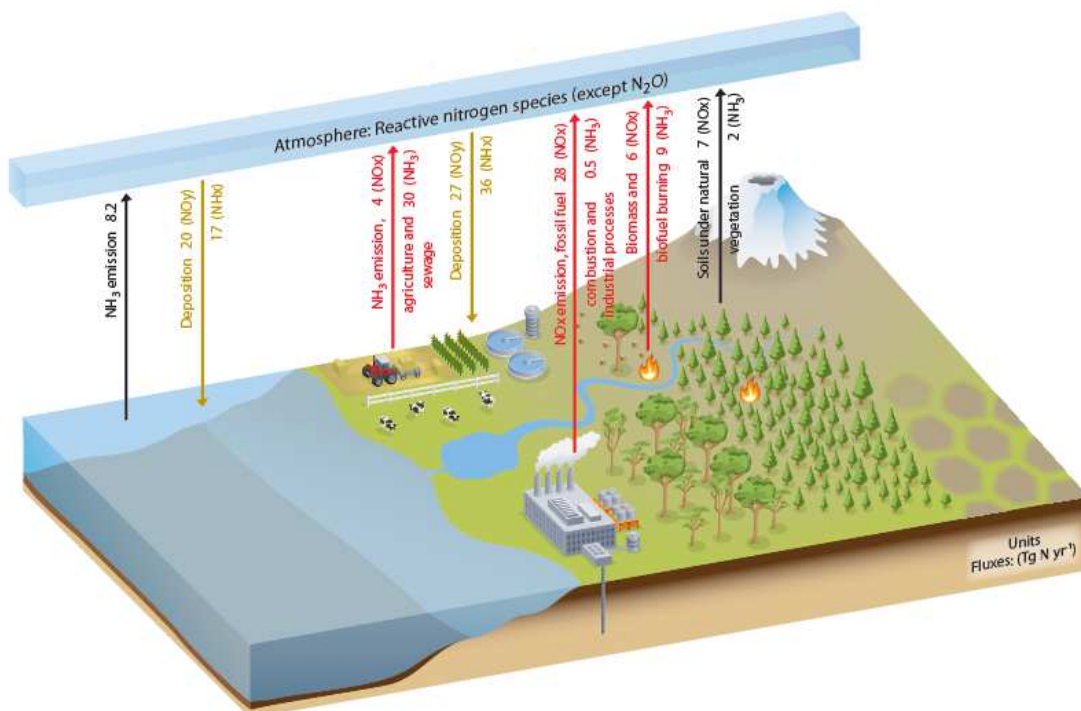
Tab. 2 Globální toky dusíku (Tg N/rok), (IPCC, 2013)

SECTION 1 (NO _x and NH ₃)			
a. Conversion of N ₂ to Nr	2005	2005	References
Anthropogenic sources			
Fossil fuel combustion	30 (27–33)		Fowler et al. (2013)
Haber–Bosch process			
Fertiliser	100 (95–100)		Galloway et al. (2008), Fowler et al. (2013)
Industrial feedstock	24 (22–26)		Galloway et al. (2008), Fowler et al. (2013)
Biological nitrogen fixation (BNF)	60 (50–70)		Herridge et al. (2008)
Anthropogenic total	210		
Natural sources			
BNF, terrestrial	58 (50–100)		Vitousek et al. (2013)
BNF, marine	160 (140–177)		Voss et al. (2013), Codispoti (2007)
Lightning	4 (3–5)		AR4
Natural total	220		
Total conversion of N₂ to reactive N	440		
b. Emissions to Atmosphere			
	NO_x	NH₃	
Fossil fuel combustion industrial processes	28.3	0.5	Dentener et al. (2006)
Agriculture	3.7	30.4	Dentener et al. (2006)
Biomass and biofuel burning	5.5	9.2	Dentener et al. (2006)
Anthropogenic total	37.5	40.1	
Natural sources			
Soils under natural vegetation	7.3 (5–8)	2.4 (1–10)	AR4
Oceans	—	8.2 (3.6)	AR4
Lightning	4 (3–5)	—	AR4
Natural total	11.3	10.6	AR4
Total sources	48.8	50.7	
c. Deposition from the Atmosphere			
	NO_y	NH₃	
Continents	27.1	36.1	Lamarque et al. (2010)
Oceans	19.8	17.0	Lamarque et al. (2010)
Total	46.9	53.1	
d. Discharge to Coastal Ocean			
Surface water N flux	45		Mayorga et al. (2010), Seitzinger et al. (2010)
e. Conversion of Nr to N₂ by Denitrification			
Continents	109 (101–118)		Bouwman et al. (2013)
Oceans	300 (200–400)		Bouwman et al. (2013)



Obr. 4 Přírodní a antropogenní procesy produkující N_r a denitrifikace (IPCC, 2013)

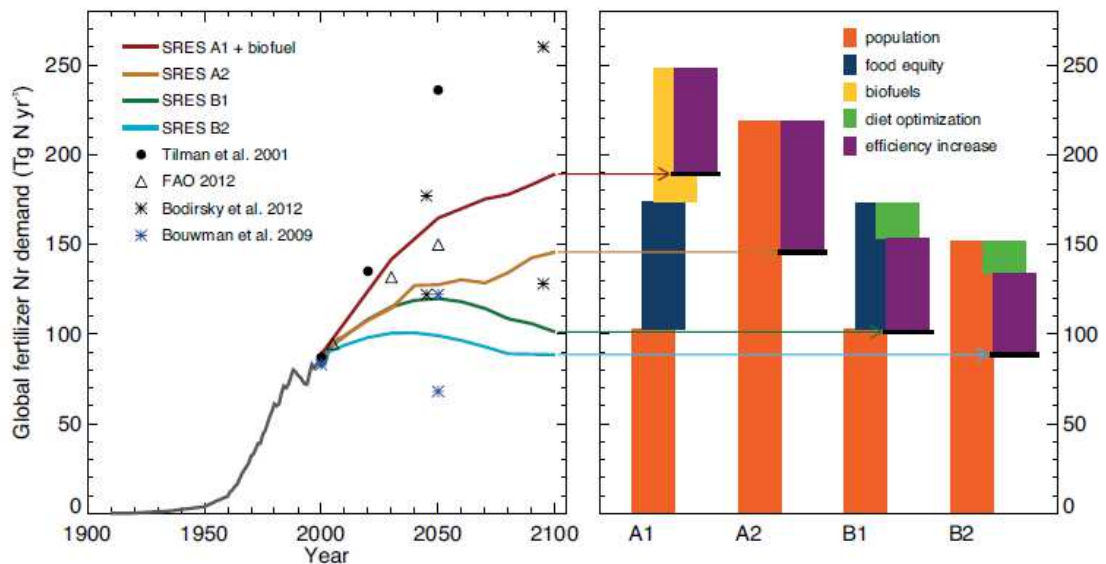
Z celkových emisí NH_3 a NO_x mají antropogenní emise přibližně 80% podíl, zbylých 20 % emisí je přírodního původu. Emise NO_x vznikají především spalování fosilních paliv v dopravě, naopak emise NH_3 mají původ především v zemědělství. Depozice NH_x na pevnině má větší podíl proti depozici NO_y (Obr. 5).



Obr. 5 Globální toky NO_y a NH_x (IPCC)

- Předpokládané trendy koloběhu dusíku

Od sedmdesátých let 20. století vedla produkce potravin, průmysl a spalování fosilních paliv (antropogenní činnost) k větší produkci N_r než je produkce přírodního N_r (Obr. 6). K naznačení budoucích trendů bylo užito pěti parametrů (populační růst, konzumace živočišných bílkovin, zlepšení efektivity zemědělství, produkce biopaliv a změny ve stravování). Na základě těchto faktorů byly vytvořeny 4 možné scénáře vývoje produkce N_r v zemědělství. Rozpětí k roku 2100 je poměrně široké od 90 Tg N_r až po 190 Tg N_r .



Obr. 6 Scénář globální spotřeby dusíkatých hnojiv (vlevo) a dopady spotřeby v roce 2100 (vpravo), (IPCC, 2013)

Tato komplexní síť zpětných vazeb se studuje prostřednictvím pozorování, experimentů a modelování. Během posledních dvou desetiletí došlo k velkému rozvoji poznání problematiky koloběhu dusíku (Fowler, et al., 2013).

3 Materiál a metodika

3.1 Lokality

Pro výpočet depozice dusíku byly vybrány stanice, které odpovídají požadavkům pro výpočet pomocí Canopy budget modelu (Thimonier, et al., 2005), tj. měřily podkorunovou srážkovou depozici (throughfall) a zároveň srážky s prašným spadem (bulk) nebo čisté srážky (wet-only).

Celkem bylo vybráno z databáze Informačního systému kvality ovzduší (ISKO) ČHMÚ 21 lokalit pro stanovení depozice dusíku. Z hlediska podílu dodavatelů dat bylo nejvíce lokalit ve správě ČGS (9) a VÚLHM (8), dále ČHMÚ (4). Podkorunové srážky byly odebírány v naprosté většině pod smrkovými lesními porosty, výjimku tvořily stanice Buchlovice-Medlovice a Kamýk-Všeteč, které jsou umístěny pod bukovým porostem a stanice Březka s dubovým lesním porostem.

Vybraných 21 stanic (Tab. 3 a Tab. 4) měří data srážkové depozice v různých časových intervalech. Nejvíce stanic mělo interval měření měsíční, méně stanic týdenní či nepravidelný interval. Srážkové depozice na stanicích byly sledovány v období od roku 2000 do roku 2015. Během této doby došlo na některých stanicích k ukončení měření, případně vznikly některé nové stanice.

Tab. 3 Staniční síť sledování atmosférické depozice – bulk a wet-only

lokality	zkratka ISKO	měřicí program	vlastník	nadmořská výška [m n. m.]	zeměpisná délka [°]	zeměpisná šířka [°]
Buchlovice-Medlovice	ZBUCB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	350	17,272	49,072
Lesní potok	SLESB	Bulk (srážky s prašným spadem)	GLÚ AV ČR	400	14,777	49,976
Březka	SBREB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	435	14,549	49,902
Želivka	JZELB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	440	15,229	49,675
Loukov	JLKVB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	500	15,346	49,636
Polomka	EPOMB	Bulk (srážky s prašným spadem)	SCHKO Z.h.	512	15,769	49,791
Košetice	JKOSB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČHMÚ	535	15,080	49,572
Salačova Lhota	JSALB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	557	15,000	49,533
Kamýk-Všeteč	CKAMB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	593	14,300	49,230
Červík	TCRVB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	640	18,383	49,450
Pluhův bor	KPB1B	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	753	12,789	50,063
Uhlířská	LUHLB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČHMÚ	780	15,148	50,825
Spálenec	CSPLB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	795	13,985	48,926
Jezeří	UJEZB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	820	13,478	50,548
Liz	CLIZB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ÚH AV ČR	828	13,684	49,066
Lysina	KLY1B	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČGS	867	12,670	50,035
Lazy	KLAZB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	875	12,625	50,043
U dvou louček	HUDLB	Bulk (srážky s prašným spadem)	VÚLHM	880	16,498	50,221
Modrý potok	HMOPB	Bulk (srážky s prašným spadem)	ČHMÚ	1010	15,713	50,713
Košetice	JKOSF	Čisté srážky - Automatický pluviokolektor	ČHMÚ	535	15,080	49,572
Luisino údolí	HLUDF	Čisté srážky - Automatický pluviokolektor	ČHMÚ	875	16,388	50,287

Tab. 4 Staniční síť sledování atmosférické depozice – throughfall

lokality	zkratka ISKO	měřicí program	vlastník	nadmořská výška [m n. m.]	zeměpisná délka [°]	zeměpisná šířka [°]
Buchlovice-Medlovice	ZBUCE	Podkorunové srážky (buk)	VÚLHM	350	17,272	49,072
Lesní potok	SLESS	Podkorunové srážky (smrk)	GLÚ AV ČR	400	14,777	49,976
Březka	SBRRER	Podkorunové srážky (dub)	VÚLHM	435	14,549	49,902
Želivka	JZELS	Podkorunové srážky (smrk)	VÚLHM	440	15,229	49,675
Loukov	JLKVS	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	500	15,346	49,636
Polomka	EPOMS	Podkorunové srážky (smrk)	SCHKO Z.h.	512	15,769	49,791
Košetice	JKOSS	Podkorunové srážky (smrk)	ČHMÚ	535	15,080	49,572
Salačova Lhota	JSALS	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	557	15,000	49,533
Kamýk-Všeteč	CKAME	Podkorunové srážky (buk)	VÚLHM	593	14,300	49,230
Červík	TCRVS	Podkorunové srážky (smrk)	VÚLHM	640	18,383	49,450
Pluhův bor	KPB2S	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	714	12,789	50,063
Uhlířská	JUHLS	Podkorunové srážky (smrk)	ČHMÚ	780	15,148	50,825
Spálenec	CSPLS	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	795	13,985	48,926
Jezeří	UJEZS	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	820	13,478	50,548
Liz	CLIZS	Podkorunové srážky (smrk)	ÚH AV ČR	828	13,684	49,066
Lysina	KLY2S	Podkorunové srážky (smrk)	ČGS	836	12,670	50,035
Lazy	KLAZS	Podkorunové srážky (smrk)	VÚLHM	875	12,625	50,043
U dvou louček	HUDLS	Podkorunové srážky (smrk)	VÚLHM	880	16,498	50,221
Modrý potok	HMOPS	Podkorunové srážky (smrk)	ČHMÚ	1010	15,713	50,713
Košetice	JKOSS	Podkorunové srážky (smrk)	ČHMÚ	535	15,080	49,572
Luisino údolí	HLUUS	Podkorunové srážky (smrk)	VÚLHM	940	16,390	50,293

3.2 Výpočet atmosférické depozice z podkorunových srážek

Depozice z podkorunových srážek (Throughfall – TF) a srážek s prašným spadem (Bulk precipitation - BP) byly vypočítány součinem srážkových úhrnů s koncentracemi jednotlivých látek. Pro výpočet mokré (wet deposition – WD) a suché (dry deposition – DD) složky depozice a tím i celkové depozice z dat podkorunových srážek a srážek s prašných spadem bylo nutné provést několik výpočetních kroků.

Vstupními daty byly srážkové úhrny (výšky) na jednotlivých stanicích měřené v měsíčních intervalech

$$h = [mm] = [l/m^2] \quad (1)$$

spolu s koncentracemi jednotlivých látek obsažených ve srážkách měřené v stejném intervalu

$$c = [\mu g/l] \quad (2)$$

součinem koncentrací a srážkového úhrnu se získá depozice těchto látek

$$D = c \cdot h = \left[\frac{\mu g}{l} \cdot \frac{l}{m^2} \right] = \left[\frac{\mu g}{m^2} \right] / 1000 = \left[\frac{mg}{m^2} \right] \quad (3)$$

Aby bylo možné depoziční data dále porovnávat, bylo nutné sjednotit časové období různých depozic. Byl tak proveden převod depozic z jednotlivých měřících intervalů na celkovou roční depozici. Celková roční depozice je vážený průměr všech měřených depozic v daném roce, kde váhu jednotlivých depozic je určena na základě srážkových úhrnů. Data ročních depozic jednotlivých látek sloužila jako vstupy do Canopy budget modelu.

3.3 Canopy budget model

Pro výpočet celkové depozice (total deposition - TD) byl použit Canopy budget model (Ulrich, 1983), rozšíření tohoto modelu provedli Draaijers a Erisman (1995). Na celkové depozici (TD) se podílí podkorunové toky (TF), stok po kmeni – Stemflow (SF) a Canopy Exchanges (CE),

kteře charakterizují vliv vegetace na depozici a mohou být kladné – Canopy Leaching (CL) nebo záporné – Canopy Uptake (CU)

$$TF + SF = TD + CE = WD + DD + CE \quad (1)$$

kde WD je čistá srážková (mokrú) depozice a DD je suchá depozice. K určení mokře depozice je ještě nutné data ze srážek s prašným spadem (BP) opravit o vliv suché depozice, neboť na srážkoměry typu „bulk“ působí obě složky depozice. Korektura (C_{corr}) byla provedena pomocí průměrných poměrů čistých srážek a podkorunových srážek (Draaijers, et al., 1998).

Tab. 5 Korekční faktory bulk depozice (Draaijers, et al., 1998).

Flux	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻
C _{corr}	0.69	0.73	0.67	0.81	0.84	0.83	0.89	0.82

$$WD = BP \cdot C_{corr} \quad (5)$$

V případě měření mokře depozice srážkoměry typu „wet-only“, které jsou mimo srážkovou činnost uzavřeny se logicky žádné opravné kroky pro určení WD neprovádějí (Staelens, et al., 2008).

Pokud nejsou k dispozici data stoku po kmeni (SF), je možné tuto složku depozice zanedbat.

$$TF = TD + CE = WD + DD + CE \quad (6)$$

Ionty sodíku (Na⁺), chloru (Cl⁻) a síranu (SO₄²⁻) mají zanedbatelné hodnoty CE (Lindberg a Lovett, 1992). Je tedy možné u nich určit celkovou depozici jako

$$TD = TF \quad (7)$$

Pro určení celkové depozice zásaditých kationtů (bc), byl Na⁺ použit jako stopovač. Sodík má velmi podobný poměr TD/BP jako Ca²⁺, Mg²⁺, a K⁺

$$TD_{bc} = \frac{TF_{Na}}{BP_{Na}} \cdot BP_{bc} \quad (8)$$

kde bc vyjadřuje Ca²⁺, Mg²⁺, resp. K⁺. Canopy leaching těchto kationtů (CL_{bc}) se vypočítá jako

$$CL_{bc} = TF_{bc} - TD_{bc} \quad (9)$$

Určení atmosférické depozice pro sloučeniny dusíku pomocí dat z depozice srážek s prašným spadem (TF) je zatíženo větší mírou nejistoty. Několik studií ukázalo (Adriaenssens, et al., 2013), že dusík v plynném (NO₂, HNO₃, NH₃) nebo pevném (NH₄⁺, NO₃⁻) skupenství může pronikat do vegetace olistěním.

Rozšířený Canopy budget model (EC-UN/ECE, 2001) předpokládá, že Canopy uptake NH_4^+ a H^+ je roven Canopy leaching zásaditých kationtů sníženého o Canopy leaching slabých kyselin (CL_{wa})

$$CU_{\text{NH}_4^+} = \text{CL}_{bc} - \text{CL}_{wa} - CU_H \quad (10)$$

kde

$$CU_H = \frac{6 \cdot TF_H}{TF_{\text{NH}_4^+} + 6 \cdot TF_H} \cdot (\text{CL}_{bc} - \text{CL}_{wa}) \quad (11)$$

a

$$\text{CL}_{wa} = TF_{wa} - 2 \cdot BP_{wa} \quad (12)$$

kde slabé kyseliny (wa) jsou spočítány jako rozdíl součtů koncentrací kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , NH_4^+) a aniontů (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-).

Za předpokladu, že má NH_4^+ výměnou schopnost šestkrát větší než NO_3^- se Canopy uptake dusíku (CU_N) vypočítá jako

$$CU_N = CU_{\text{NH}_4^+} \cdot \frac{6 \cdot TF_{\text{NH}_4^+} + TF_{\text{NO}_3^-}}{6 \cdot TF_{\text{NH}_4^+}} \quad (13)$$

$$CU_{\text{NO}_3^-} = CU_N - CU_{\text{NH}_4^+} \quad (12)$$

celková depozice dusíku (TD_N) je potom

$$\text{TD}_N = TF_N + CU_N = (TF_{\text{NH}_4^+} + TF_{\text{NO}_3^-}) + (CU_{\text{NH}_4^+} + CU_{\text{NO}_3^-}) \quad (15)$$

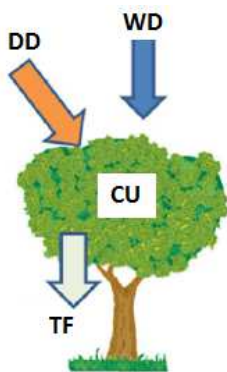
nebo také

$$\text{TD}_N = \text{WD}_N + \text{DD}_N = (\text{WD}_{\text{NH}_4^+} + \text{WD}_{\text{NO}_3^-}) + (\text{DD}_{\text{NH}_4^+} + \text{DD}_{\text{NO}_3^-}) \quad (16)$$

suchá depozice (DD) všech látek tvoří doplněk mokré depozice do celkové depozice

$$\text{DD} = \text{TD} - \text{WD} \quad (17)$$

složky tvořící celkovou depozici dle rovnic (15) a (16) zobrazuje schéma (Obr. 7)



Obr. 7 Složky tvořící celkovou depozici (Avila, et al., 2017)

4 Výsledky a diskuse

4.1 Srážky

Tabulka s velikostmi ročních srážkových úhrnů na jednotlivých stanicích zároveň podává informaci o (ne)úplnosti dat na jednotlivých stanicích. Jsou zde totiž zobrazeny pouze roky, pro které byly k dispozici kompletní data nutná pro výpočet celkové depozice dusíku (TDN) pomocí Canopy budget modelu. Jedná se o 9 ročních koncentrací iontů (NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) a srážkový úhrn. Těchto 10 veličin musí být určeno jak pro srážky typu bulk, tak pro throughfall. Dohromady je potřeba znát celkem 20 veličin, jinak nemůže být stanovena hodnota TDN. Souvislé výpadky v (Tab. 6) jsou většinou způsobeny zahájením či ukončením provozu dané stanice. Na stanicích Březka a Spálenec došlo během pozorovaného období k ukončení měření srážkové depozice. Naopak na stanicích Lysina a Luisino Údolí došlo k zahájení monitoringu.

Tab. 6 Srážkové úhrny bulk a throughfall

h [mm]	Březka		Buchlovice-Medlovice		Červík		Jezeří		Kamýk-Vseteč		Košetice		Lazy		Lesní potok		Liz		Loukov		Lysina	
	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF
2000			625	432			908	801	560	359	1318	743	864	725	569	244	664	464				
2001			660	530	1477	1195	723	795	622	414	1457	882	882	749			831	564	912	628		
2002	925	714	613	468	1648	1080	1066	1046	1065	638	1554	509	1056	965			1281	969	756	593		
2003					1364	905	468	412			947	546			437	175						
2004	404	325	508	333									321	719								
2005	535	509	674	506	1612	1122			722	583			769	827	619	342	1022	575	844	585	1028	819
2006	595	506	722	562	1078	851			783	588			836	820	601	297	931	637	795	580	1068	827
2007	687	472	835	562	1032	864	771	737	729	479			956	864			1099	621	815	509	1135	890
2008	492	390	591	379					573	395			813	714	504	263	802	497			994	740
2009	625	583	711	476	1074	843			778	553	1409	825	971	859	508	304	1008	726			1087	819
2010	834	714	879	598	1277	1076	743	712	864	626	880	836	997	1028	770	468	863	597	880	563	1164	943
2011	690	524	527	353	841	657	661	549	671	420	642	381	781	781	532	300	663	422	647	425	962	773
2012			611	415	1238	827	767	602	868	561	721	382	739	664	577	319	940	593	753	505	1025	756
2013			677	521	1041	801	1017	774	839	607	748	474	997	871	628	436	856	569	774	543	1000	760
2014			659	510	1311	852	847	642	683	466	653	385	838	560	579	376	892	654	620	380	802	585
2015			493	352	942	651	794	550	525	350	543	316	647	569	514	255	535	301	606	379	787	574
průměr	643	526	652	466	1226	902	797	693	734	503	988	571	831	781	570	315	885	585	764	517	1005	772

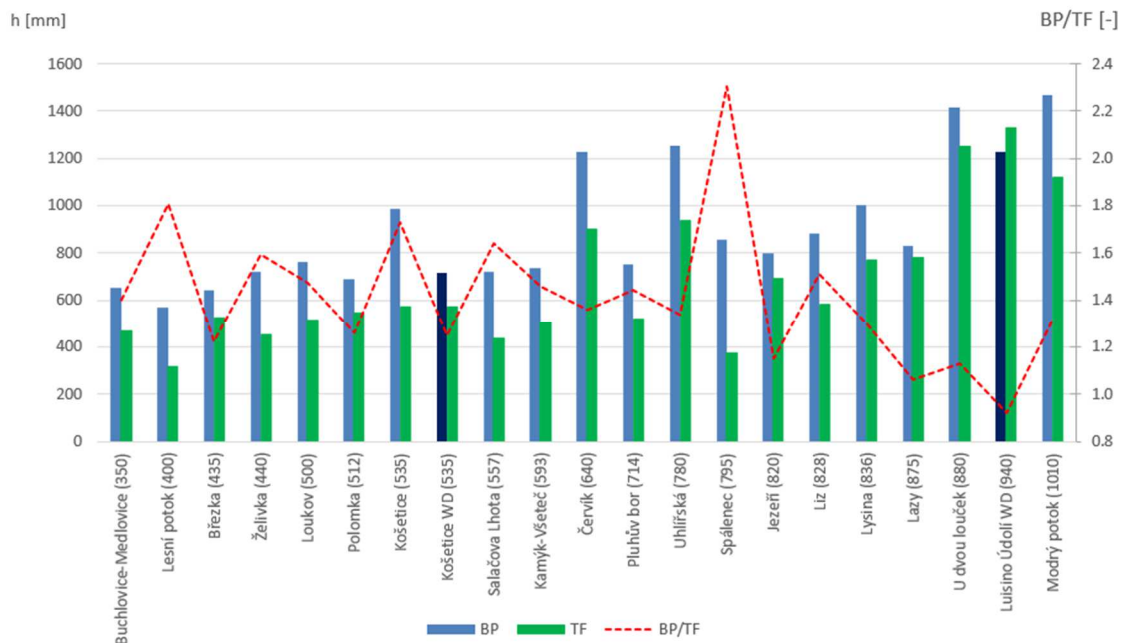
h [mm]	Modrý potok		Pluhův bor		Polomka		Salačova Lhota		Spálenec		U dvou louček		Uhlířská		Želivka		Košetice WD		Luisino Údolí WD		roční průměr	
	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	BP	TF	WD	TF	WD	TF	BP	TF
2000					722	616	596	369							743	372	668	743			757	513
2001					759	670	714	443	853	318	2258	1497		1107	896	490	741	882			1021	734
2002	1620	1455			902	828	853	511	1318	565	2322	1818			787	466	796	509			1184	842
2003	996	903	514	316	499	384			651	260	1027	963	926	593							783	546
2004			823	557											568	385					525	464
2005							715	438	608	345					846	548					833	600
2006					546	394	843	532					1396	994	675	581			1485	1508	836	628
2007	1875	808	967	680	620	428	724	367			1324	1400	1204	772	759	476			1318	1621	971	683
2008			792	535							1045	1145			562	328			1228	1172	717	539
2009			818	541							1609	1224			738	439	704	825	1235	1473	945	683
2010	1867	1611	851	654	706	651	922	496			1275	1232	1739	1361	858	616			1357	1465	1020	821
2011	1427	1045	698	505	702	526	613	372			1134	1089	1319	969	731	405	642	381	1188	1395	791	583
2012	1167	780	738	517	703	443	686	430			1210	1144	1189	815	735	448	722	382	1116	1292	863	600
2013	1446	1421	737	541	771	640	752	615			1391	1183	1235	1051	830	542	754	474	1121	1268	926	727
2014	1378	1043	631	445	733	546	628	385			1312	1185	1155	835	583	351	698	385	1112	1040	841	600
2015	1447	1013	688	441	600	423	614	312			1087	1154	1093	868	498	324			1131	1078	730	519
průměr	1469	1120	751	521	688	546	722	439	857	372	1416	1253	1251	937	720	451	716	573	1229	1331	859	630

Průměrné srážkové úhrny na stanicích (Obr. 8) vykazují rostoucí trend množství srážkových úhrnů s přibývajícím nadmořskou výškou stanic. Naopak poměr srážkových úhrnů bulk a throughfall s nadmořskou výškou spíše klesá.

Data stanice Spálenec, která má nezvykle velký poměr BP/TF, je třeba brát s rezervou. Vlivem neúplnosti dat na stanicích jsou průměrné srážkové úhrny vypočítány u jednotlivých stanic vždy z odlišných ročních dat. Právě stanice Spálenec má průměr z celého období vypočítán

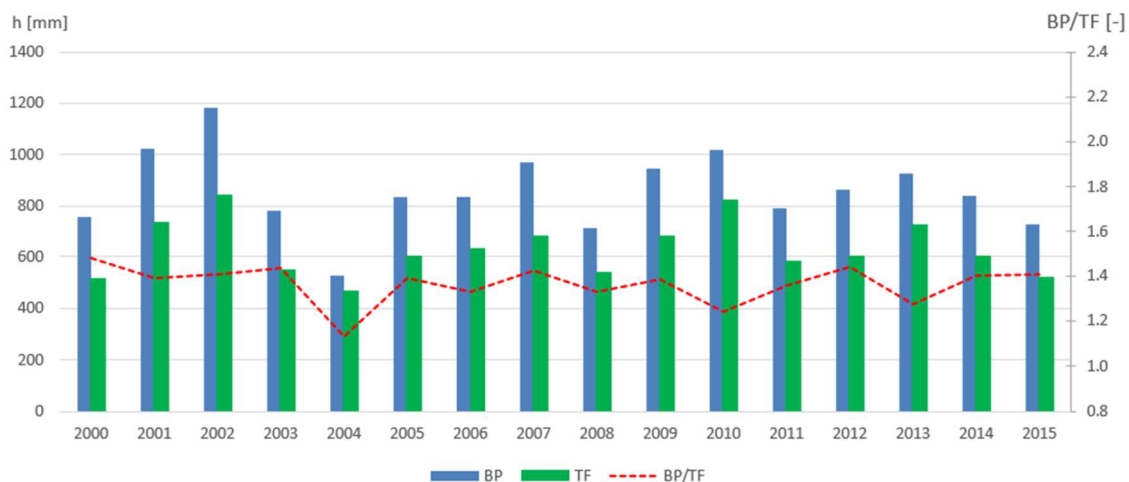
z nejmenšího množství dat stanic, a to pouze ze 4 let. Ostatní stanice mají průměr spočítaný většinou z 10 a více let.

Na stanici Luisino Údolí, jedné ze 2 stanic, kde se depozice počítala pomocí dat z čistých srážek (WD), jsou průměrné srážkové úhrny typu bulk vyšší než čisté srážky. Tento jev je možný, neboť čisté srážky jsou měřeny pouze během srážkové činnosti a z velké části tak zanedbávají horizontální srážkovou činnost (mlhu), která může mít v horských oblastech velmi významný podíl na celkovém srážkovém úhrnu. Při podrobnějším pohledu na tuto stanici je z vidět, že tento opačný poměr nastal v 7 z 10 let, ze kterých jsou k dispozici data (Tab. 6).



Obr. 8 Průměrné srážkové úhrny stanic (2000-2015)

Opačným způsobem porovnání dat srážek jsou roční průměry ze všech stanic. Na grafu (Obr. 9) je jasně patrný srážkově nadprůměrný rok 2002, kdy Českou republiku postihly katastrofální povodně. Poměr srážek BP/TF je po celé období celkem konstantní, pohybuje se kolem hodnoty 1,4. Výjimku tvoří rok 2004, ve kterém jsou i nízké srážkové úhrny. Při pohledu na data (Tab. 6) je však vidět, že průměr roku 2004 se skládá z dat pouze 5 stanic z celkového počtu 19 stanic. Nízké srážkové úhrny jsou způsobeny tím, že 3 z 5 stanic roku 2004 patří mezi stanice s nejnižší nadmořskou výškou a srážkovými úhrny.



Obr. 9 Průměrné roční srážkové úhrny (2000-2015)

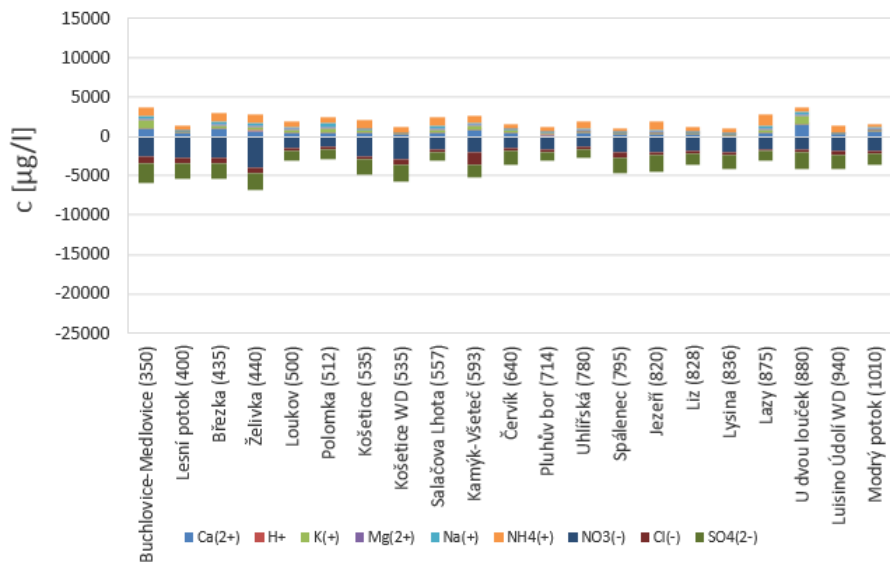
Vzhledem k náhodné neúplnosti dat je vzájemné porovnání komplikovanější. Neúplnost dat ale nebyla tak vysoká, aby porovnání fatálně znemožnila. Nicméně se tato neúplnost v obou grafech jednou projevila, a to na stanici Spálenec (Obr. 8) a v roce 2004 (Obr. 9). Náhled do vstupních dat (Tab. 6) vychýlených hodnot stanice Spálenec a roku 2004 prokázal, že extrémy byly způsobeny kombinací 2 faktorů, které při výpočtu průměrů z neúplných dat mohou vytvořit extrémy, které by při úplnosti dat nenastaly, tj. nízký počet dat v kombinaci s odlehlostí těchto dat od „průměrných“ dat.

Z porovnání srážkových úhrnů je patrná obecně známá závislost na nadmořské výšce. Poměr BP/TF naopak s nadmořskou výškou nepatrně klesá. Během let byl poměr BP/TF přibližně konstantní.

Celkové průměrné srážkové úhrny ze všech stanic i let (Tab. 6) jsou 859 mm u srážek bulk, 630 mm v případě srážek throughfall. Jde o nadprůměrné srážkové úhrny v rámci ČR, dlouhodobý srážkový normál (1960-1990) činí v ČR 674 mm. Naprostá většina stanic se nachází v nadmořské výšce vyšší, než je průměrná nadmořská výška ČR - 435 m n. m. Srážky byly z podstaty experimentu měřeny v lesních porostech. Lesní porosty mají přirozeně větší procentuální zastoupení v místech s vyšší nadmořskou výškou a srážkami. Vybrané stanice z pohledu srážkových úhrnů tak vcelku dobře reprezentují ČR.

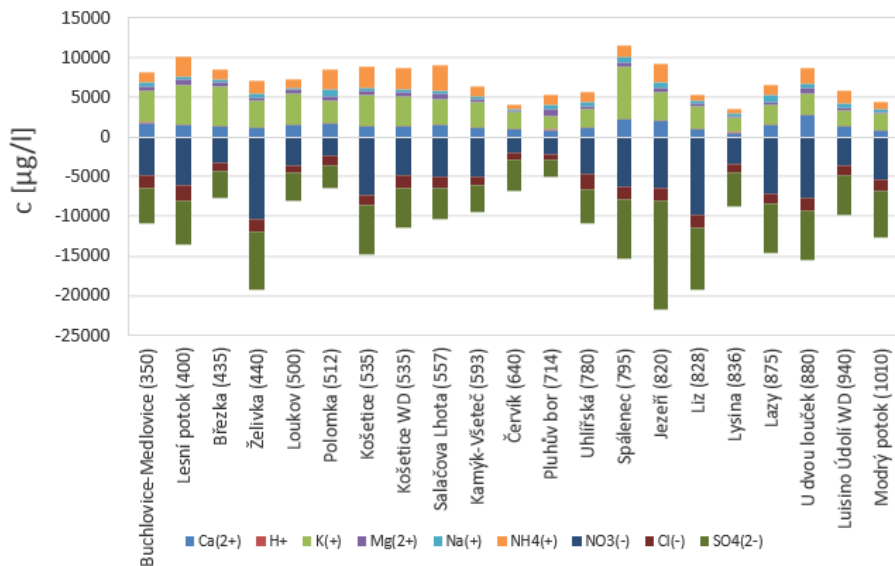
4.2 Koncentrace

Nejvyšší koncentrace ve srážkách typu bulk (Obr. 10) vykazovaly ionty NO_3^- , dále SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} a Cl^- . Na všech stanicích je suma koncentrací iontů se záporným nábojem vyšší než suma iontů s kladným nábojem. Nejvyšší koncentrace z hlediska stanic byly zaznamenány na stanicích Buchlovice-Medlovice a Želivka. Jedná se stanice s nízkými nadmořskými výškami v rámci sledovaných stanic. Naopak nejnižší koncentrace vykazovaly stanice Pluhův Bor a Uhlířská.



Obr. 10 Koncentrace iontů srážek typu bulk – vážený průměr dle srážkových úhrnů. Kationty jsou na horní části svislé osy, anionty na záporné části svislé osy

Koncentrace iontů v podkorunových srážkách byly na všech stanicích výrazně vyšší oproti koncentracím ze srážek typu bulk (Obr. 11). Průchodem srážek skrz koruny stromů dochází k obohacování srážek o látky z vegetace, což vede k nárůstu koncentrací iontů v podkorunových srážkách. Nejvyšší nárůst byl u iontů K^+ a Mg^{2+} , k poklesu došlo jen u H^+ na několika stanicích, Cl^- na stanici Kamýk-Všeteč a NH_4^+ na stanici Červík. Z hlediska jednotlivých stanic byly nejvyšší koncentrace na stanicích Jezeří a Spálenec, nejnižší naopak u stanic Pluhův Bor a Červík.

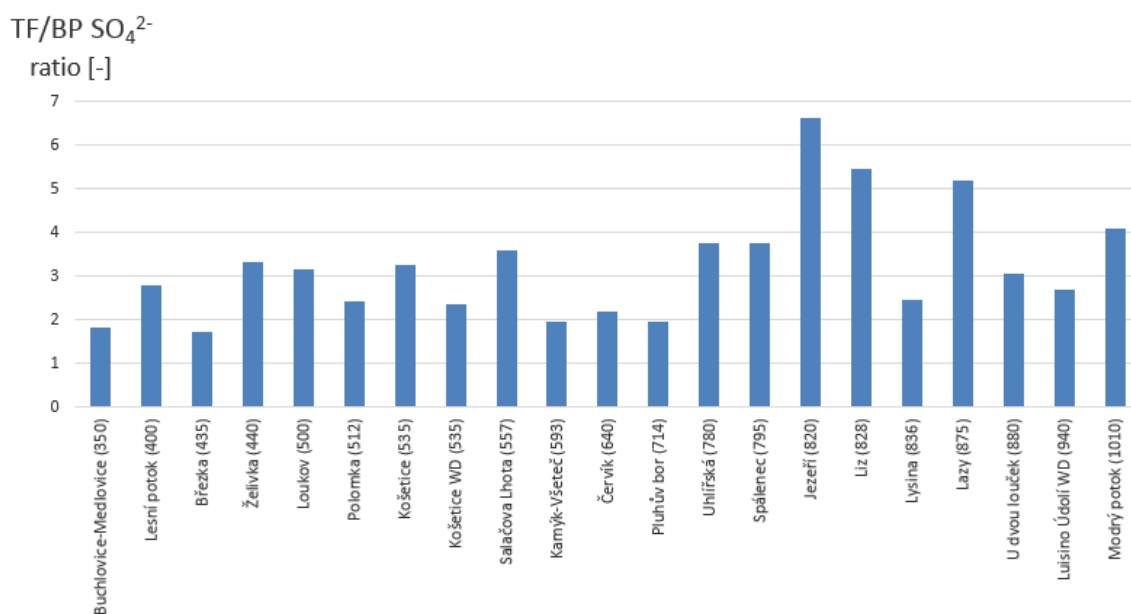


Obr. 11 Koncentrace iontů srážek typu throughfall – vážený průměr dle srážkových úhrnů. Kationty jsou na horní části svislé osy, anionty na záporné části svislé osy

U stanice Jezeří je pozoruhodný téměř sedminásobný nárůst mezi koncentracemi iontů SO_4^{2-} srážek bulk (Obr. 10) a throughfall (Obr. 11). Na této stanici došlo k poklesu koncentrací obou typů srážek během pozorovaného období přibližně o 60 %. Stanice Jezeří se nachází v Krušných horách v oblasti zasažené kyselou depozicí. Koncentrace SO_4^{2-} ve srážkách bulk jsou na této stanici sice nadprůměrné, nikoliv však nejvyšší. Naopak v podkorunových srážkách (throughfall) jsou

výrazně nejvyšší. V pořadí druhá stanice throughfall koncentrací SO_4^{2-} je Liz s téměř o polovinu nižšími koncentracemi. Už na počátku pozorovaného období (2000) byly emise SO_2 na území ČR výrazně nižší ve srovnání s koncem 20. století. Rozdíly v koncentracích iontů SO_4^{2-} srážek bulk a throughfall u této stanice tak mohou poukazovat na minulost této oblasti. Koncentrace SO_4^{2-} v bulk srážkách jsou s ohledem na vyšší nadmořskou výšku stanice v rámci území ČR na celkem běžné úrovni. Zatímco vysoké koncentrace podkorunových srážek poukazují na nadměrné uvolňování SO_4^{2-} z vegetace enormně zasažené kyselou depozicí v minulosti. Samotné podkorunové srážky jsou následně zdrojem vody a živin pro tuto vegetaci. Jde o částečně uzavřený koloběh. Proto i několik let po výrazném snížení emisí SO_2 jsou koncentrace iontů SO_4^{2-} v podkorunových srážkách stále na vysoké úrovni.

Z poměru koncentrací iontů SO_4^{2-} TF a BP (Obr. 12) je patrné, že kromě výše zmíněné stanice Jezeří, mají tento poměr vyšší i stanice Liz na Šumavě, Lazy ve Slavkovském lese, Modrý potok v Krkonoších a Uhlířská v Jizerských horách. Příznačné je pro všechny stanice, že se nacházejí v pohořích na území Čech, které byly více exponované kyselou depozicí (Moldan a Hak, 2011). Horská stanice Červík v Moravskoslezských Beskydech má tento poměr naopak nízký, neboť moravská pohoří byly méně zasažené kyselou depozicí.



Obr. 12 Poměr průměrných koncentrací iontů srážek throughfall a bulk

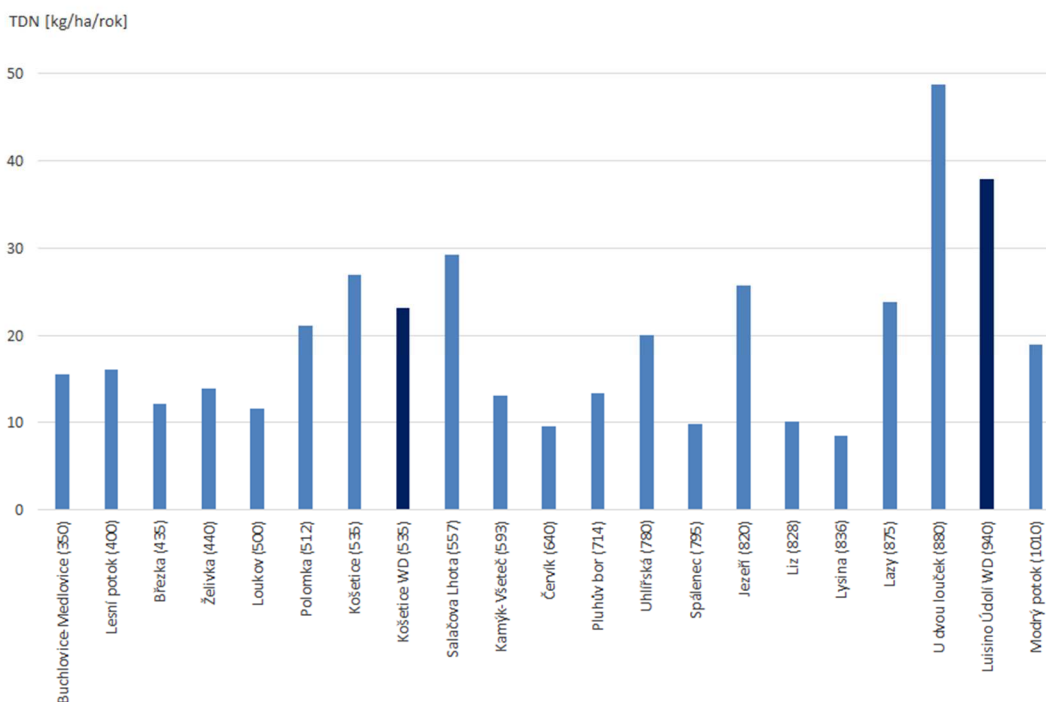
4.3 Depozice

Celkové depozice dusíku na jednotlivých stanicích během sledovaného období 2000-2015 zobrazuje přehled (Tab. 7). Absolutně nejnižší depozice 1,3 kg/ha/rok byla vypočítána v roce 2000 na stanici na stanici Kamýk-Všeteč. Nejvyšší depozice 79,9 kg/ha/rok na stanici U dvou louček v roce 2008. Nejvíce dat bylo k dispozici na stanicích Buchlovice-Medlovice, Želivka a Lazy, kde je datová řada s výjimkou roku 2003 kompletní. Nejméně dat má stanice Spálenec.

Tab. 7 Celkové atmosférické depozice dusíku na stanicích v ČR (2000-2015)

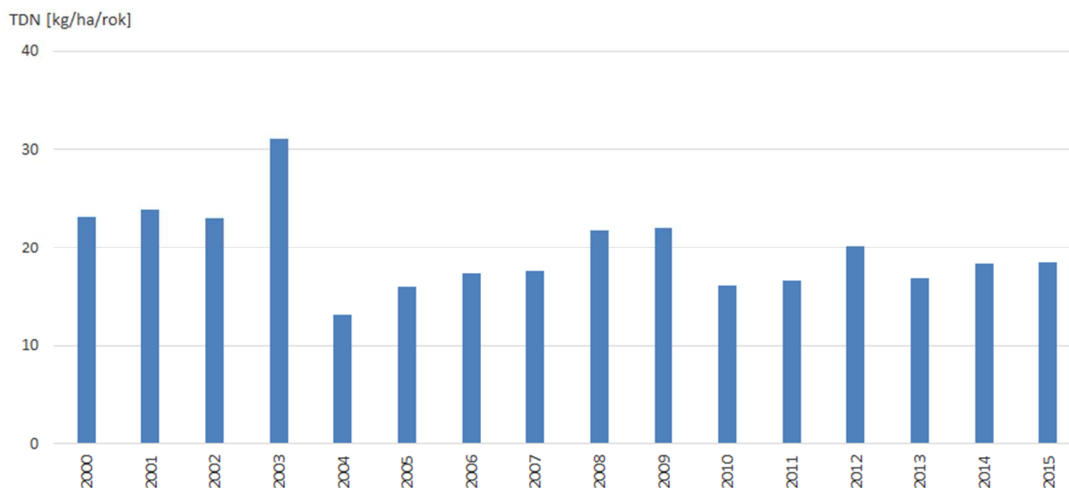
TDN [kg/ha/rok]	Buchlovice-Medlovice	Lesní potok	Březka	Želivka	Loukov	Polomka	Košetice	Košetice WD	Salačova Lhota	Kamýk-Všeteč	Červík	Pluhův bor	Uhlířská	Spálenec	Jezeří	Liz	Lysina	Lazy	U dvou louček	Luisino údolí WD	Modrý potok	roční průměr	
2000	13,3	14,0		21,3		23,8	37,5	36,1	22,8	1,3					36,4	20,1		27,5				23,1	
2001	13,1			18,1	12,5	29,1	43,1	42,6	22,5	11,1	9,9		22,1	6,4	28,6	12,1		23,2	64,5			23,9	
2002	20,9		17,5	15,2	13,8	37,8	22,6	19,1	30,6	11,3	14,2			9,9	36,6	11,6		23,5	66,4		16,6	23,4	
2003		19,1					25,8	47,4											67,5			37,0	30,4
2004	17,6		10,9	9,1								10,8							17,0				13,1
2005	31,0	17,5	11,7	16,3	13,6				23,4	17,4	12,6			4,6		9,5	9,6	24,2				16,0	
2006	15,4	13,0	15,4	13,4	9,5	12,6			23,9	15,1	5,6		22,9			9,8	11,0	27,3		48,1		17,4	
2007	14,9		11,5	11,5	10,4	15,1			26,2	14,6	5,3	14,1	12,5		27,5	8,2	10,6	23,6	34,1	48,4	10,5	18,0	
2008	13,4	15,3	7,0	16,6					15,3			13,5				7,4	5,9	24,6	79,9	40,7		21,8	
2009	13,5	17,6	11,6	10,6			35,9	32,0		16,0	9,7	16,6				8,6	9,5	23,4	67,0	36,1		22,0	
2010	11,3	14,6	10,9	8,6	12,0	15,8	30,4		18,8	13,9	8,6	11,8	12,0		24,4	11,2	7,5	22,3	20,3	36,3	15,9	16,1	
2011	9,7	11,7	12,4	10,5	5,1	17,9	15,4	12,9	21,3	11,0	8,5	12,6	22,8		27,7	9,7	6,5	20,5	29,6	38,6	28,6	16,0	
2012	15,6	15,2		18,6	7,6	22,3	17,2	15,6	48,7	16,5	9,3	14,8	21,6		24,8	9,5	12,2	30,7	33,9	35,5	13,6	20,5	
2013	11,0	14,1		15,1	9,3	14,0	16,5	13,8	55,1	11,3	8,6	12,6	15,0		14,7	6,4	6,7	23,4	24,8	30,1	17,1	16,8	
2014	15,2	19,0		12,6	13,9	18,1	15,3	13,1	26,4	12,4	10,5	15,2	18,5		13,1	7,8	8,3	26,7	57,9	30,2	14,6	18,6	
2015	15,6	21,0		9,6	19,3	22,0	15,3		32,0	15,0	8,1	13,7	23,6		10,3	10,1	4,9	19,9	40,0	35,4	16,7	18,6	
Průměr stanic	15,4	16,0	12,1	13,8	11,5	21,2	27,0	23,2	29,3	13,0	9,6	13,4	20,1	9,9	25,8	10,1	8,4	23,9	48,8	37,9	19,0	19,5	

Dlouhodobé průměry stanic za sledované období 2000-2015 neprokazují závislost na nadmořské výšce (Obr. 13). Nejnižší průměr 8,4 kg/ha/rok má stanice Lysina (836 m n. m.), nejvyšší průměr 48,8 kg/ha/rok stanice U dvou louček (880 m n. m.). Obě tyto stanice mají dlouhodobé průměry počítané z dostatečného množství dat a nepodléhají tak možnému zkreslení z důvodu neúplnosti dat.



Obr. 13 Stanice – průměrné celkové depozice dusíku (2000-2015)

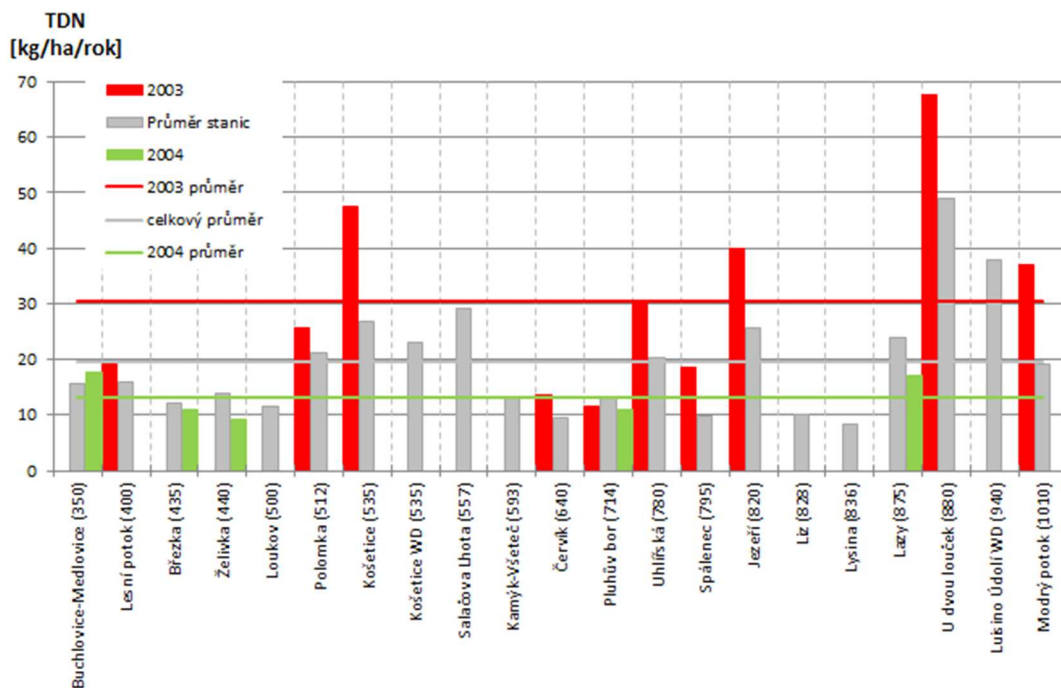
Průměrné hodnoty ročních depozic vykazují vcelku konstantní trend (Obr. 14). Extrémní roky z pohledu depozice nastaly v letech 2003, resp. 2004. Maximální roční průměrná depozice 30,4 kg/ha/rok nastala v roce 2003, minimální depoziční průměr 13,4 kg/ha/rok byl naopak spočten v roce 2004.



Obr. 14 Průměrné roční celkové depozice dusíku

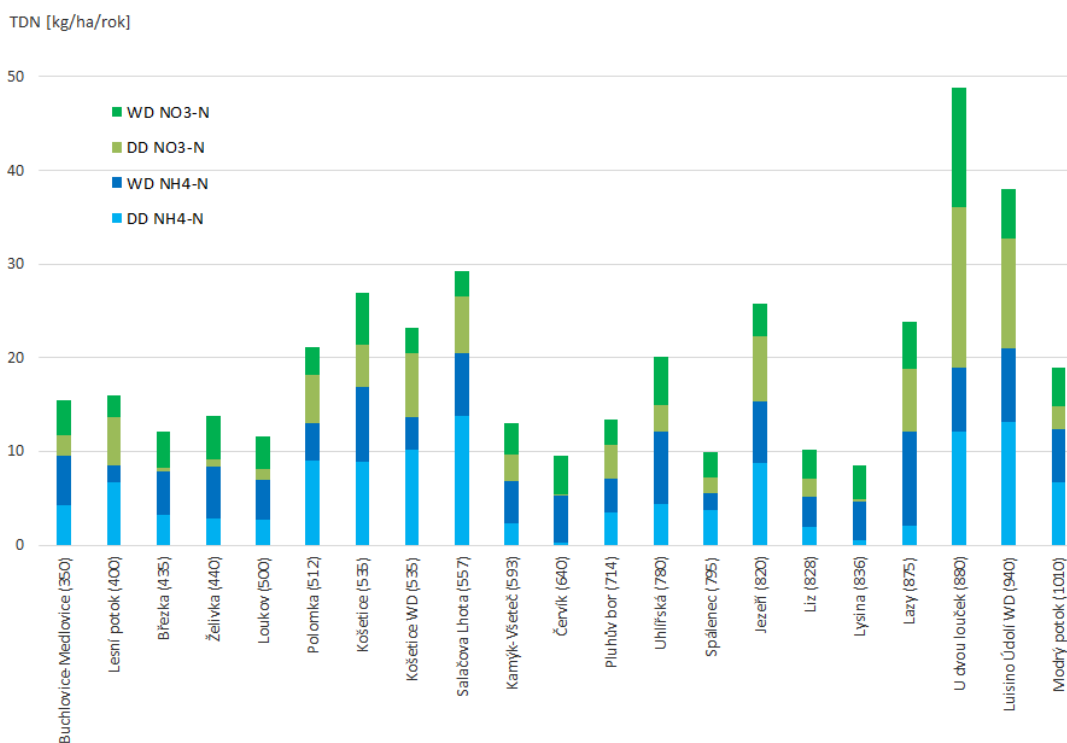
V případě těchto dvou extrémů je však patrné, že byly ovlivněny vzorkem dostupných dat v inkriminovaných letech. Roky 2003 a 2004 jsou dva roky s nejnižšími počty dostupných dat. Z vzorku 21 stanic, je v těchto letech k dispozici jen 10 resp. 5 stanic (Tab. 7). Dlouhodobý průměr 10 stanic z roku 2003 činí 21,1 kg/ha/rok, je tedy nadprůměrný proti celkovému průměru 19,5 kg/ha/rok. Zároveň 9 z 10 těchto stanic má vůči svému dlouhodobému průměru v roce 2003 nadprůměrné hodnoty. Rok 2003 byl tedy nadprůměrný z pohledu celkové depozice. Výběr stanic s dostupnými daty tuto nadprůměrnost ještě zvýraznil (Obr. 15).

Naopak 5 stanic roku 2004 má dlouhodobý průměr z dostupných stanic 17,6 kg/ha/rok, tento průměr je nižší než absolutní dlouhodobý průměr 19,5 kg/ha/rok. Zároveň 4 z 5 těchto stanic má vůči svému dlouhodobému průměru v roce 2004 podprůměrné hodnoty (Obr. 15). Výsledná hodnota ročního průměru 2004 tak byla zvýrazněna vybranými dostupnými stanicemi.



Obr. 15 Celkové depozice dusíku v letech 2003 a 2004

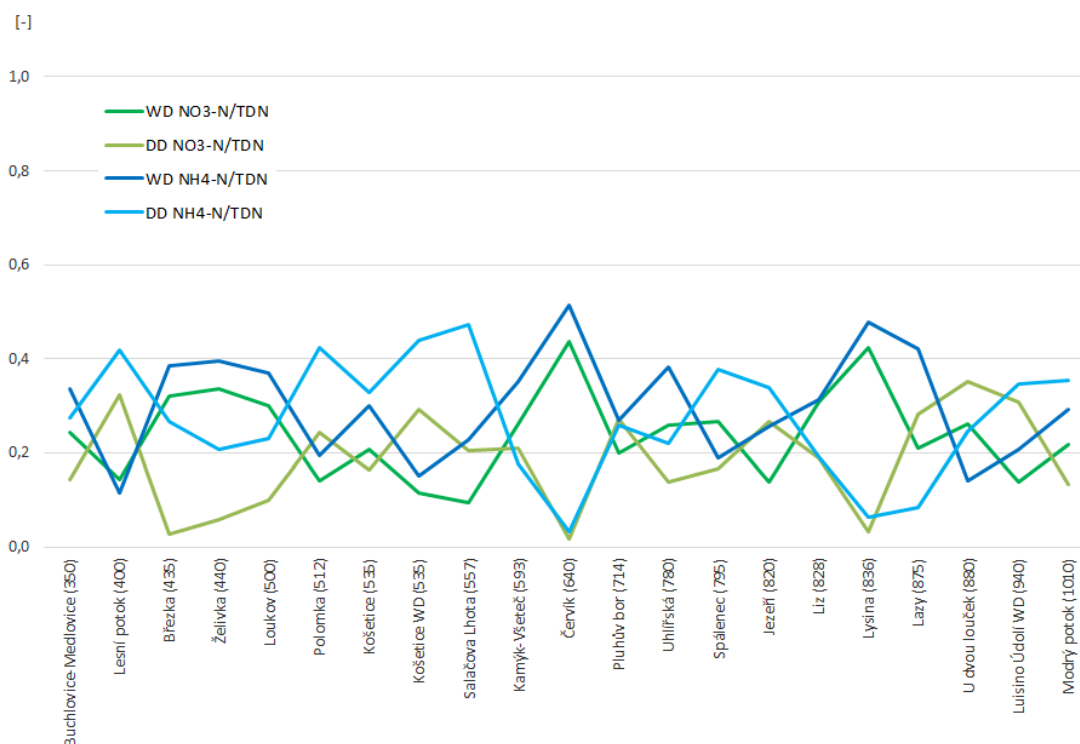
Jednotlivé složky celkové depozice dusíku počítané dle rovnice (16) jsou zobrazeny v grafu (Obr. 16).



Obr. 16 Průměrné složky mokré a suché depozice dusíku (2000-2015)

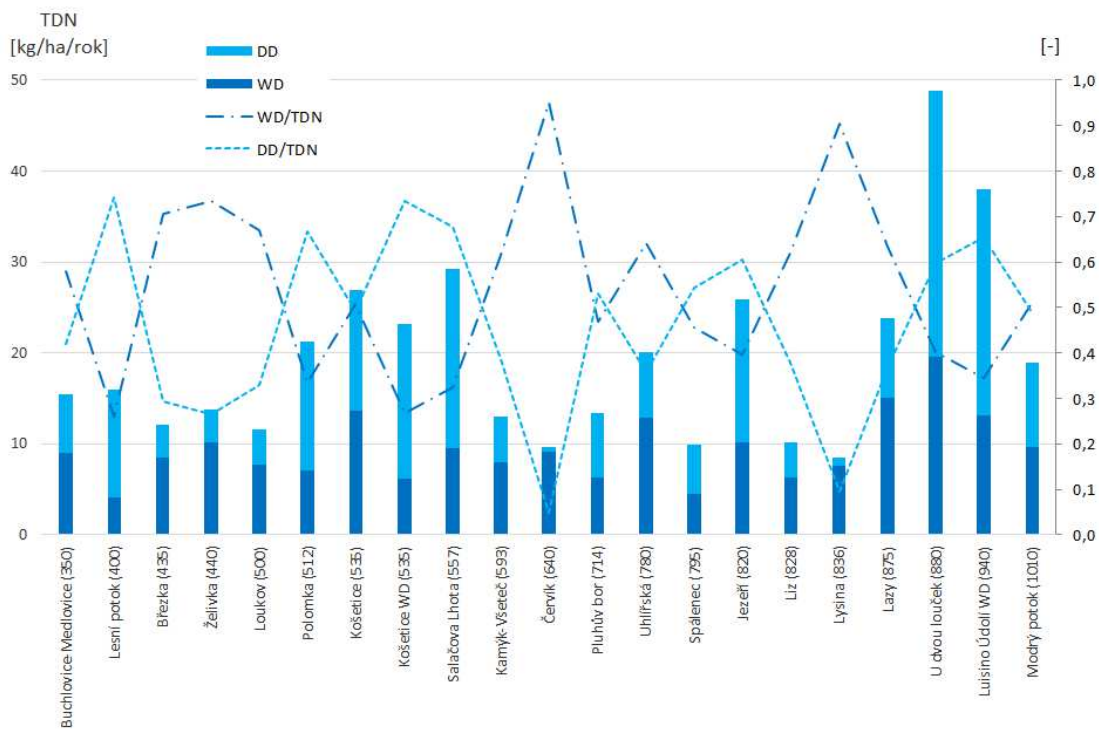
Podíly jednotlivých složek depozice vystihuje graf (Obr. 17) Z pohledu průměru všech stanic má s 30 % největší zastoupení mokrá depozice NH₄-N, následuje s 27 % suchá depozice

NH₄-N, poté s 24 % mokrá depozice NO₃-N a nejmenší podíl má s 19 % suchá depozice NO₃-N. Všechny 4 složky depozice jsou tedy vcelku rovnoměrně zastoupeny. Tomuto zastoupení nejvíce odpovídá stanice Buchlovice-Medlovice, naopak nejvíce vzdálené podíly složek proti průměru všech stanic má stanice Červík. Právě stanice Červík spolu se stanicí Lysina mají vysoké podíly mokrých složek depozice 95 % resp. 90 % (Obr. 18). Z grafu je patrné (Obr. 16), že mokré složky depozice těchto stanic dosahují běžných hodnot v porovnání s ostatními stanicemi. Příčinou vychýlených podílů jsou velmi nízké hodnoty složek suché depozice.



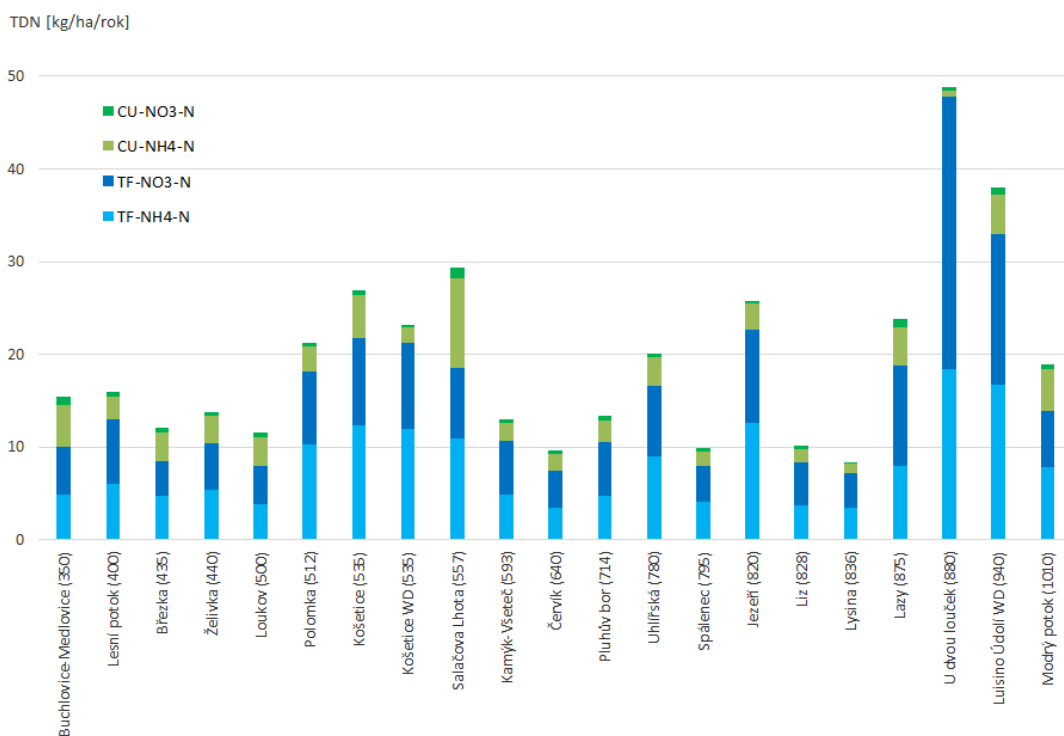
Obr. 17 Podíly složek mokré a suché depozice na celkové depozici dusíku

Ze součtu složek mokré a suché depozice je patrné (Obr. 18), že se jejich poměry vzájemně velmi liší mezi stanicemi. Na 6 stanicích jsou poměry mokré a suché depozice přibližně vyrovnané, u 6 stanic převažuje suchá depozice (> 60 % TDN) a u 9 stanic převažuje naopak mokrá depozice (> 60 % TDN). Celkově je průměr podílu suché depozice 46 %, mokré depozice 54 %. Nadmořská výška v tomto případě není rozhodujícím faktorem pro podíly mokré a suché depozice.



Obr. 18 Mokrý a suchá složka depozice

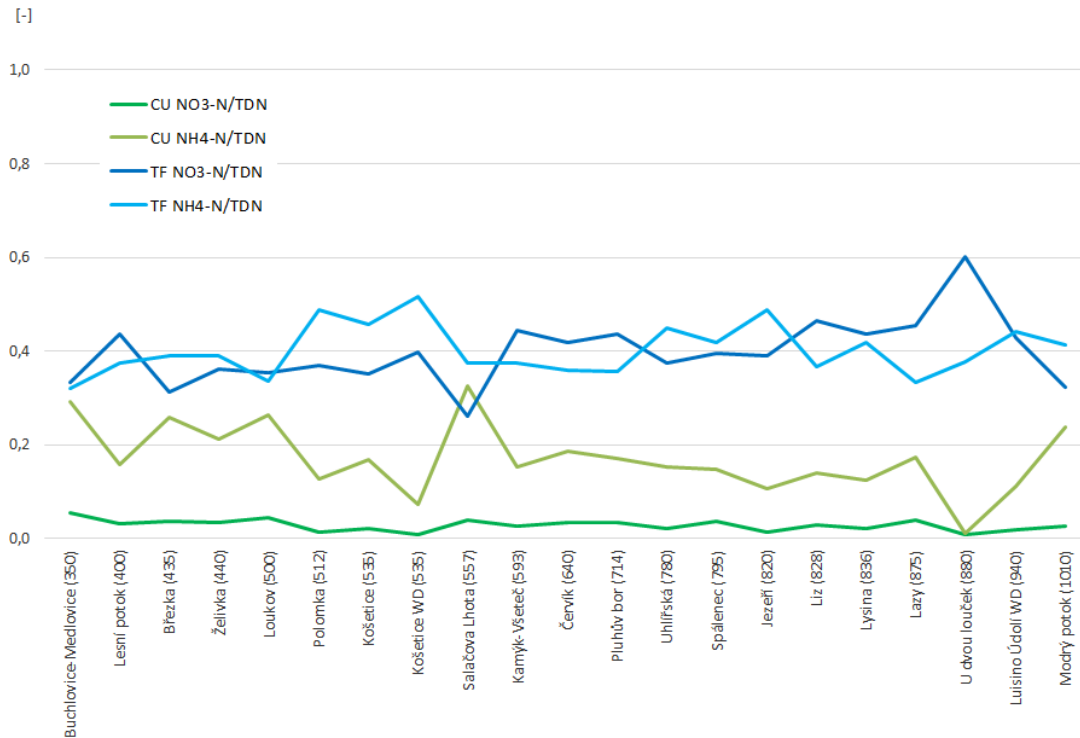
Velikosti jednotlivých složek depozice dle rovnice (15) jsou patrné z grafu (Obr. 19)



Obr. 19 Průměrné složky throughfall depozice a Canopy uptake dusíku (2000-2015)

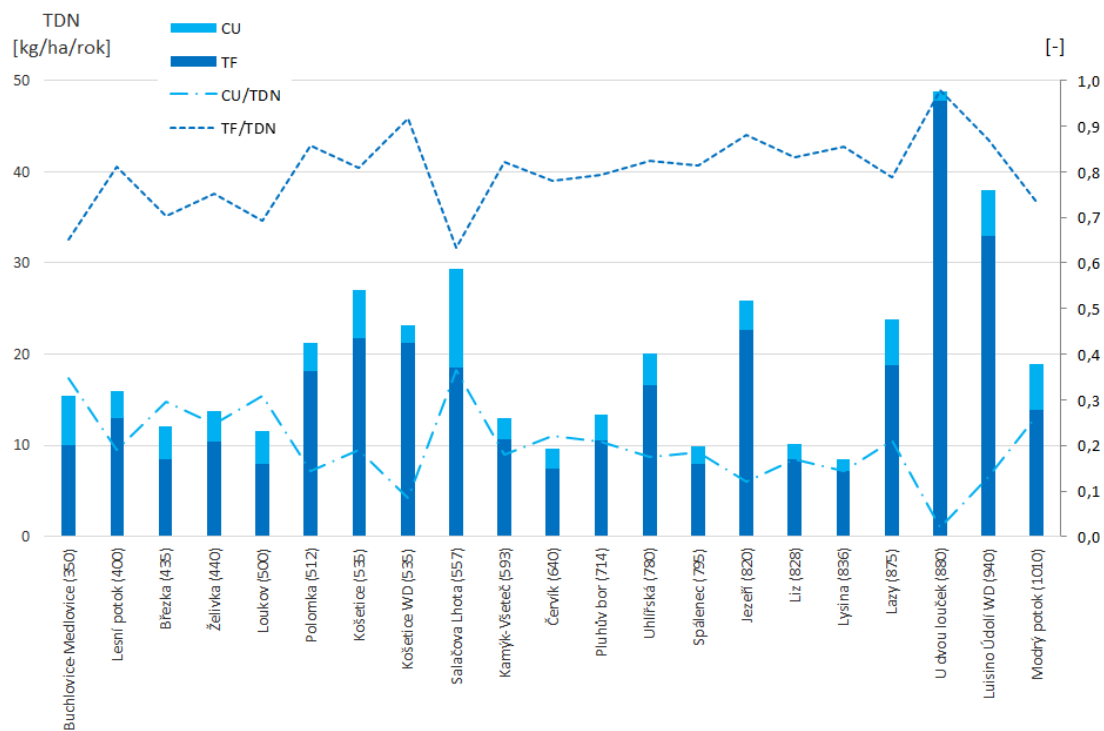
Podíly složek depozice dle rovnice (15) jsou patrné z grafu (Obr. 20). Proti výpočtu dle rovnice (16) jsou tyto podíly mezi jednotlivými stanicemi více podobné. Naopak velmi rozdílné jsou průměrné podíly jednotlivých složek depozice. Největší podíl 40 % mají shodně obě složky

(NO₃-N a NH₄-N) throughfall depozice, následuje se 17 % Canopy uptake NH₄-N a naprosto zanedbatelný podíl na celkové depozici u všech stanic má se 3 % Canopy uptake NO₃-N. Nejvíce se průměrným podílům složek depozice blíží stanice Spálenec, nejméně naopak stanice U dvou louček.



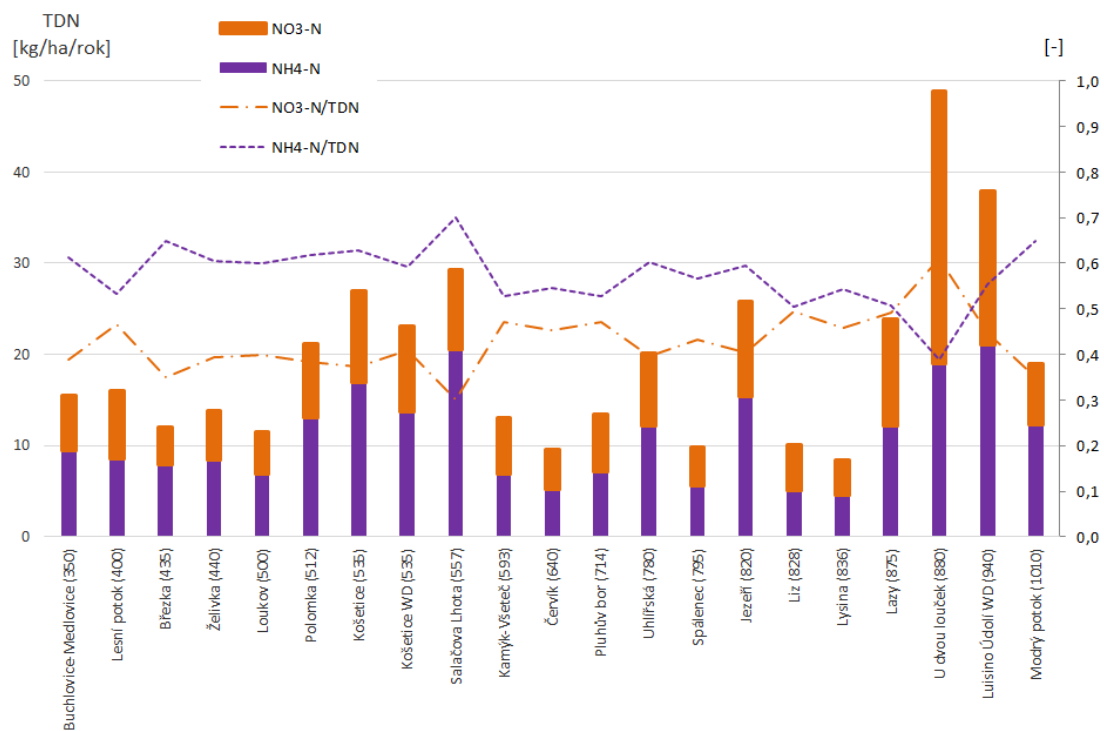
Obr. 20 Podíly složek throughfall depozice a Canopy uptake na celkové depozici dusíku

Ze součtu složek throughfall a Canopy uptake depozice je patrné (Obr. 21), že jsou jejich poměry vzájemně velmi podobné mezi stanicemi. Celkově je průměr podílu throughfall depozice 80 %, Canopy uptake 20 %. S rostoucí nadmořskou výškou roste i podíl throughfall depozice na celkové depozici.



Obr. 21 Throughfall depozice a Canopy uptake

Z pohledu složek $\text{NO}_3\text{-N}$ a $\text{NH}_4\text{-N}$ je patrný poměrný podobný poměr mezi všemi stanicemi (Obr. 22). Mírnou převahu 57 % na celkové depozici má podíl $\text{NH}_4\text{-N}$. S rostoucí nadmořskou výškou tento trend nepatrně slábne.



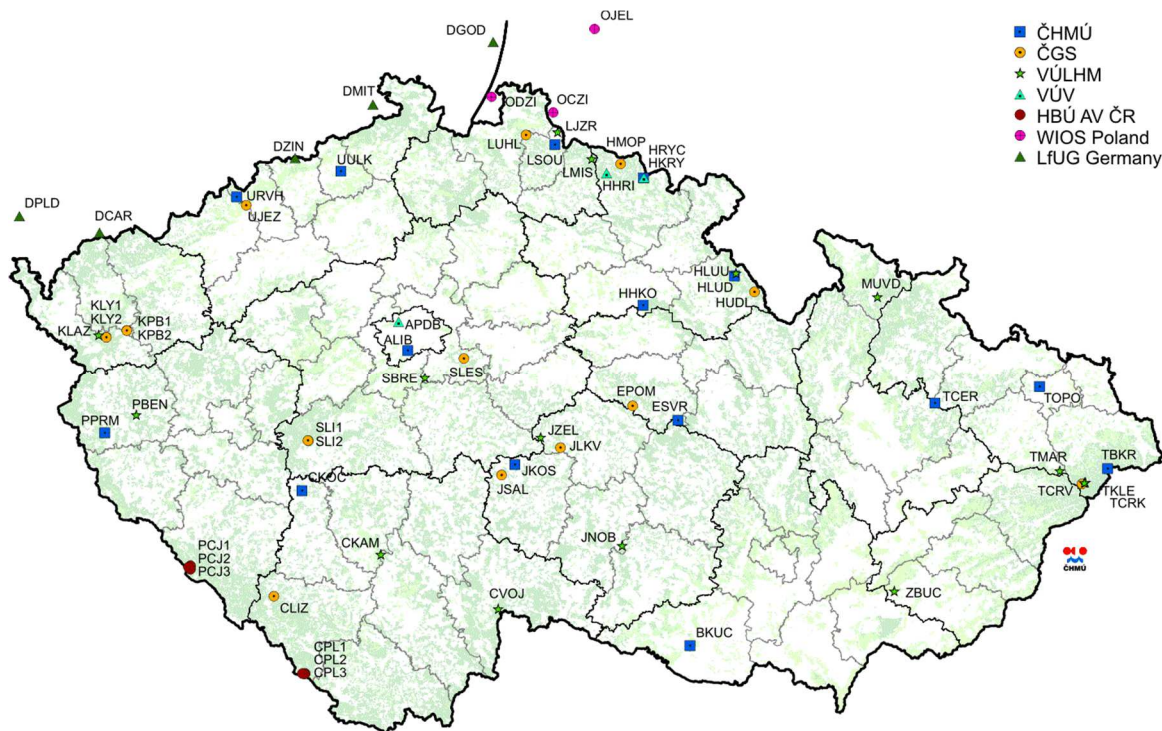
Obr. 22 $\text{NO}_3\text{-N}$ a $\text{NH}_4\text{-N}$ depozice

4.4 Porovnání různých metod měření depozice dusíku v ČR

Atmosférickou depozici dusíku z dostupných dat lokalit v České republice každoročně měří a vyhodnocuje ČHMÚ. V roce 2008 byla provedena aproximace depozice dusíku v lesních porostech modelem CAMx (Hůnová, et al., 2016). S výsledky obou metod jsou porovnány výsledné hodnoty Canopy budget modelu. Existuje také studie zabývající se atmosférickou depozicí dusíku v ČR v roce 1994 (Zapletal, 1998), která nemůže být ostatními metodami porovnána nebo studie zabývající se atmosférickou depozicí dusíku a síry na saské straně Krušných hor (Zimmermann, et al., 2006).

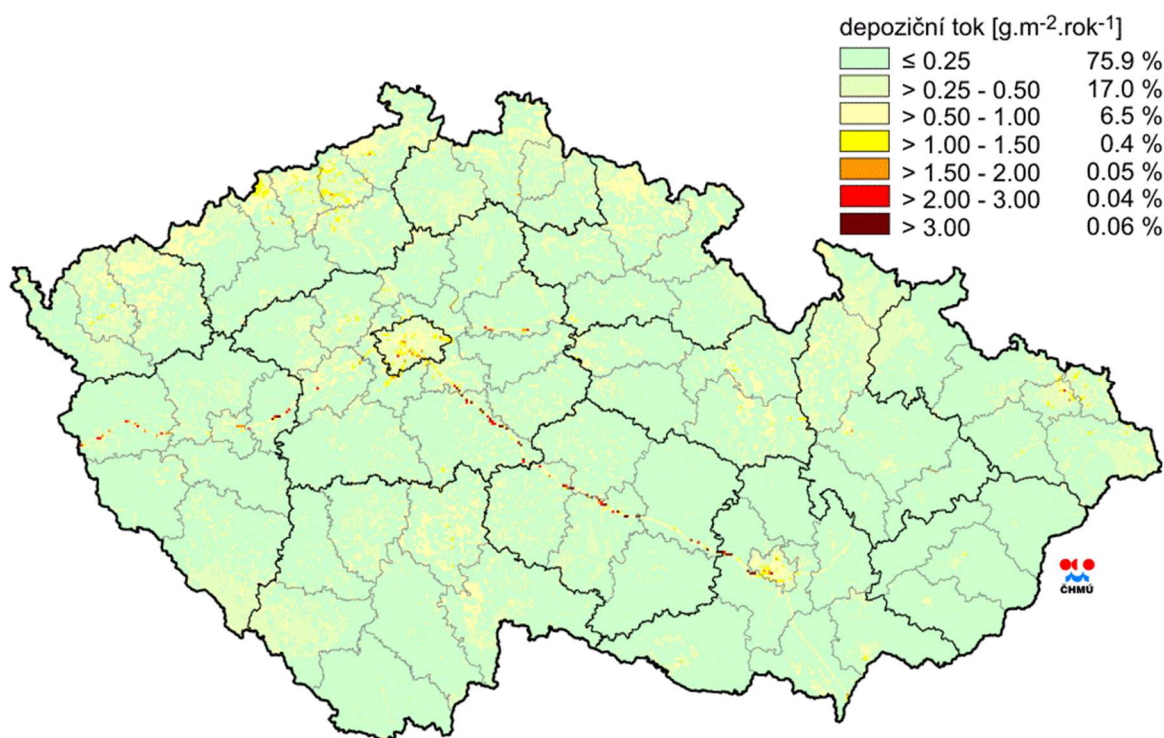
4.4.1 ČHMÚ

Mapy mokré depozice jsou konstruovány z pole koncentrací iontů NH_4^+ a NO_3^- ve srážkách (na základě průměrných ročních koncentrací vážených srážkovým úhrnem vypočtených z naměřených údajů) a z pole ročních srážkových úhrnů, které bylo vytvořeno na základě údajů ze 750 srážkoměrných stanic se zohledněním vlivu nadmořské výšky na množství srážek. Při konstrukci polí mokré depozice se na jednotlivých stanicích dává přednost výsledkům analýz čistých srážek před odběry srážek s prašným spadem (bulk), týdennímu intervalu odběru před měsíčním odběrem. Data ze sítí stanic, kde měření zajišťuje ČGS, VÚLHM a GIOS (Obr. 23), založených na měsíčních odběrech srážek s prašným spadem (bulk), jsou pro konstrukci map mokré depozice upravena empiricky získanými koeficienty vyjadřujícími poměr jednotlivých iontů ve vzorcích srážek typu wet-only a bulk (hodnoty pro jednotlivé ionty v rozmezí 0,74 pro NH_4^+ až 1,06 pro H^+) (ČHMÚ, 2016). Suchá depozice dusíku byla spočtena na základě polí průměrných ročních koncentrací NO_x pro Českou republiku a depozičních rychlostí $0,4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}/0,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro území s lesními porosty/území bezlesé.



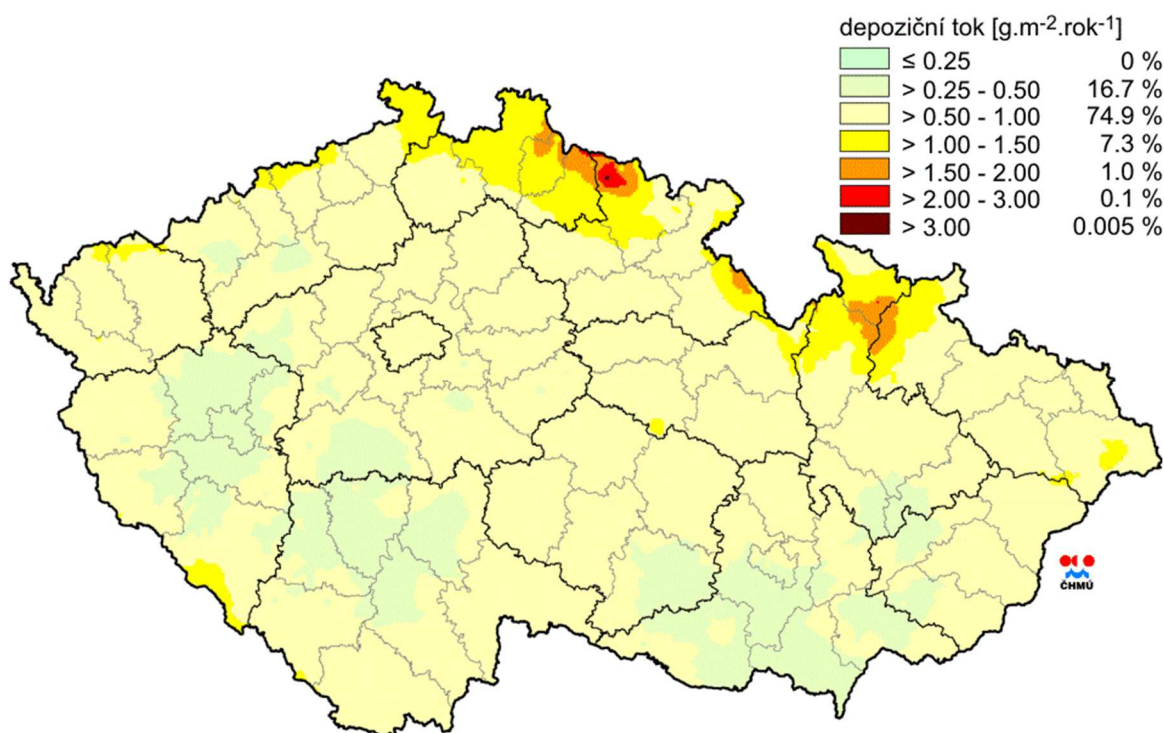
Obr. 23 Staniční síť sledování kvality atmosférických srážek a atmosférické depozice, 2008 (zdroj: ČHMÚ)

Výsledná depoziční mapa suché depozice $\text{NO}_x - \text{N}$ (Obr. 24) nabývá na téměř 76 % území hodnot nižších než 2,5 kg/ha/rok, vyšší hodnoty se vyskytují v městských aglomeracích Prahy Brna a Ostravy, Krušných horách a podél dopravně vytížených dálnic D1 a D5.



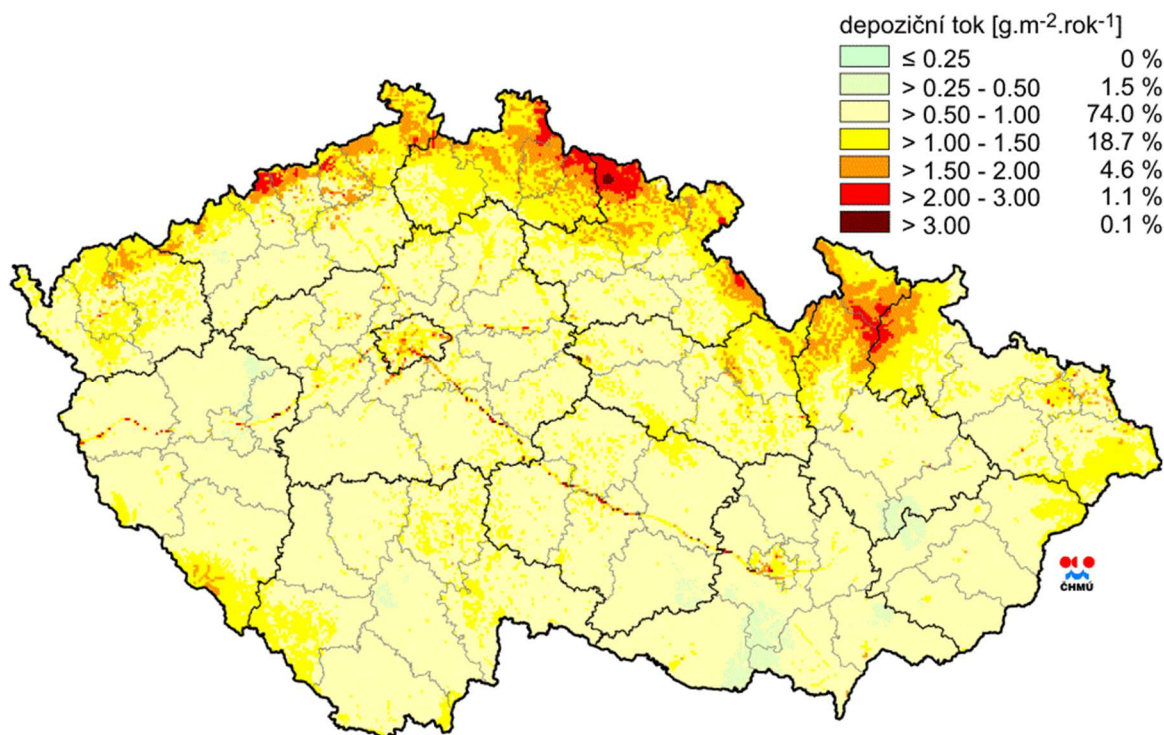
Obr. 24 Pole suché roční depozice dusíku ($\text{NO}_x - \text{N}$) 2008 (zdroj: ČHMÚ)

Mapa celkové roční mokré depozice dusíku (Obr. 25) nabývá na 75 % území hodnot v rozpětí od 5 do 10 kg/ha/rok. Vyšší depozice přes 10 kg/ha/rok jsou především v horských oblastech Jeseníků a Krkonoš.



Obr. 25 Pole celkové roční mokré depozice dusíku, 2008 (zdroj: ČHMÚ)

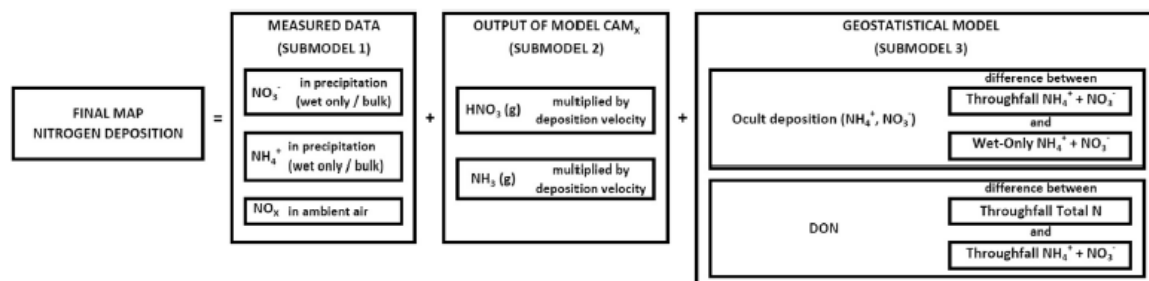
Sečtením map mokré a suché depozice byla vytvořena mapa celkové depozice (Obr. 26). Průměrné hodnoty na území ČR za rok 2008 jsou následující – TDN 8,8 kg/ha/rok, z toho mokrá depozice 6,8 kg/ha/rok a suchá depozice 2,0 kg/ha/rok (Tab. 8).



Obr. 26 Pole celkové roční depozice dusíku, 2008 (zdroj: ČHMÚ)

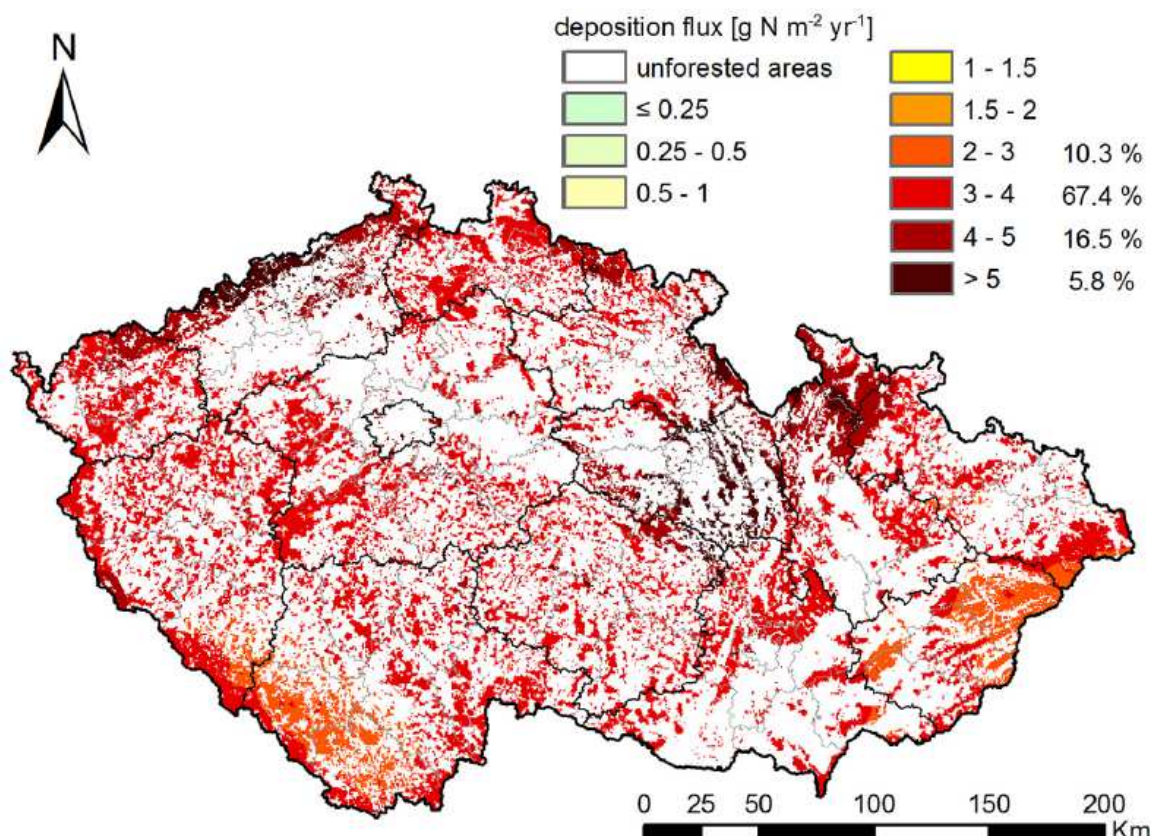
4.4.2 CAMx

Mokrá depozice byla počítána stejně jako v případě měření depozice ČHMÚ. Model se tedy liší dopočtem neměřené suché depozice. Pro výpočet suché depozice byl použit CAMx eulerovský fotochemický disperzní model spolu s regionálním předpovědním modelem počasí Aladin. Příspěvek mlhy a rozpuštěného organického dusíku (DON) byl odhadnut pomocí geostatistického modelu (Hůnová, et al., 2016).



Obr. 27 CAMx – schéma modelu atmosférické depozice dusíku (Hůnová, et al., 2016)

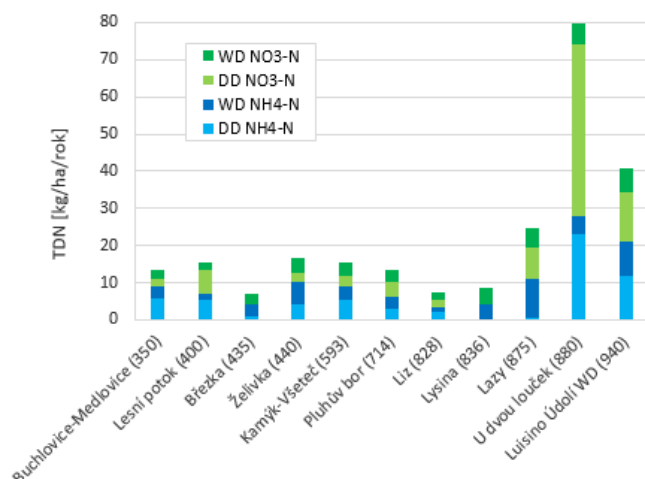
Výsledné hodnoty depozice ukazuje mapa (Obr. 28). Hodnoty celkové depozice dusíku se v téměř v 70 % pohybovaly v rozpětí 3 - 4 kg/ha/rok.



Obr. 28 Celková atmosférická depozice dusíku v lesích ČR, 2008 (zdroj: (Hůnová, et al., 2016).

4.4.3 Canopy budget model

Celková atmosférická depozice dusíku byla v roce 2008 měřena na 11 stanicích (Obr. 29). Průměr TDN 21,8 kg/ha/rok (Tab. 8) je nadprůměrný vůči celému období (2000-2015). Tento průměr zvyšují především stanice s vyšší nadmořskou výškou U dvou louček (880 m n. m.) a Luisino údolí (940 m n. m.). Hodnota celkové depozice na stanici U dvou louček v roce 2008 je absolutně nejvyšší TDN ze všech stanic za celé období (Tab. 7). Průměrný podíl jednotlivých složek depozice je následující – WD (NH₄ – N) 4,7 kg/ha/rok, WD (NO₃ – N) 3,8 kg/ha/rok, celková WD 8,5 kg/ha/rok, DD 13,4 kg/ha/rok (Tab. 8).



Obr. 29 Canopy budget model - depozice dusíku v roce 2008

Porovnáním všech tří metod stanovení celkové atmosférické depozice dusíku má nejnižší hodnoty TDN metoda ČHMÚ – 8,8 kg/ha/rok, následuje Canopy budget model – 21,8 kg/ha/rok a nejvyšší hodnoty má CAMx 30 - 40 kg/ha/rok (Obr. 28)- model CAMx nemá spočten průměr ČR).

Z porovnání za rok 2008 je patrná vysoká vzájemná odlišnost všech tří metod. Je třeba zdůraznit, že každá z výše zmíněných metod počítá TDN nejen jiným způsobem, ale i z jiných vstupních dat. Další zásadní rozdíl je ve vztahu modelů k území ČR. Modely ČHMÚ a CAMx jsou plošné modely, zatímco Canopy je průměrem malého počtu bodových údajů. Odlišnost je i v LandUse území - CAMx a Canopy jsou počítány pouze na území lesů, ČHMÚ počítá průměr depozice ze všech typů využití území.

4.4.4 Porovnání trendů ČHMÚ a Canopy budget modelu (2000-2015)

Výsledné průměrné hodnoty celkové depozice dusíku počítané Canopy Budget modelem a metodou ČHMÚ se poměrně liší (Tab. 8).

Tab. 8 Porovnání TDN počítané Canopy budget modelem a metodou dle ČHMÚ

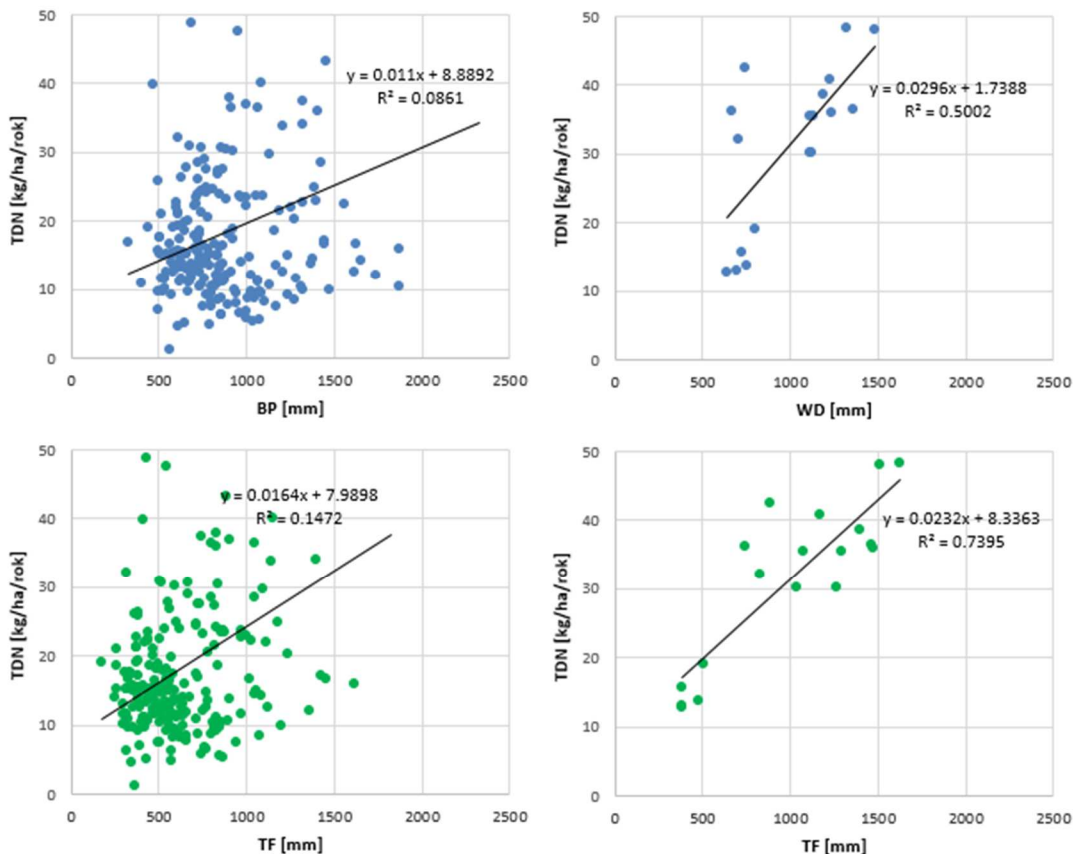
[kg/ha/rok] rok	Canopy Budget Model					ČHMÚ				
	WD NH4-N	WD NO3-N	DD	WD	TDN	WD NH4-N	WD NO3-N	DD	WD	TDN
2000	6,3	4,2	12,6	10,5	23,1	8,4		2,4	8,4	10,8
2001	7,0	6,0	10,9	13,0	23,9	8,9		2,1	8,9	11,0
2002	6,6	5,8	10,6	12,4	23,0	7,9		1,9	7,9	9,8
2003	5,1	4,4	21,5	9,6	31,1	6,8		2,2	6,8	9,0
2004	4,3	4,1	4,7	8,4	13,1	3,8	3,7	2,6	7,5	10,2
2005	5,0	4,2	6,8	9,1	16,0	4,1	3,5	2,3	7,6	9,9
2006	5,2	4,3	7,9	9,4	17,4	4,3	3,5	2,4	7,8	10,2
2007	5,5	4,7	7,3	10,2	17,6	3,8	3,4	1,8	7,2	9,0
2008	4,7	3,8	13,4	8,5	21,8	3,6	3,2	2,0	6,8	8,8
2009	5,4	5,2	11,4	10,6	22,0	4,3	3,8	2,6	8,1	10,7
2010	4,9	4,2	7,0	9,1	16,1	3,9	3,3	2,9	7,1	10,0
2011	4,5	3,0	9,1	7,6	16,6	3,0	2,2	3,0	5,2	8,2
2012	5,5	3,8	10,9	9,3	20,2	4,0	3,0	2,5	7,0	9,5
2013	5,7	3,8	7,2	9,6	16,8	3,5	2,7	2,7	6,2	8,8
2014	5,2	3,2	9,9	8,4	18,4	3,3	2,3	2,7	5,6	8,2
2015	5,3	3,8	9,4	9,0	18,5	3,2	2,3	2,5	5,5	8,0
<i>průměr</i>	5,4	4,2	9,9	9,7	19,5	3,7	3,1	2,4	7,1	9,5

Největší rozdíly jsou ve stanovení složky suché depozice, metoda ČHMÚ má průměr (2000-2015) 2,4 kg/ha/rok, zatímco Canopy model 9,9 kg/ha/rok. U suché složky je příčinou nízké depozice ČHMÚ především způsob měření depozice pouze z NO_x. Mokrá složka depozice je metodou ČHMÚ také nižší (7,1 kg/ha/rok) než u Canopy modelu (9,7 kg/ha/rok). Nižší hodnota mokré depozice je způsobena spíše jen výběrem stanic Canopy v místech s nadprůměrnou depozicí. Trendy celkové atmosférické depozice dusíku a síry v rámci Evropy se zabývá studie (Waldner, et al., 2014).

4.5 Vlivy meteorologických faktorů

4.5.1 Srážky

U srážek je patrný trend vyšších celkových depozic dusíku (TDN) s rostoucími srážkovými úhrny (Obr. 30). V případě měření TDN ze srážek typu bulk je tento trend téměř neprokazatelný ($R^2 = 0,09$). V případě podkorunových srážek (TF) je tento trend nepatrně vyšší ($R^2 = 0,15$). Porovnání je složeno z dat 19 stanic během období 2000-2015 a obsahuje tedy 221 datových bodů. Vlivem velkého počtu stanic, které mají vzájemně různé poměry mezi TDN a BP je tato závislost poněkud nevýrazná. Stanovení TDN z čistých srážek (WD) bylo dostupné na 2 stanicích, proto se skládá pouze z 19 datových bodů. Možná i díky výrazně menšímu vzorku dat je závislost rostoucí TDN s rostoucími srážkovými úhrny více patrná. V případě čistých srážek je tato závislost již prokazatelná ($R^2 = 0,50$), u podkorunových srážek je ještě více viditelná ($R^2 = 0,74$).



Obr. 30 Závislost srážek a celková depozice dusíku

4.5.2 Ostatní meteorologické faktory

Dalšími sledovanými meteorologickými veličinami byla teplota, měřená ve 2 m nad zemí (T2m - °C), intenzita slunečního záření (GLRD – W/m²), relativní vlhkost vzduchu (h - %) a průměrná rychlost větru (WV – m/s). Veličiny byly opět porovnávány z hlediska ročních průměrů stanic. Zmíněné doplňující meteorologické veličiny nebyly dostupné na všech stanicích, kde se stanovovala depozice dusíku. Z celkového počtu 21 stanic pro celkovou depozici dusíku byl na 10 stanicích sledován vliv meteorologických veličin.

Graf (Obr. 31) zobrazuje data ze všech 10 stanic kde byly měřeny meteorologické veličiny. Na každém grafu je zvýrazněn bod absolutního průměru TDN a příslušné meteorologické veličiny. Grafy jsou doplněny o regresní křivky druhého stupně. Křivky jsou matematicky vyjádřeny rovnicí a doplněny o koeficient spolehlivosti R^2 , který může nabývat hodnot od nuly do jedné. Hodnoty okolo nuly charakterizují nezávislost daných veličin, vyšší R^2 značí určitou závislost daných veličin, až $R^2 = 1$ znamená, že veličiny jsou závislé a křivka je přesným vyjádřením závislosti, neboť všechny body scatter plot grafu leží na této křivce.

V případě srážek bulk a throughfall mají regresní křivky rostoucí charakter. S rostoucími srážkovými úhrny roste i celková depozice dusíku. Pro srážky bulk na regresní křivce odpovídá srážkám přibližně 1000 mm depozice 20 kg/ha/rok, 1600 mm již depozice 30 kg/ha/rok. Analogicky srážkám throughfall 800 mm odpovídá depozice 20 kg/ha/rok, 1200 mm již depozice 30 kg/ha/rok. Tempo růstu depozice s rostoucími srážkami je tedy poměrně značné, ačkoliv je to vzhledem k poměrům a měřítkům vodorovné a svislé osy méně patrné z grafu. Velké vzdálenosti

jednotlivých bodů scatter plot grafu od aproximační křivky a samotný tvar „mračna“ bodů v grafu však značí, že jde o velmi slabé závislosti. Regresní křivky srážek bulk resp. throughfall mají R^2 roven 0,13 resp. 0,25.

Body grafu teploty a celkové depozice dusíku mají tvar trojúhelníku. Při nízkých průměrných ročních teplotách okolo 4 °C měla depozice dusíku velké rozpětí od 10 kg/ha/rok do téměř 50 kg/ha/rok. Naopak při nejvyšších průměrných ročních teplotách přes 10 °C nabývala depozice dusíku jen nízkých hodnot okolo 15 kg/ha/rok. Regresní křivka tedy odpovídá trendu klesající depozice dusíku s rostoucí průměrnou roční teplotou. Nicméně je tato závislost opět velmi slabá, $R^2 = 0,16$.

Graf vlivu intenzity slunečního záření (solární radiace) ukazuje, že v tato veličina na celkovou depozici dusíku nemá prakticky žádný vliv. Tvar regresní křivky nemá příliš vypovídající hodnotu, protože její $R^2 = 0,06$.

Obdobně se projevil i vliv relativní vlhkosti na celkovou depozici dusíku. S narůstající relativní vlhkostí sice roste nepatrně i celková depozice dusíku, ovšem $R^2 = 0,03$ regresní křivky značí, že regresní křivka neprokazuje žádnou závislost.

Poslední graf vlivu průměrné rychlosti větru na celkovou depozici dusíku ukazuje trend rostoucí depozice dusíku s rostoucí rychlostí větru. Regresní křivka však opět potvrzuje, že se jedná o velmi slabou závislost, neboť $R^2 = 0,14$.



Obr. 31 Závislost TDN na meteorologických faktorech

Grafy všech 10 stanic neprokázaly jasně patrnou závislost TDN na žádné z 6 meteorologických veličin. Každá z 10 stanic je však charakteristická svými podmínkami, která mají vliv na TDN. Zejména se jedná o nadmořskou výšku, průměrný úhrn srážek, samotný charakter lesního porostu – druh stromu, stáří a zdravotní stav porostu, geologický podklad, pedologie půdy atd. Různorodé podmínky mohou způsobit, že se závislosti ve společném grafu všech 10 stanic ztratí. V příloze jsou přiřazeny analogické grafy každé z 10 stanic, zobrazující vždy data jedné stanice. Grafy mají menší počet dat, z toho důvodu je regresní křivka pouze prvního stupně (lineární), protože při nízkém počtu dat má stupeň polynomu regresní křivky zásadní vliv na výslednou korelaci této křivky s daty. Z dat jednotlivých stanic byla vytvořen souhrn korelačních koeficientů (Tab. 9) udávající míru závislosti daných veličin. Záporné korelační koeficienty značí nepřímou úměrnost, kladné naopak přímou úměrnost. Čím je absolutní hodnota koeficientu blíží

1, tím je závislost prokazatelnější. Hodnoty korelačních koeficientů blízké 0 značí velmi slabé závislosti.

Tab. 9 Korelace meteorologických faktorů a atmosférické depozice

<i>Buchlovice-Medlovice</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	-0.08	1.00					
rain TF	0.03	0.91	1.00				
T2m	-0.30	-0.40	-0.45	1.00			
GLRD	-	-	-	-	1.00		
h	-0.24	0.25	0.35	-0.11	-	1.00	
WV	0.55	0.41	0.35	-0.15	-	-0.27	1.00

<i>Lesní potok</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	-0.38	1.00					
rain TF	-0.27	0.87	1.00				
T2m	0.47	-0.46	-0.40	1.00			
GLRD	0.45	-0.36	-0.34	0.82	1.00		
h	-0.50	0.40	0.67	-0.84	-0.54	1.00	
WV	-0.18	-0.19	-0.54	-0.05	-0.04	-0.35	1.00

<i>Červík</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	0.76	1.00					
rain TF	0.45	0.87	1.00				
T2m	0.03	-0.26	-0.59	1.00			
GLRD	-0.25	-0.03	0.02	-0.31	1.00		
h	0.22	-0.05	0.00	-0.25	-0.53	1.00	
WV	0.45	0.64	0.65	-0.34	0.73	-0.52	1.00

<i>Pluhův bor</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	0.12	1.00					
rain TF	0.04	0.96	1.00				
T2m	0.29	-0.40	-0.55	1.00			
GLRD	-0.20	-0.34	-0.49	0.47	1.00		
h	0.11	-0.18	-0.02	-0.57	-0.65	1.00	
WV	-0.30	0.54	0.36	0.13	0.52	-0.75	1.00

<i>Uhlířská</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	-0.62	1.00					
rain TF	-0.55	0.90	1.00				
T2m	0.62	-0.60	-0.66	1.00			
GLRD	0.31	0.09	-0.04	0.14	1.00		
h	0.40	-0.69	-0.48	0.63	-0.48	1.00	
WV	0.03	0.06	0.29	-0.21	-0.27	-0.10	1.00

<i>Jezeří</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	-0.25	1.00					
rain TF	0.19	0.82	1.00				
T2m	-0.03	-0.06	-0.26	1.00			
GLRD	0.21	-0.77	-0.53	0.26	1.00		
h	-0.37	0.26	0.26	-0.26	-0.23	1.00	
WV	-0.09	-0.16	-0.05	-0.18	0.52	0.01	1.00

<i>Lazy</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	0.39	1.00					
rain TF	-0.13	0.59	1.00				
T2m	0.01	-0.56	-0.77	1.00			
GLRD	0.18	-0.57	-0.32	0.54	1.00		
h	-0.22	0.58	0.15	-0.08	-0.34	1.00	
WV	-0.11	0.12	0.36	0.08	0.07	-0.21	1.00

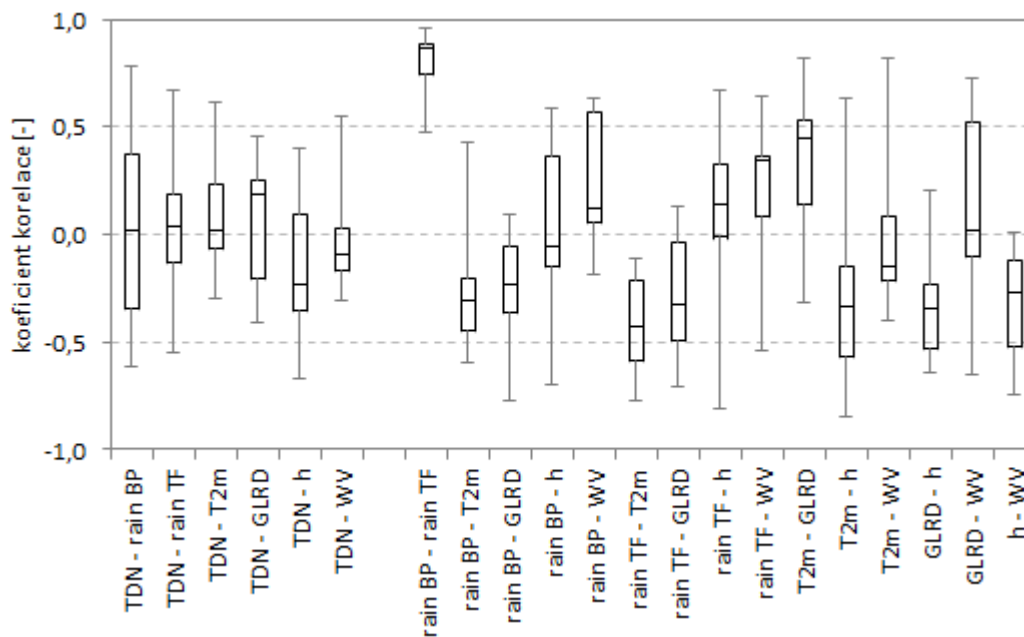
<i>U dvou louček</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	0.31	1.00					
rain TF	0.19	0.89	1.00				
T2m	-0.21	-0.19	-0.17	1.00			
GLRD	-0.41	-0.12	-0.30	0.59	1.00		
h	0.05	0.46	0.48	-0.54	0.20	1.00	
WV	-0.04	0.12	0.41	-0.40	-0.65	-0.12	1.00

<i>Luisino Údolí WD</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	0.79	1.00					
rain TF	0.67	0.72	1.00				
T2m	-0.07	-0.36	-0.11	1.00			
GLRD	0.19	-0.12	0.13	0.45	1.00		
h	-0.67	-0.65	-0.81	-0.41	0.02	1.00	
WV	-	-	-	-	-	-	1.00

<i>Modrý potok</i>	TDN	rain BP	rain TF	T2m	GLRD	h	WV
TDN	1.00						
rain BP	-0.61	1.00					
rain TF	-0.12	0.47	1.00				
T2m	0.05	0.43	-0.19	1.00			
GLRD	0.25	-0.36	-0.71	0.09	1.00		
h	-0.31	-0.05	0.12	-0.79	-0.33	1.00	
WV	-0.17	0.56	0.08	0.82	-0.03	-0.70	1.00

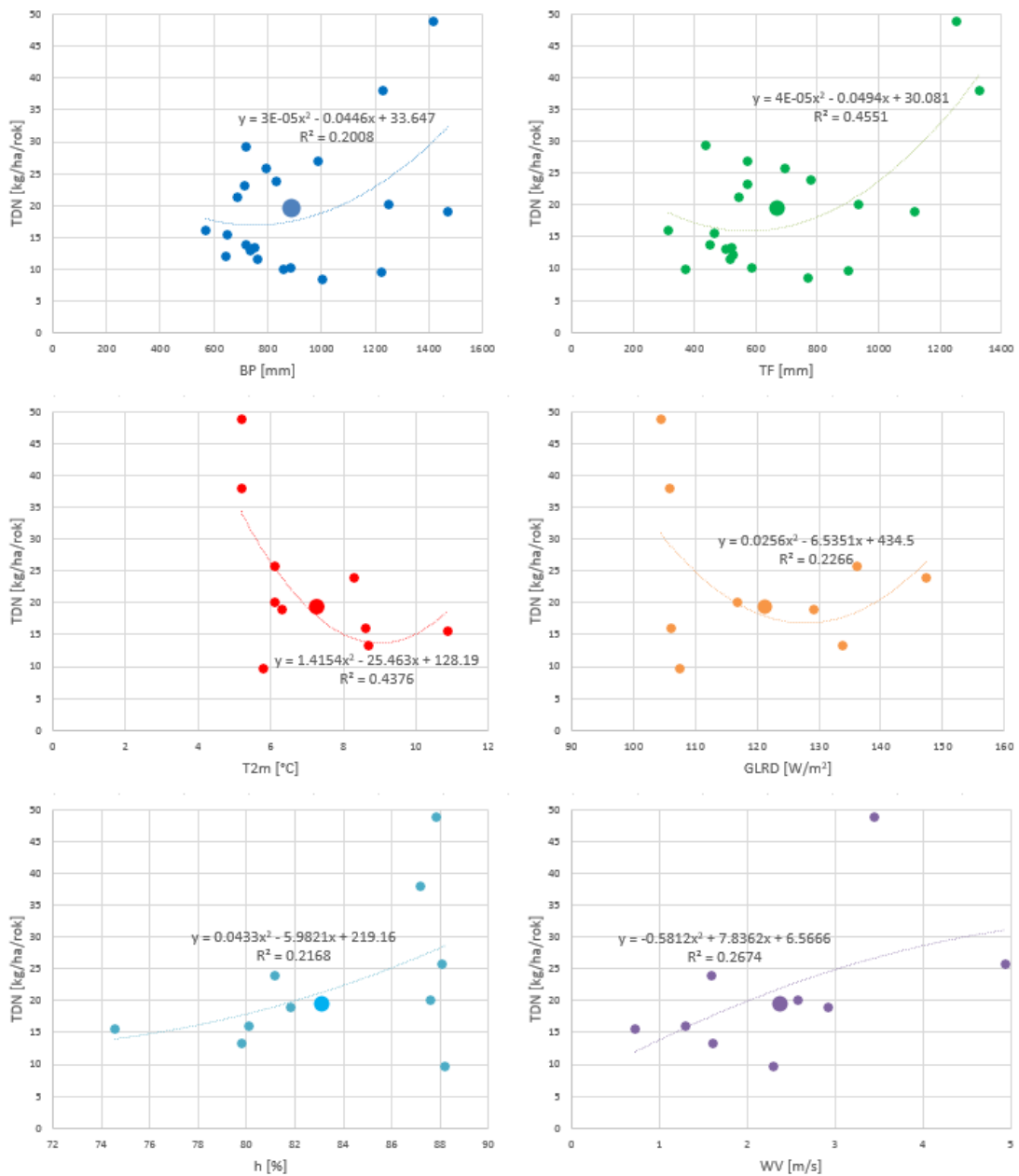
Souhrn korelací 10 stanic je zobrazen v box plot grafu (Obr. 32). Graf je sestaven z řady 10 stanic s meteorologickými údaji (Tab. 9). Z box plotu je patrné, že TDN není lineárně závislá na žádné z 6 meteorologických veličin. Mediány všech 6 veličin jsou blízké nule, zároveň nabývají horní a dolní kvantily hodnot s opačnými znaménky koeficientu, což značí rozdílnost mezi stanicemi a nízké maximální a minimální hodnoty korelačního koeficientu potvrzují, že téměř na žádné z 10 stanic nebyla jakákoliv lineární závislost příliš patrná. Výjimku tvořily stanice Červík a Luisino Údolí, které měly vysoké korelační koeficienty srážek bulk 0,76 resp. 0,79. Tato závislost je patrná z příložených grafů těchto stanic.

Patrná je zde spíše vzájemná závislost některých meteorologických veličin. Největší závislost je logicky mezi srážkami typu bulk a throughfall, kde je medián korelačního koeficientu 0,87. Dalšími veličinami s kladnou korelací jsou poměry srážek obou typů a větru nebo např. závislost teploty a slunečního záření. Zápornou korelaci mají potom srážky obou typů s teplotou a slunečním zářením nebo teplota a sluneční záření s relativní vlhkostí.



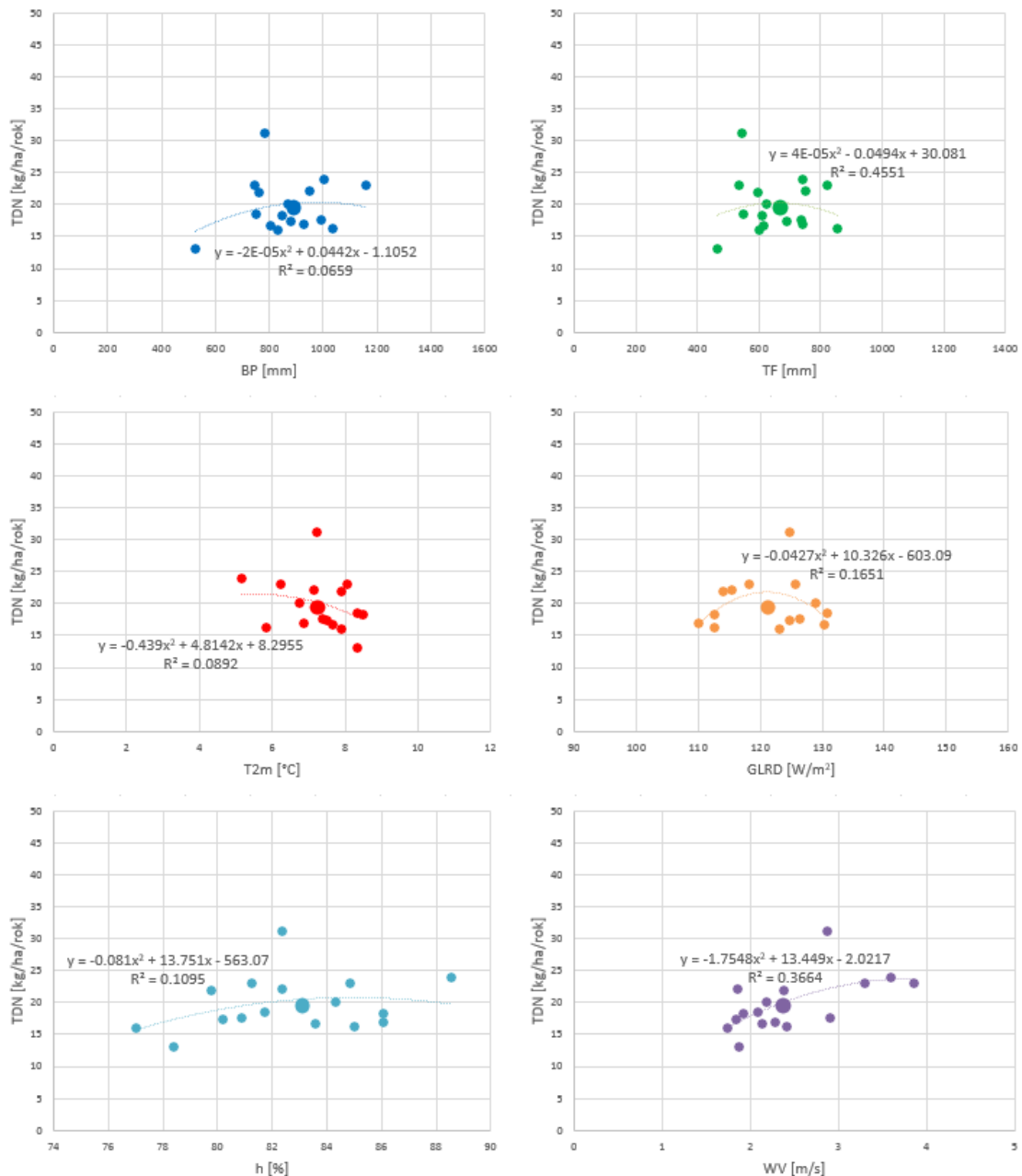
Obr. 32 Korelace met. veličin a TDN - rozptyly

Další grafy (Obr. 33) zobrazují průměry TDN a 6 meteorologických veličin (2000-2015) z jednotlivých stanic. Z rozmístění bodů grafů je patrné, že se stanice mezi sebou vzájemně velmi liší. Regresní křivky mají vlivem menšího počtu dat a průměrování vyšší R^2 , nicméně z hlediska posuzování závislostí mezi stanicemi nejsou příliš významné.



Obr. 33 Závislost TDN na meteorologických faktorech – průměry stanic (2000-2015)

Poslední srovnání z hlediska ročních průměrů všech 10 stanic ukazují grafy (Obr. 34). Body jednotlivých grafů jsou blízko sobě, výjimku tvoří z neznámých důvodů data relativní vlhkosti. Blízkost jednotlivých bodů v grafech vzhledem ročním průměrům ze všech stanic je předpokládaná a očekávaná.



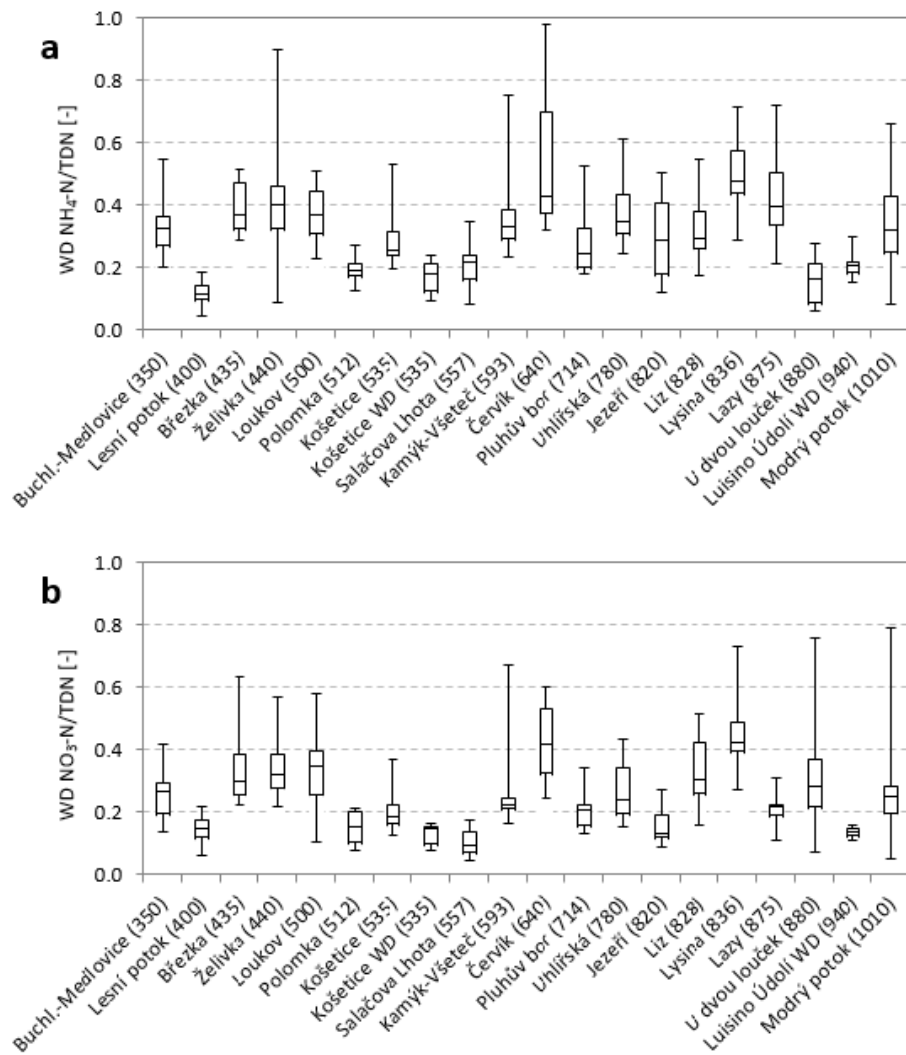
Obr. 34 Závislost TDN na meteorologických faktorech – roční průměry 10 stanic z období 2000-2015

4.6 Matematické modelování

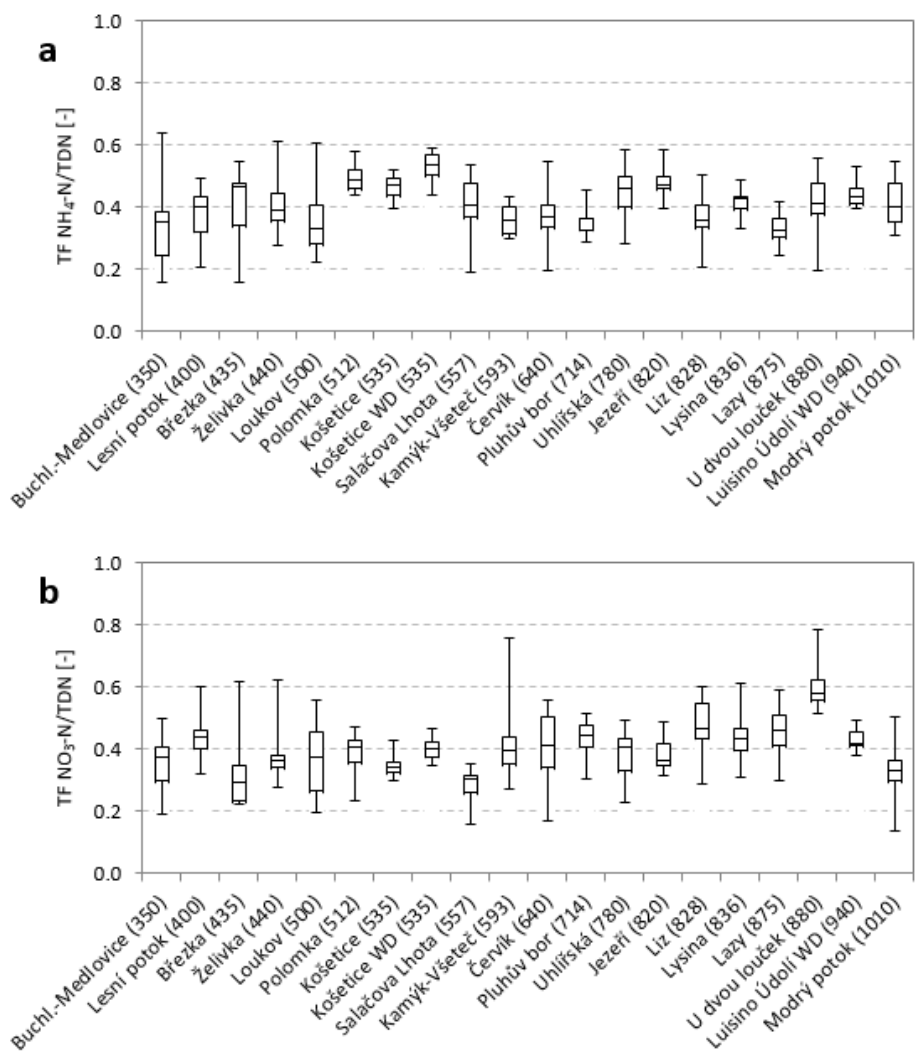
Cílem matematického modelování je zjistit a ověřit, zdali je možné z dat koncentrací a srážek přímo aproximovat celkovou depozici dusíku. Z vypočítaných TDN pomocí Canopy budget modelu známe průměrné podíly jednotlivých složek depozice na TDN (Obr. 17 a Obr. 20), z kterých se následně dopočítává TDN. Podíly složek depozice na TDN jsou pro každý rok a stanici různé. Následuje ověření přesnosti aproximace. Posuzování je prováděno z podílů mokré a throughfall depozice. Vždy zvlášť z depozic $\text{NH}_4\text{-N}$ a $\text{NO}_3\text{-N}$.

Pro výběr vhodných stanic má zásadní vliv poměr složek depozice v čase. Pokud je během jednotlivých let poměr složek TDN vyrovnaný, lze přepokládat vyšší úspěšnost aproximace modelu. Při větší variabilitě poměrů složek TDN bude přesnost modelu naopak nižší. Variabilitu

poměrů složek mokré depozice na TDN vystihují box plot grafy (Obr. 35), složek throughfall depozice analogicky grafy (Obr. 36).

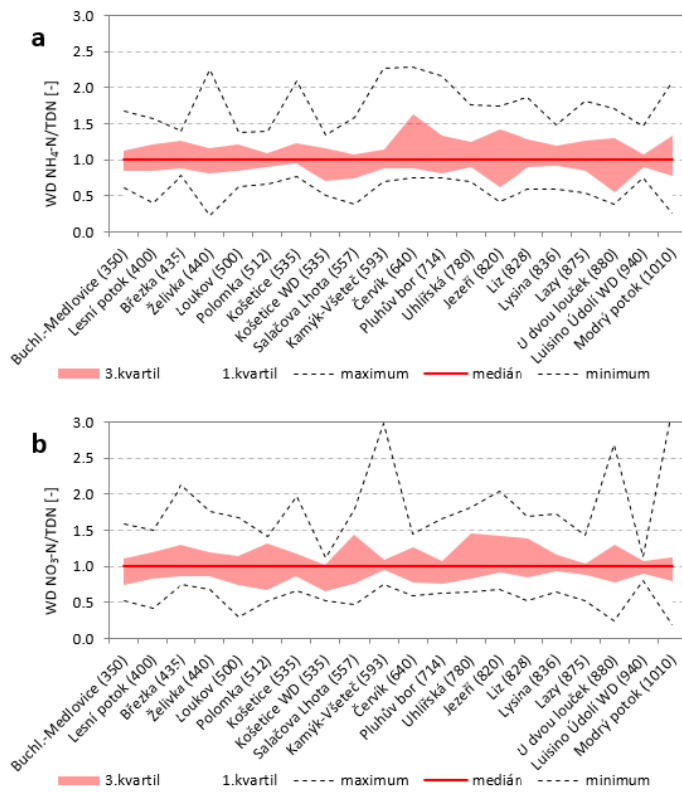


Obr. 35 Rozptyl poměrů mokré depozice na TDN – a) NH₄-N b) NO₃-N

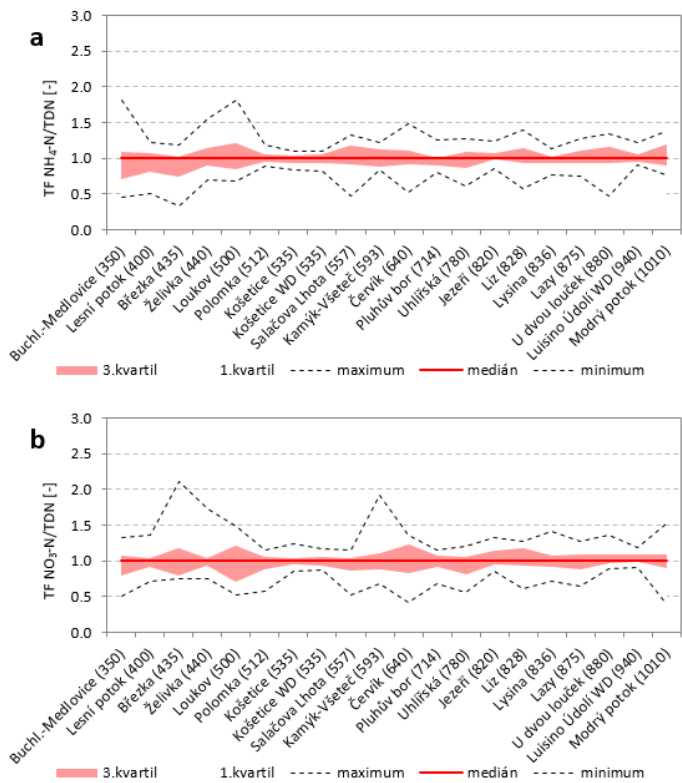


Obr. 36 Rozptyl poměrů throughfall depozice na TDN – a) NH₄-N b) NO₃-N

Z porovnání mokré a throughfall depozice je patrné, že nižší variabilitu má throughfall depozice a je tak vhodnější pro účely modelování TDN. Pro srovnání jsou v grafech (Obr. 37 a Obr. 38) znázorněny odchylky modelování obou případů depozic vůči vypočítané TDN.



Obr. 37 Rozptyl modelovaných TDN z mokré depozice vůči vypočítané TDN– a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_3\text{-N}$



Obr. 38 Rozptyl modelovaných TDN z throughfall depozice vůči vypočítané TDN– a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_3\text{-N}$

Tab. 10 Průměr odchylek stanic modelů TDN vůči vypočítané TDN

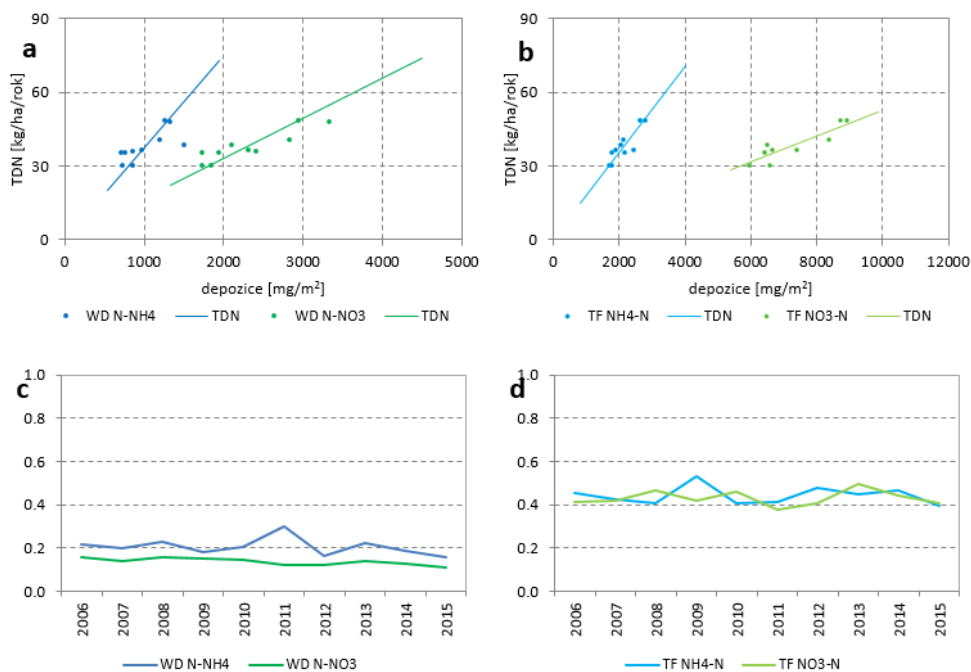
	minimum	1. kvartil	medián	3. kvartil	maximum
WD NH ₄ -N	0.57	0.83	1.00	1.24	1.77
WD NO ₃ -N	0.55	0.82	1.00	1.22	1.84
TF NH ₄ -N	0.68	0.89	1.00	1.10	1.33
TF NO ₃ -N	0.67	0.89	1.00	1.10	1.39

Souhrn (Tab. 10) udává průměr odchylek stanic modelu od skutečné hodnoty TDN. Z tabulky je zřejmá nevhodnost modelu mokré depozice pro stanovení TDN a zároveň v obou případech lepší výsledky NH₄-N. Nejlepší varianta pro modelování je throughfall depozice NH₄-N.

4.6.1 Modelování na vybraných stanicích

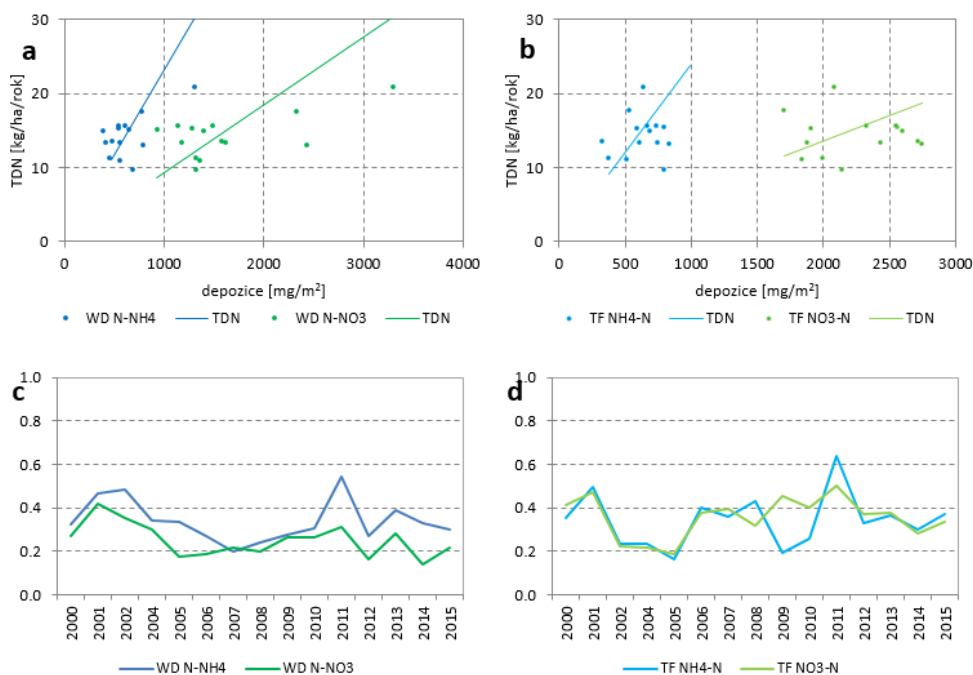
Nejmenší rozptyl podílů složek depozice na TDN (Obr. 35 a Obr. 36) vykazuje stanice Luisino údolí, velké rozptyly jsou naopak na stanicích Červík a U dvou louček a poslední stanicí vybranou k ověření modelování depozice je stanice Buchlovice-Medlovice. Srovnání bylo provedeno také pro hypotetickou stanicí nahrazující průměr všech stanic (Obr. 43).

- Luisino údolí



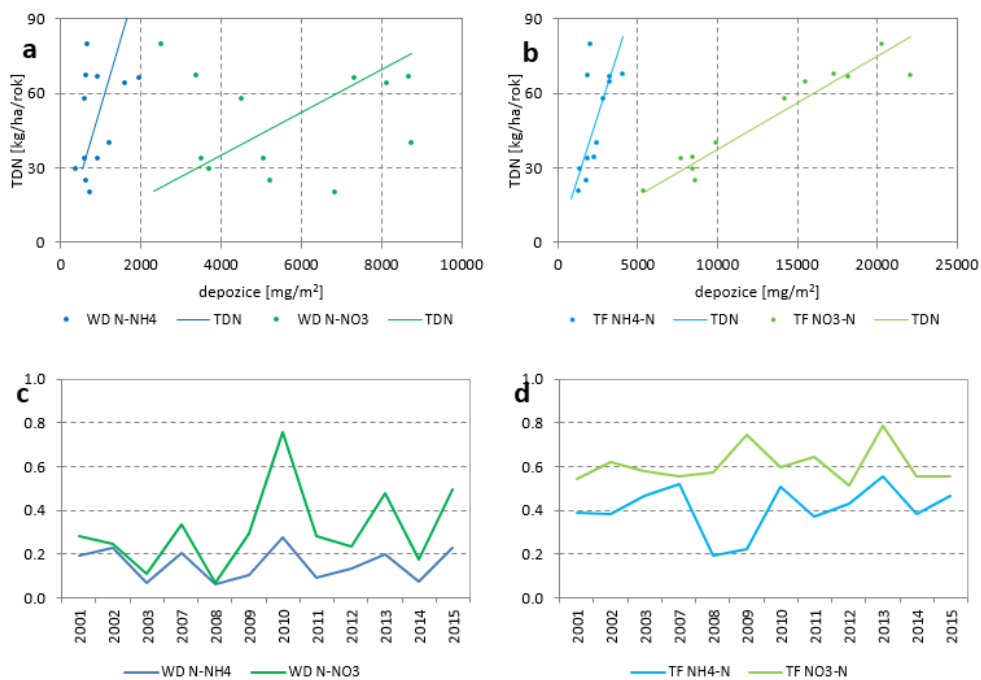
Obr. 39 Luisino údolí – modelování TDN pomocí depozice a) mokré b) throughfall c) poměr mokré depozice na TDN, d) poměr throughfall depozice na TDN

• Buchlovice-Medlovce



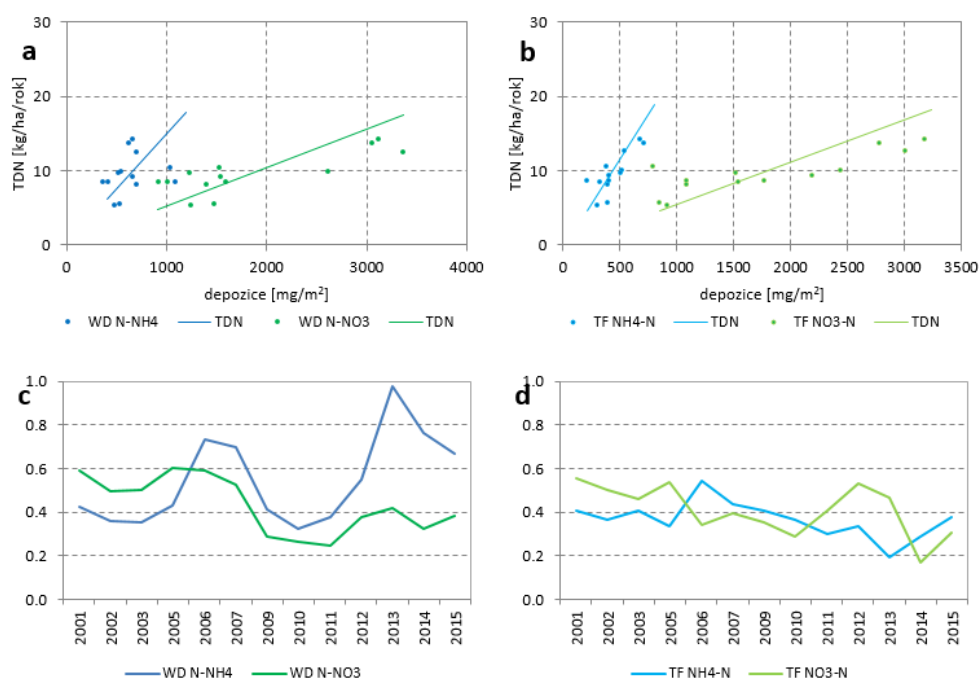
Obr. 40 Buchlovice-Medlovce – modelování TDN pomocí depozice a) mokré b) throughfall c) poměr mokré depozice na TDN, d) poměr throughfall depozice na TDN

• U dvou louček



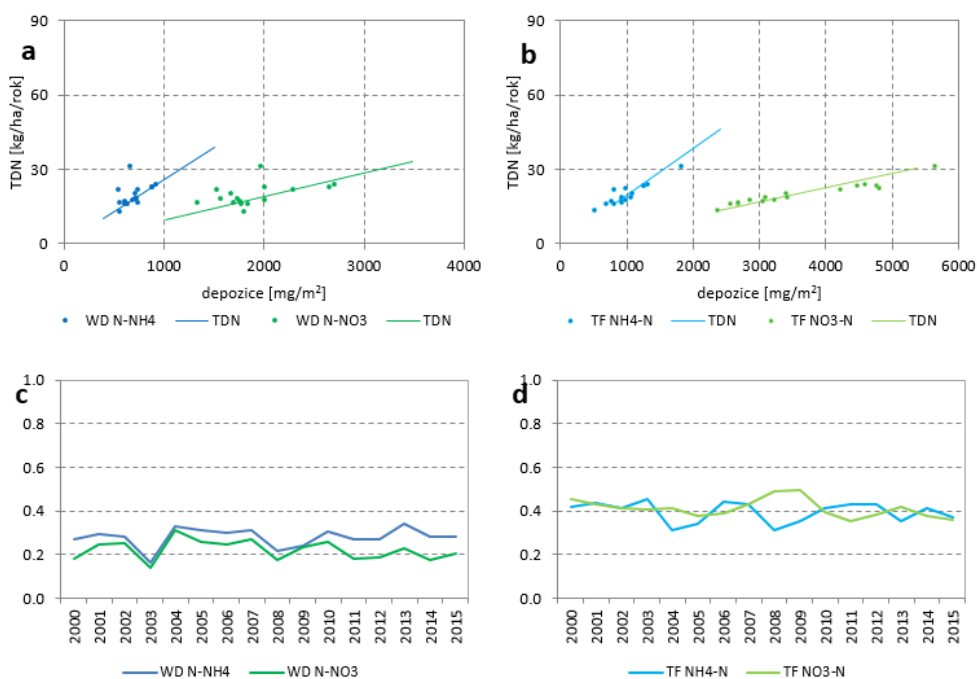
Obr. 41 U dvou louček– modelování TDN pomocí depozice a) mokré b) throughfall c) poměr mokré depozice na TDN, d) poměr throughfall depozice na TDN

• Červík



Obr. 42 Červík – modelování TDN pomocí depozice a) mokré b) throughfall c) poměr mokré depozice na TDN, d) poměr throughfall depozice na TDN

• Průměr stanic



Obr. 43 Průměr stanic – modelování TDN pomocí depozice a) mokré b) throughfall c) poměr mokré depozice na TDN, d) poměr throughfall depozice na TDN

Na grafech modelovaných stanic depozice je patrná nižší přesnost modelu mokré depozice proti throughfall depozici. Projevuje se ve větších vzdálenostech bodů grafu od modelové křivky. Závislost přesnosti modelu jednotlivých stanic dokládají podíly jednotlivých složek TDN. Modely stanic s vyrovnaným podílem složek depozice v čase přesnější – viz Luisino údolí.

Throughfall depozice je lepším parametrem vstupu modelu ze tří hlavních důvodů (1) podíl této složky depozice je vyrovnanější mezi stanicemi (Obr. 20), (2) zároveň má nižší variabilitu na jednotlivých stanicích (Obr. 36), (3) podíl složek throughfall na TDN je vyšší než u mokré depozice, tudíž se modelem throughfall dopočítává menší část depozice, což snižuje míru nejistoty.

5 Závěr

Po vypočítání složek depozice dusíku Canopy budget modelem bylo možné posuzovat vliv meteorologických faktorů na celkovou atmosférickou depozici dusíku. Posuzování probíhalo na úrovni ročních průměrů za období 2000-2015 na celkovém počtu 21 stanic pro srážkové úhrny, u 10 stanic i pro ostatní meteorologické veličiny. Posuzovanými meteorologickými faktory byly srážkové úhrny – typy bulk a throughfall, teplota, intenzita slunečního záření, relativní vlhkost a rychlost větru. Z výsledných grafů stanic (Obr. 44 - Obr. 53) vlivu jednotlivých meteorologických veličin není patrná žádná jasně prokazatelná závislost, které by se dala matematicky vyjádřit a zároveň byla prokazatelná na větším množství stanic. Nicméně se tím nepotvrzuje nezávislost vlivu meteorologických faktorů na atmosférickou depozici dusíku. Ze srovnání jednotlivých lokalit (Obr. 33) je patrná určitá slabě definovaná závislost vlivu teploty a srážek bulk na celkovou atmosférickou depozici dusíku. Rozdíly hodnot meteorologických veličin na jednotlivých stanicích plynou především z rozdílné polohy lokalit, kde velký vliv na chody meteorologických veličin a následně i depozici má nadmořská výška.

Cílem matematického modelování bylo zjistit, zdali je možné ze vstupních údajů jednotlivých složek depozice přímo modelovat celkovou depozici (bez použití Canopy budget modelu). Podíly složek depozice na jednotlivých stanicích vykazovaly příliš velký rozptyl v čase, který výrazně zvýšil nejistoty modelování a na většině stanic modelování velmi znehodnotil. Ze 4 různých složek depozice byla nejhodnější pro účely modelování celkové depozice dusíku throughfall depozice $\text{NH}_4 - \text{N}$. Vzhledem k algoritmickému výpočtu Canopy budget modelu je smysl modelování při dostupnosti všech 20 potřebných veličin poněkud zbytečný. Výhodou modelování je však možnost odhadnout Canopy TDN pouze ze 2 veličin s různě přijatelnou mírou nejistoty podle stanice. Modelování může mít smysl v případě neúplnosti dat. Pro dostatečné ověření funkčnosti modelování by bylo vhodné provést rozsáhlejší analýzu na větším množství dat.

Ze srovnání výpočtu celkové depozice dusíku Canopy budget modelem s metodou ČHMÚ jsou patrné velké rozdíly především v určení suché depozice dusíku. Výsledné hodnoty celkové depozice dusíku se dle ČHMÚ pohybují v průměru ČR kolem 10 kg/ha/rok, metodou Canopy okolo 20 kg/ha/rok a poslední metoda CAMx, která počítala depozici pouze v roce 2008 udává hodnoty depozice okolo 30 - 40 kg/ha/rok. Velmi rozdílné hodnoty všech tří metod plynou z rozdílného postupu výpočtu metod, u kterých se celková depozice dusíku skládá z různých složek – každá počítá trochu jinou veličinu. Metody se liší i v území, na kterém je depozice počítána. Velké rozdíly mezi metodou ČHMÚ a CAMx byly jedním z podnětů pro určení celkové depozice dusíku metodou Canopy budget modelu. Výsledné hodnoty depozice vypočtené Canopy budget modelem jsou vyšší než výsledky depozice ČHMÚ a zároveň nižší než výsledky depozice metody CAMx.

6 Seznam literatury

ADRIAENSSENS, S., STAELENS, J., BAETEN, L., VERSTRAETEN, A., BOECKX, P., et al., 2013. Influence of canopy budget model approaches. *Biogeochemistry*. Springer, (116), 215–229. DOI: 10.1007/s10533-013-9846-0.

AVILA, A., AQUILLAUME, L., IZQUIETA-ROJANO, S., GARCÍA-GÓMEZ, H., ELUSTONDO, D., et al., 2017. Quantitative study on nitrogen deposition and canopy retention. *Environmental Science and Pollution Research*. Springer. DOI: 10.1007/s11356-017-8861-4.

BEDNÁŘ, J., 1989. *Pozoruhodné jevy v atmosféře - Atmosférická optika, akustika a elektřina*. 1. Praha: Academia.

BRANIŠ, M. a HŮNOVÁ, I., 2009. *Atmosféra a klima aktuální otázky ochrany ovzduší*. 1. Praha: Karolinum.

BRIDGES, K., JICKELLS, T., DAVIES, T., ZEMAN, Z. a HŮNOVÁ, I., 2002. Aerosol, precipitation and cloud water observation on the Krusne Hory plateau adjacent to a Heavily industrialised valley. *Atmospheric Environment* 36, s. 353-360.

CLARKE, N., ZLINDRA, D., ULRICH, E., MOSELLO, R., DEROME, J., et al., 2010. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of*. Hamburg: UNECE, s. 7-10. Dostupné také z: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>

ČERNÝ, J., 1985. *Kyselá atmosférická depozice a její důsledky*. Sborník přednášek z pracovního semináře Praha - 16. dubna 1985 : stop acid rain. Praha: Ekologická sekce Československé biologické společnosti při ČSAV.

ČHMÚ, 2009. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2008*. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-86690-71-1.

ČHMÚ, 2015. *Historie znečištění a ochrany ovzduší*. Praha: ČHMÚ.

ČHMÚ, 2016. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2015*. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-60-8.

DRAAIJERS, G. a ERISMAN, J., 1995. A canopy budget model to assess atmospheric deposition from throughfall measurements. (85), s. 2253-2258.

DRAAIJERS, G., ERISMAN, J., LÖVBLAD, G., SPRANGER, T. a VEL, E., 1998. *Quality And Uncertainty Aspects of Forest Deposition Estimation Using Throughfall, Stemflow and Precipitation Measurements*. TNO-Report TNO-MEP R98/093.

EC-UN/ECE, 2001. *Intensive Monitoring of Forests Ecosystems in Europe*. Technical Report. Geneva.

FOWLER, D., COYLE, M., SKIBA, U., SUTTON, M. a CAPE, N., 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Biological Sciences*. London: Phil. Trans. R. Soc. B, (368). DOI: 10.1098/rstb.2013.0164.

- HEMERKA, J. a VYBÍRAL, P., 2010. *Ochrana ovzduší*. Praha: ČVUT.
- HOLOUBEK, I. a KOMÁREK, J., 1982. *Chemie životního prostředí*. rektorát UJEP.
- HŮNOVÁ, I., 2009. *Atmosférická depozice*. 1. Praha: Karolinum.
- HŮNOVÁ, I., 2016. *Atmosférická depozice dusíku*. Praha: *Chemické listy*, (110), s. 779-784.
- HŮNOVÁ, I. a JANOUŠKOVÁ, S., 2004. *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*. 1. Praha: Karolinum.
- HŮNOVÁ, I., KURFÜRST, P., VLČEK, O., STRÁNÍK, V., STOKLASOVÁ, P., et al., 2016. *Towards a better spacial quantification of nitrogen deposition - A case study for Czech forests*. *Environmental Pollution*. Elsevier, (213), s. 1028-1041.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013. *Climate change. USA: The physical science basis*. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- KURFÜRST, J., 1982. *Zdroje znečišťování ovzduší*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství.
- LAZARIDIS, M., 2011. *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Dordrecht: Springer. ISBN 978-94-007-0161-8.
- LINDBERG, S. a LOVETT, G., 1992. *Depositoin and forest canopy interactions of airborne sulfur: Results from the integrated forest study*. *Atmos. Environment*, (26), s. 1477-1492.
- MOLDAN, B. a HAK, T., 2011. *Central European Environmental History and the EU Accession*. *Environmental Science & Technology*. ACS Publications, (45), s. 3823-3828. DOI: 10.1021/es1037436.
- MOLDAN, B., 1977. *Geochemie atmosféry*. 1. Praha: Academica.
- MOLDAN, B., 1983. *Koloběh hmoty v přírodě*. 1. Praha: Academica.
- MOLDAN, B., 1985. *Kyselá atmosférická depozice a její důsledky*. Praha: Československé biologické společnosti při ČSAV.
- MOLDAN, B., 1991. *Atmospheric deposition*. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd.
- MOLDAN, B., 1992. *Atmosférická depozice na území Československa v letech 1976-1987*. 1. Praha: Český hydrometeorologický ústav.
- MOLDAN, B., 2009. *Globální aspekty ochrany atmosféry*. In: BRANIŠ, M., HŮNOVÁ, I., *Atmosféra a klima: Aktuální otázky ochrany ovzduší*, 2009, Praha: Karolinum, s. 325-337.
- NÁBĚLKOVÁ, J. a NEKOVÁŘOVÁ, J., 2010. *Chemie životního prostředí*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT.
- SKOK, L., 2003. *Počasí: zemská atmosféra, srážky, meteorologie, klimatická pásma, životní prostředí*. Praha: Fortuna Print.

STAELENS, J., HOULE, D., SCHRIJVER, A., NEIRYNCK, J., a VERHEYEN, K., 2008. Calculating Dry Deposition and Canopy Exchange with the Canopy Budget Model: Review of Assumptions and Application to Two Deciduous Forests. *Water Soil Pollution. Springer*, (191), s 149-169. DOI 10.1007/s11270-008-9614-2

SUTTON, M., MASON, K., SHEPPARD, L., SVERDRUP, H., HAEUBER R., et al., 2014. *Nitrogen deposition, critical loads and biodiversity*. Dordrecht: Springer Science & Business Media.

ŠANTROCH, J., 1985. *Sledování kvality srážek a mokré depozice*. Praha: Československé biologické společnosti při ČSAV.

THIMONIER, A., SCHMITT, M., WALDNER, P. a Beat RIHM, B., 2005. Atmospheric deposition on Swiss long-term forest ecosystems research (LWF) plots. *Environmental Monitoring and Assessment. Springer*, (104), s. 81-118. DOI: 10.1007/s10661-005-1605-9.

ULRICH, B., 1983. *Interaction of Forest Canopies with Atmospheric Constituents*. Dordrecht: Reidel, s. 33-45.

VIRTANEN, K. a HÄMEKOSKI, T., 1989. *Ochrana ovzduší (14)*. ICLEI: Centrum environmentálních analýz.

VYSOUDIL, M., 2002. *Ochrana ovzduší. 1. Olomouc: Univerzita Palackého*.

WALDNER, P., MARCHETTO, A., THIMONIER, A., SCHMITT, M. a ROGORA, M., 2014. Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic. *Atmospheric Environment. Elsevier*, (95), s. 363-374. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.054.

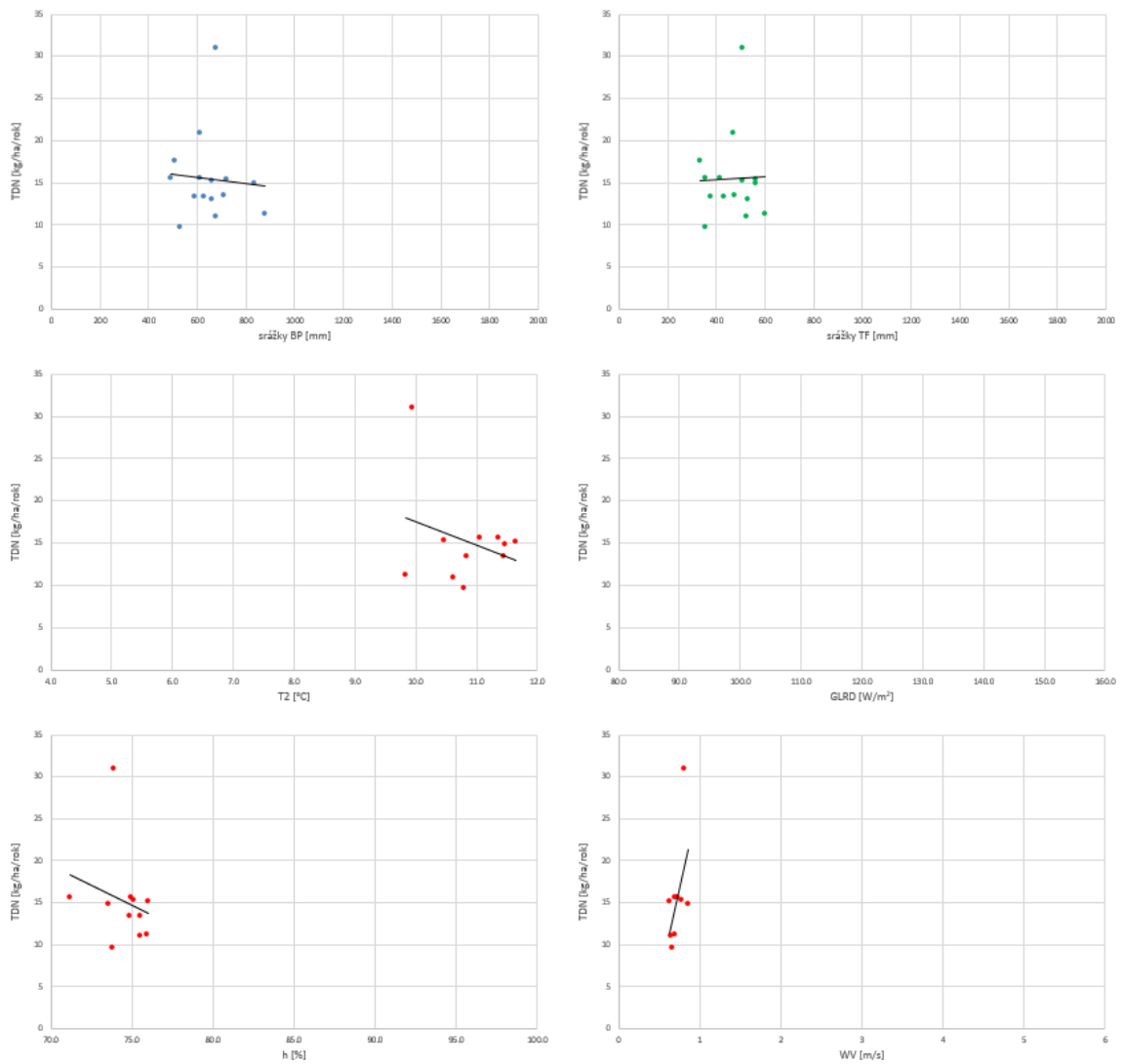
ZAPLETAL, M., 1998. Atmospheric deposition of nitrogen compounds in the Czech Republic. *Environmental Pollution. ELSEVIER*, (102), s. 305-311.

ZÁVODSKÝ, D., 1985. Meranie kyselej depozície. In: ČERNÝ J., *Sborník. Kyselá atmosférická depozice a její důsledky*. Praha: Československé biologické společnosti při ČSAV.

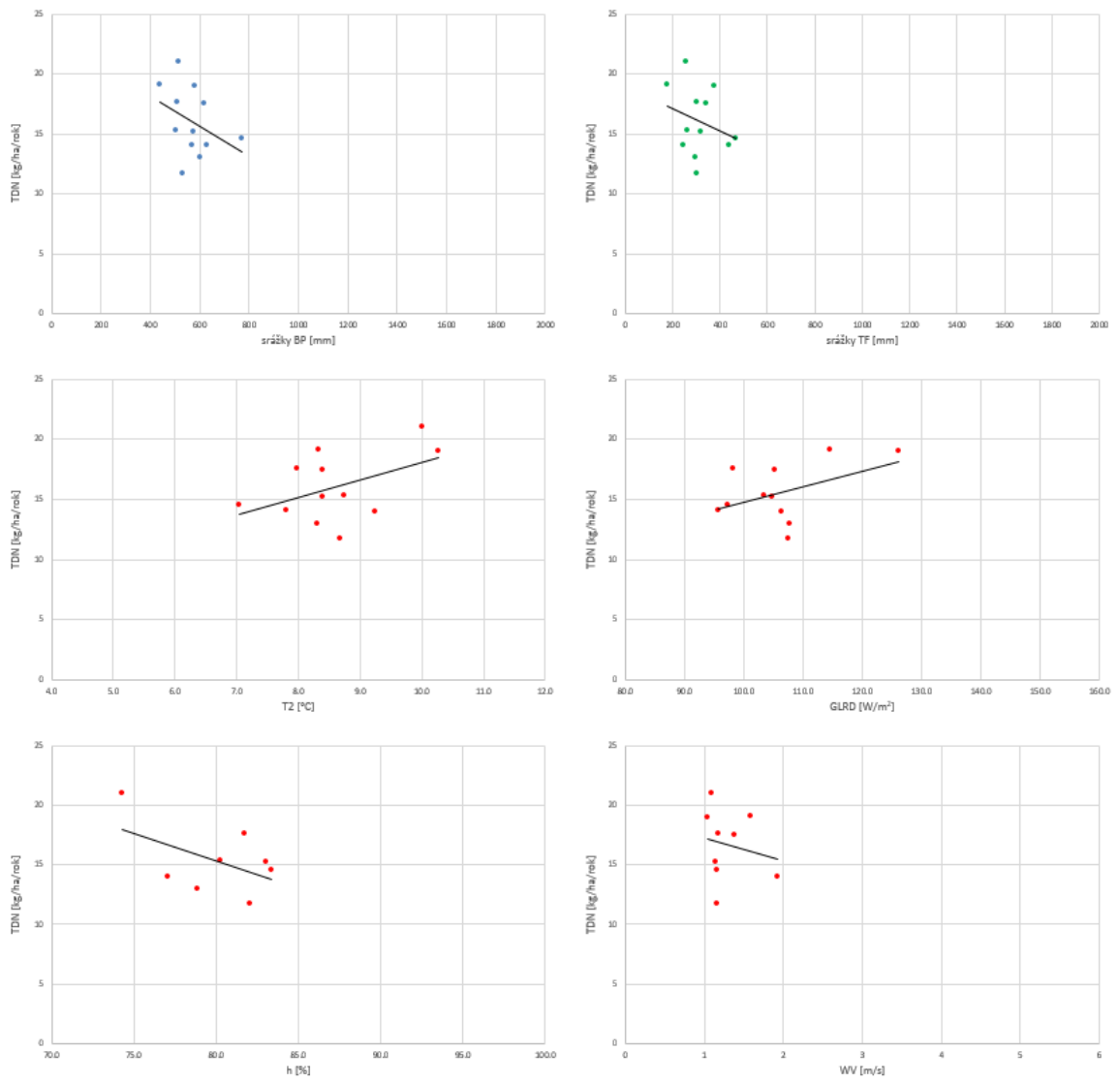
ZIMMERMANN, F., PLESSOW, K., QUECK, R., BERNHOFER, CH. a MATSSCHULLAT, J., 2006. Atmospheric N- and S-fluxes to a spruce forest-Comparison of inferential modelling and the throughfall method. *Atmospheric Environment. ELSEVIER*, (40), s. 4782-4796. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.056.

7 Přílohy

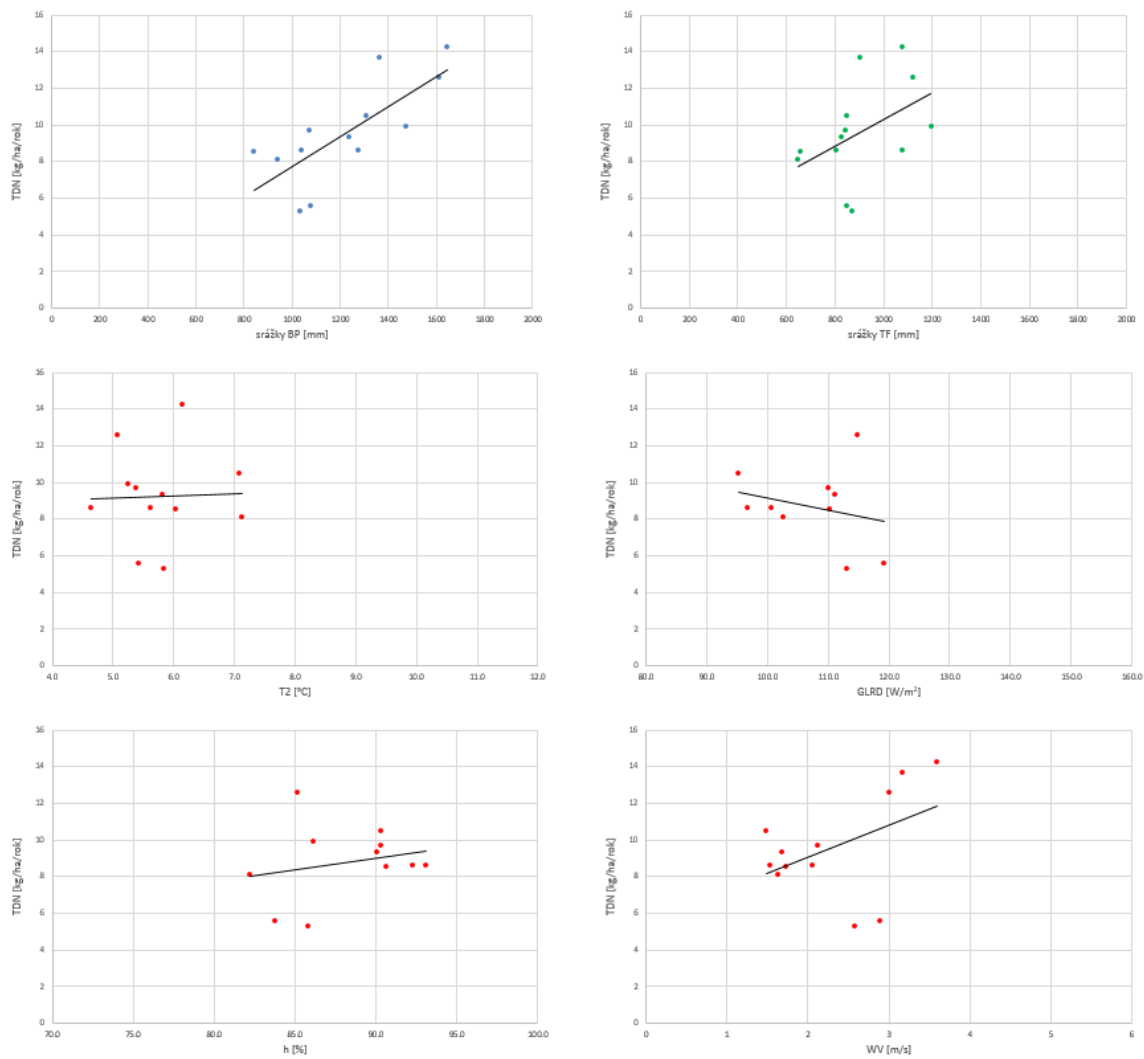
7.1 Grafy atmosférické depozice a meteorologických veličin



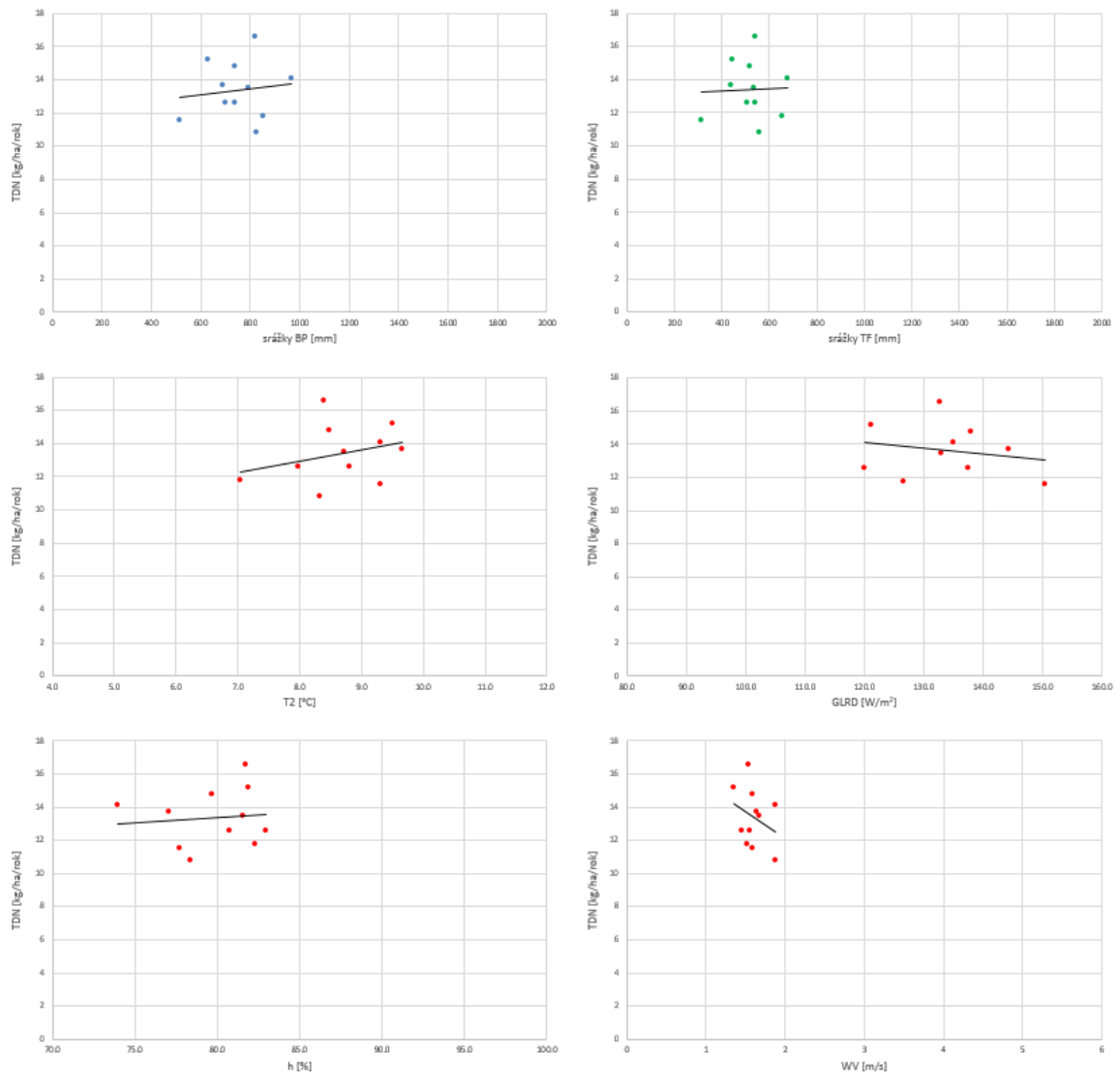
Obr. 44 Buchlovce-Medlovce - závislost TDN a meteorologických faktorů



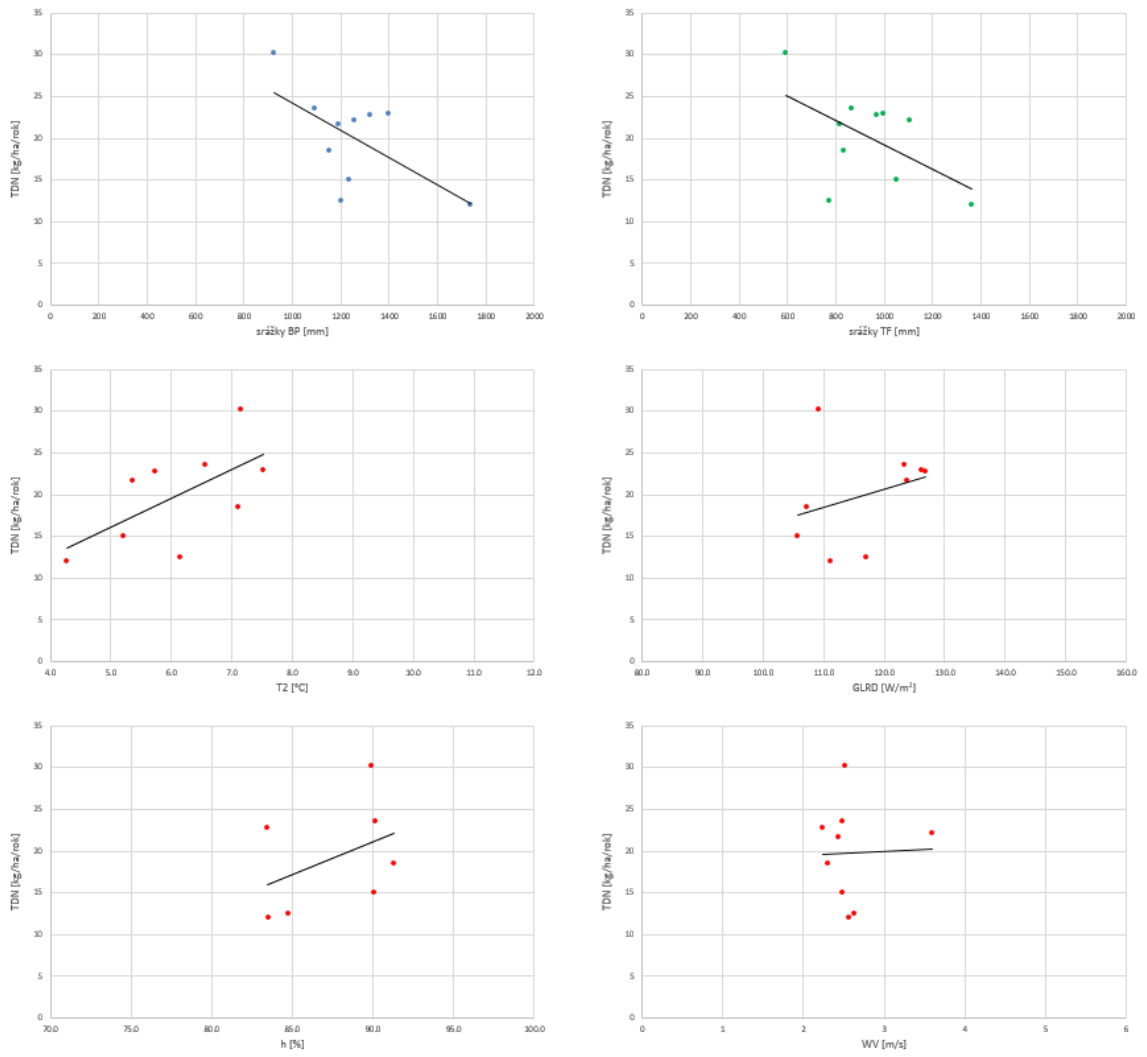
Obr. 45 Lesní potok - závislost TDN a meteorologických faktorů



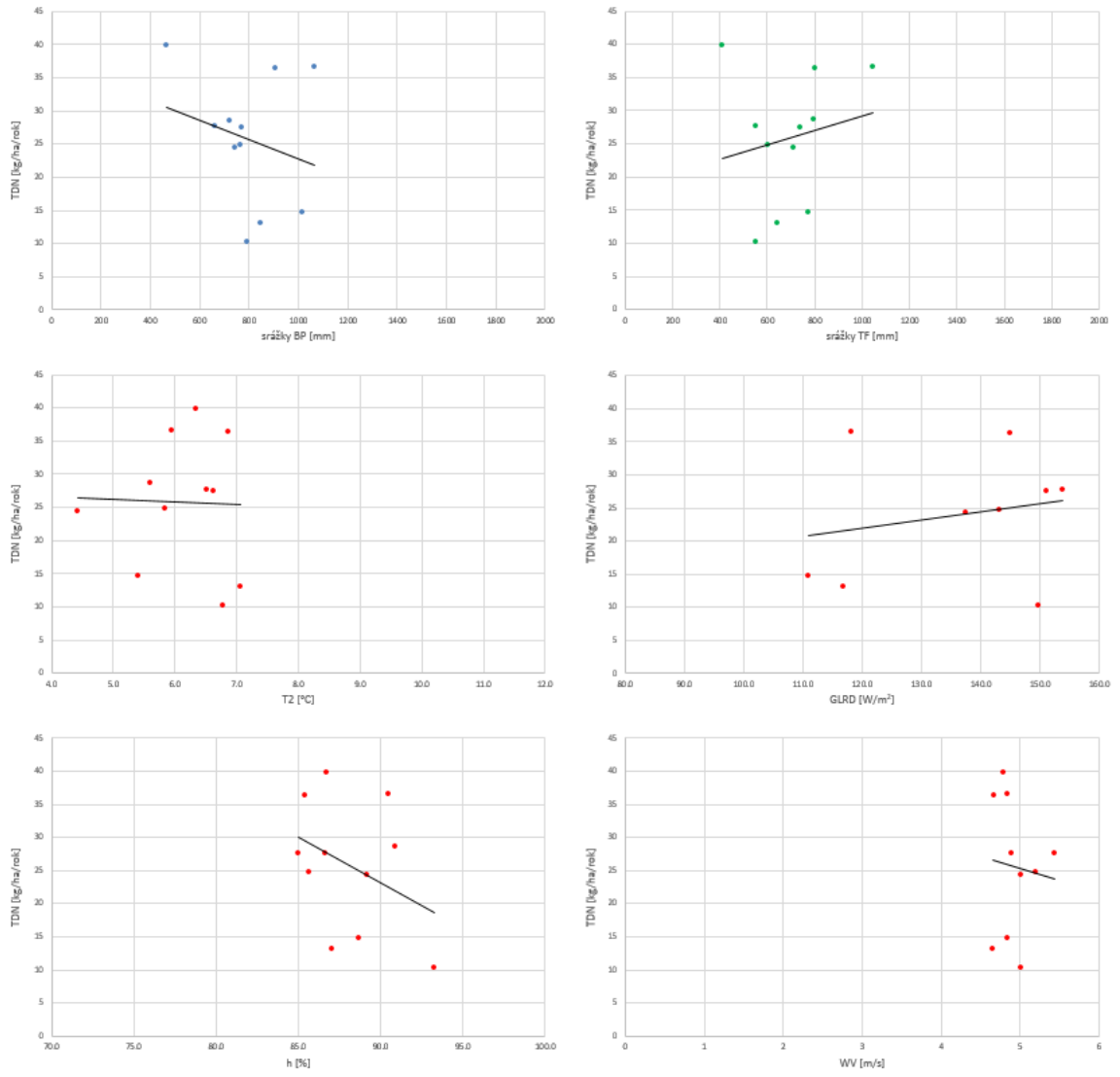
Obr. 46 Červík - závislost TDN a meteorologických faktorů



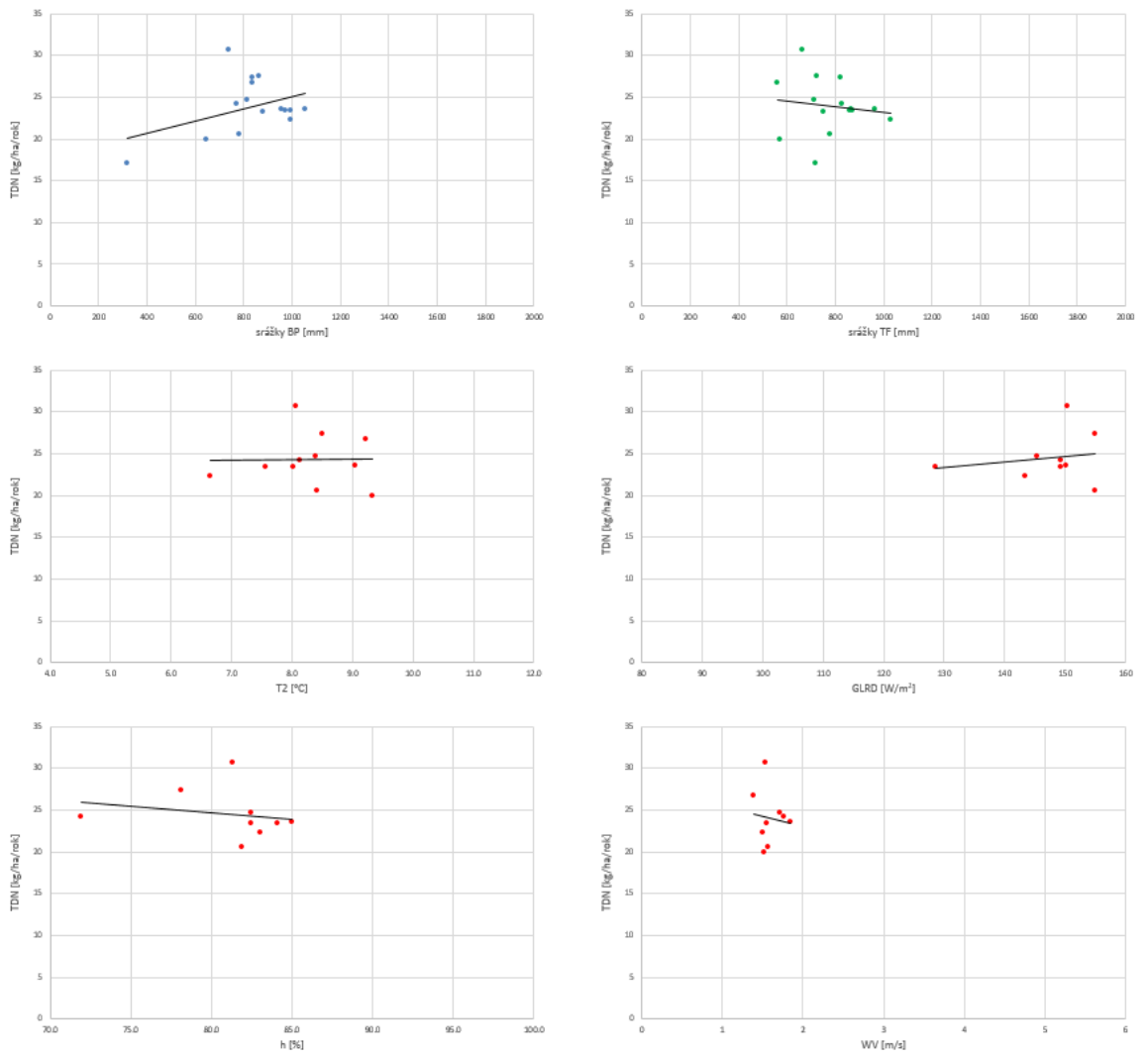
Obr. 47 Pluhův Bor - závislost TDN a meteorologických faktorů



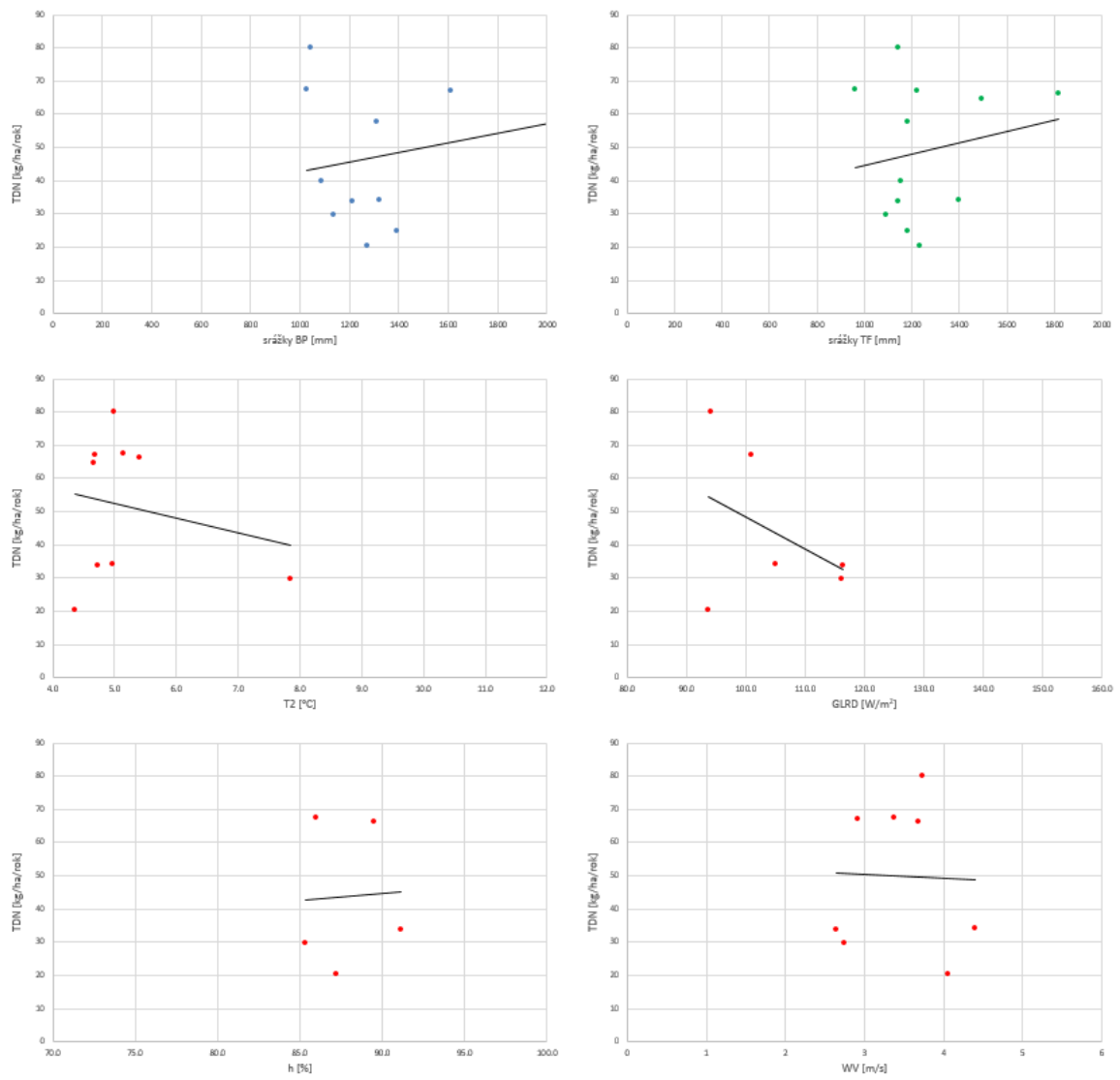
Obr. 48 Uhlířská - závislost TDN a meteorologických faktorů



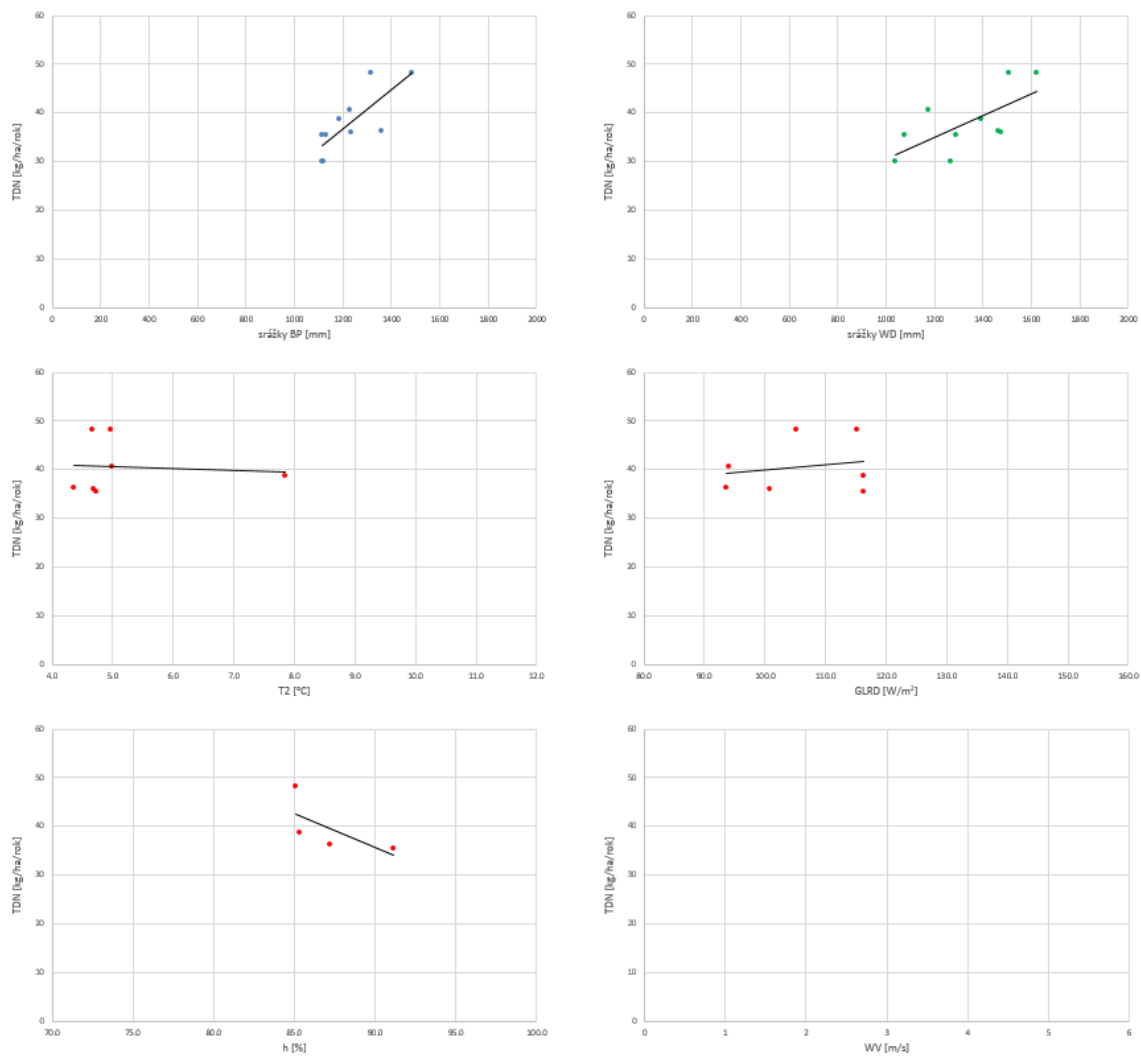
Obr. 49 Jezeří - závislost TDN a meteorologických faktorů



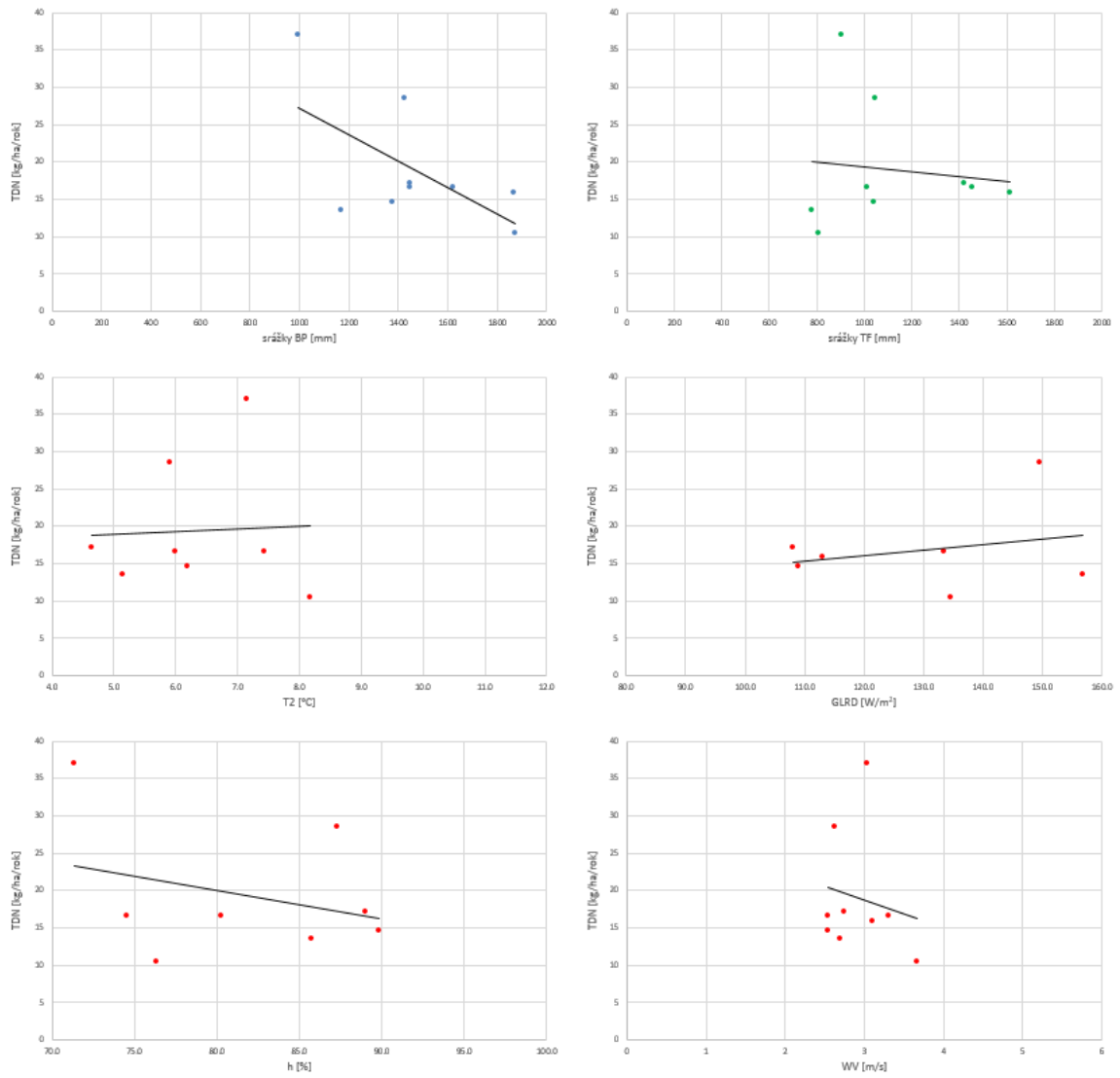
Obr. 50 Lazy - závislost TDN a meteorologických faktorů



Obr. 51 U dvou louček - závislost TDN a meteorologických faktorů



Obr. 52 Luisino údolí WD - závislost TDN a meteorologických faktorů



Obr. 53 Modrý potok - závislost TDN a meteorologických faktorů