

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Vybrané aktuální problémy spojené s kvalitou ovzduší

Štěpán Čermák

Bakalářská práce
2017

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Štěpán Čermák**
Osobní číslo: **C14017**
Studijní program: **B2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Ochrana životního prostředí**
Název tématu: **Vybrané aktuální problémy spojené s kvalitou ovzduší**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shromážděte informace k vybraným aktuálním problémům kvality ovzduší (např. ve vztahu k vybraným složkám, jejich formám, zdrojům, obsahu, vlivům, jejich regulaci apod.) a doplňte je citacemi.
2. Získané poznatky vyhodnoťte z pohledu vybraných souvislostí ve vztahu k problematice kvality a ochrany prostředí a zdraví.
3. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 "Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu" v platném znění.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Ladislav Novotný, DrSc.

Ústav environmentálního a chemického inženýrství

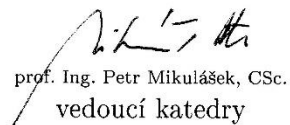
Datum zadání bakalářské práce: **2. února 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. července 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 2. února 2017

PROHLÁŠENÍ

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 29.6.2017

Štěpán Čermák

PODĚKOVÁNÍ:

Zvláštní poděkování patří mým rodičům za podporu ve studiu. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Ladislavu Novotnému, DrSc., Dr. za cenné rady a připomínky k práci.

ANOTACE

Práce je zaměřena na vybrané aktuální problémy spojené s kvalitou ovzduší, především na znečištění suspedovanými částicemi, oxidy dusíku a troposférickým ozonem. Popsán je jejich vliv na lidské zdraví a životní prostředí, zdroje nebo vznik. Dále je popsán vývoj koncentrací na území České republiky. Uvedeny jsou i metody, pomocí kterých se měří množství těchto látek v ovzduší na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu. Je uveden legislativní rámec týkající se problematiky těchto znečišťujících látek.

KLÍČOVÁ SLOVA

suspendované částice, oxidy dusíku, troposférický ozon, znečištění ovzduší

TITLE

Selected Up-to-date Problems Connected with Air Quality

ANNOTATION

The work was focused on the selected up-to-date problems connected with air quality especially with respect to the pollution due to the presence of suspended particles, nitrogen oxides and tropospheric ozone. The amount of air pollutants, the sources and effects on the environment and human health, continual monitoring, the valid legislation and reports of the Czech Hydrometeorological Institute especially as to Czech Republic was discussed

KEYWORDS

suspended particles, nitrogen oxides, tropospheric ozone, air pollution

OBSAH

0	Úvod.....	12
1	Legislativa v ochraně ovzduší a imisní limity pro vybrané znečišťující látky	13
2	Suspendované částice	15
2.1	Definice a dělení suspendovaných částic	15
2.2	Zdroje suspendovaných částic.....	16
2.3	Metody měření suspendovaných částic na stanicích ČHMÚ.....	19
2.4	Vliv suspendovaných částic na lidské zdraví.....	20
2.5	Vliv suspendovaných částic na životní prostředí.....	22
2.6	Vývoj koncentrací suspendovaných částic PM ₁₀ a PM _{2,5}	24
2.6.1	Vývoj koncentrací suspendovaných částic PM ₁₀ a PM _{2,5} v období 1990-2015	24
2.6.2	Znečištění ovzduší suspendovanými částicemi v roce 2015	25
3	Oxidy dusíku.....	29
3.1	Zdroje NO _x	29
3.2	Metody měření NO _x na stanicích ČHMÚ	30
3.3	Vliv NO _x na lidské zdraví	30
3.4	Vliv NO _x na životní prostředí	32
3.4.1	Příznaky poškození a účinky na růst.....	32
3.4.2	Mechanismus působení NO ₂	32
3.5	Vývoj koncentrací NO _x na území ČR	33
4	Troposferický Ozon	39
4.1	Vznik troposférického ozonu	39
4.2	Měření troposférického ozonu na stanicích ČHMÚ	40
4.3	Vliv troposférického ozonu na lidské zdraví	41
4.3.1	Účinky troposférického ozonu na biochemické úrovni	41

4.3.2	Akutní expozice	42
4.3.3	Chronická expozice.....	43
4.4	Vliv troposférického ozonu na životní prostředí.....	44
4.4.1	Vliv ozonu na vegetaci	44
4.5	Vývoj koncentrací troposférického ozonu na území ČR	46
4.5.1	Vývoj koncentrací troposférického ozonu za období 2000-2015	46
4.5.2	Koncentrace troposférického ozonu v roce 2015	47
5	Závěr	49
6	Použitá literatura	52

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

OBRÁZKY

Obr. 1: Procentuální rozdělení zdrojů emisí PM ₁₀ v roce 2014 [12].	18
Obr. 2: Procentuální rozdělení zdrojů emisí PM _{2,5} v roce 2014 [12].	18
Obr. 3: Princip analyzátoru využívajícího absorpce beta-záření [13].	20
Obr. 4: Trendy ročních charakteristik PM ₁₀ v ČR v období 2000-2015 [12].	24
Obr. 5: Pole 36. nejvyšší 24hodinové koncentrace PM ₁₀ v roce 2015 [12].	25
Obr. 6: Pole roční průměrné koncentrace PM ₁₀ v roce 2015 [12].	26
Obr. 7: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací PM ₁₀ v roce 2015 [12].	27
Obr. 8: Pole roční průměrné koncentrace PM _{2,5} v roce 2015 [12].	28
Obr. 9: Roční průběh průměrných koncentrací PM _{2,5} v roce 2015 [12].	28
Obr. 10: Historický vývoj emise NO _x v kt (a) a měřené emise NO _x v mmol.m-2.rok-1 (b) na území dnešní České republiky [22].	34
Obr. 11: Trendy ročních charakteristik NO ₂ a NO _x v České republice v období 2000-2015 [23].	36
Obr. 12: Trendy ročních charakteristik NO ₂ v období 2000-2015 na městských a předměstských stanicích v aglomeracích [23].	36
Obr. 13: Pole roční průměrné koncentrace NO ₂ z roku 2015 [23].	37
Obr. 14: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací NO ₂ (průměry pro daný typ stanice) v roce 2015 [23].	38
Obr. 15: Vstup ozonu průduchem do listu [40].	45
Obr. 16: Trendy ročních charakteristik troposférického ozonu v ČR v období 2000-2015 [28].	47
Obr. 17: Pole 26. největšího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního ozonu v průměru za 3 roky (2013-2015) [28].	48
Obr. 18: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací max. 8hod. klouzavého průměru O ₃ pro rok 2015 [28].	48

TABULKY

Tab. 1: Imisní limity (LV) pro ochranu zdraví dle zákona č. 201/2012 Sb. a vyhlášky č. 330/2012 Sb [2] [3].....	13
Tab. 2: Imisní limity pro ochranu ekosystému a vegetace dle zákona č. 201/2012 Sb. a vyhlášky č. 330/2012 Sb. [2] [3].....	14
Tab. 3: Vliv změn pH na stomatální chování a fotosyntézu [17].	23
Tab. 4: Historický vývoj emisí NO _x v kt na území dnešní České republiky [22].	35

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

NO _x	Oxidy dusíku
PM ₁₀	Částice o velikosti aerodynamického průměru menšího nebo rovného než 10 μm
PM _{2,5}	Částice o velikosti aerodynamického průměru menšího nebo rovného než 2,5 μm
SMP	Suspendované částice
EKG	Elektrokardiogram
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
BAT	Nejlepší dostupné technologie
O/K/F-M	Aglomerace Ostrava/Karviná/Frýdek-Místek
WHO	Světová zdravotnická organizace
NiR	Nitritreduktáza
NaR	Nitrátová reduktáza
ATP	Adenosintrifosfát
VOCs	Těkavé organické látky
UV	Ultrafialové záření
LV	Mezní hodnota

0 ÚVOD

Znečišťování ovzduší je závažný a aktuální problém, který je nutné řešit z hlediska ochrany životního prostředí. Znečištěné ovzduší nepříznivě ovlivňuje všechny živé organismy, které se v něm vyskytují. U vegetace růst, vývoj a například také fotosyntézu nebo hospodářské výnosy plodin. U živočichů jejich zdravotní stav, vývoj ale také například délku jejich života.

Znečištěné ovzduší má tedy celou řadu negativních důsledků i z ekonomického hlediska, např. vyšší náklady na zdravotní péči nebo zhoršující se ekonomické výsledky ze zemědělské činnosti. Proto má smysl zabývat se zdroji znečištění a jejich omezováním.

Zdroje znečišťování ovzduší mohou být přírodního nebo antropogenního původu. Mezi přírodní zdroje patří například sopečná činnost, lesní požáry apod. Antropogenní zdroje souvisejí s lidskou činností (zemědělství, průmysl, doprava atd.). Dále můžeme dělit zdroje znečišťujících látek podle vzniku na primární (vstup znečišťujících látek do ovzduší přímo ze zdroje) nebo sekundární (vznik znečišťující látky důsledkem fyzikálněchemických reakcí v atmosféře).

V České republice patří mezi aktuální problémy spojené s kvalitou ovzduší zejména znečištění ovzduší suspendovanými částicemi, troposférickým ozonem (O_3) a oxidy dusíku (NO_x), a proto se na tyto znečišťující látky zaměřuje i tato bakalářská práce. Práce si klade za cíl shromáždit informace k vybraným aktuálním problémům kvality ovzduší, doplnit je citacemi a následně tyto získané poznatky vyhodnotit z pohledu vybraných souvislostí ve vztahu k problematice kvality a ochrany prostředí a zdraví.

1 LEGISLATIVA V OCHRANĚ OVZDUŠÍ A IMISNÍ LIMITY PRO VYBRANÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY

Základním právním předpisem v oblasti ochrany ovzduší v České republice je zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v platném znění. Detaily jsou upřesněny ve vyhlášce č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. Dále je česká legislativa upravena směrnicemi Evropské unie, mezi které patří Směrnice 2008/50/ES, o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu, Směrnice 2001/81/ES, o národních emisních stropcích pro některé látky znečišťující ovzduší, Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU, o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění) a Směrnice komise (EU) 2015/1480, kterou se mění několik příloh směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, kterými se stanoví pravidla pro referenční metody, ověřování údajů a umístění míst odběru vzorku při posuzování kvality vnějšího ovzduší [1].

Tab. 1: Imisní limity (LV) pro ochranu zdraví dle zákona č. 201/2012 Sb. a vyhlášky č. 330/2012 Sb [2] [3].

Znečišťující látka	Doba průměrování	Mez pro posuzování [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		Imisní limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] LV
		Dolní LAT	Horní UAT	
NO ₂	1 hodina	100 max. 18x za rok	140 max. 18x za rok	200 max. 18x za rok
	kalendářní rok	26	32	40
PM ₁₀	24 hodin	25 max. 35x za rok	35 max. 35x za rok	50 max. 35x za rok
	kalendářní rok	20	28	40
PM _{2,5}	kalendářní rok	12	17	25
O ₃	Maximální denní			120
	8h klouzavý průměr ¹	—	—	25x v průměru za 3 roky

¹ Maximální denní 8hod. průměrná koncentrace se stanoví posouzením 8hod. klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu. Každý 8hod. průměr se přiřadí ke dni, ve kterém končí, tj. první výpočet je proveden z hodinových koncentrací během periody 17:00 předešlého dne a 01:00 daného dne. Poslední výpočet pro daný den se provede pro periodu od 16:00 do 24:00 hodin [2].

Tab. 2: Imisní limity pro ochranu ekosystému a vegetace dle zákona č. 201/2012 Sb. a vyhlášky č. 330/2012 Sb. [2] [3].

Znečišťující látka	Doba průměrování	Mez pro posuzování [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		Imisní limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] LV
		Dolní LAT	Horní UAT	
NO_x ²	kalendářní rok	19,5	24	30
O_3	AOT40 ³	—	—	18 000 průměr za 5 let

V tabulkách jsou uvedeny nejvýše přípustné úrovně znečištění pro oxid dusičitý (NO_2), PM_{10} (částice o velikosti aerodynamického průměru menšího nebo rovného než $10\ \mu\text{m}$), $\text{PM}_{2,5}$ (částice o velikosti aerodynamického průměru menšího nebo rovného než $2,5\ \mu\text{m}$), troposférický ozon (O_3) a oxidy dusíku (NO_x), protože se jimi zabývá tato bakalářská práce. V Tab. 1 jsou uvedeny imisní limity pro ochranu zdraví, vedle toho legislativa určuje imisní limity pro ochranu ekosystému a vegetace, které jsou uvedeny v Tab. 2.

² Součet objemových poměrů oxidu dusnatého a oxidu dusičitého vyjádřený v jednotkách hmotnostní koncentrace oxidu dusičitého [2].

³ AOT40 znamená součet rozdílů mezi hodinovou koncentrací větší než $80\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a hodnotou $80\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v dané periodě užitím pouze hodinových hodnot změřených každý den mezi 08:00a 20:00 SEČ, vypočtených z hodinových hodnot v letním období (1.5.–31.7.) [2].

2 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE

K označení suspendovaných částic se používá mnoho pojmů. Setkáváme se s pojmy pevný aerosol, prašný aerosol, suspendované částice, tuhé znečišťující látky, poletavý prach, jemné částice, černý kouř a další [4].

2.1 Definice a dělení suspendovaných částic

Suspendované částice jsou částice, které představují širokou třídu chemických a fyzikálních nečistot vyskytujících se ve vzduchu [7]. Jde o soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic, které mají rozměry v rozsahu od 1 nm – 100 μm, a které setrvávají v atmosféře po dobu umožňující jejich detekci [5]. Mohou být organického i anorganického původu [6].

Aerosol lze rozdělit podle fyzikální formy a podle způsobu jeho vzniku [7]. Velikost částic aerosolu patří mezi jeden z nejdůležitějších parametrů ovlivňující jeho chování v atmosféře [5].

Soubory aerosolových částic vytváří známé a dobře viditelné jevy v atmosféře. Pokud vzroste koncentrace částic v souboru do té míry, že hustota vzniklého aerosolu je větší než 1 % hustoty vzduchu ($\rho_{\text{vzduchu}} = 1,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), pak se tento soubor částic jeví jako mrak nebo oblak, má jasně dané hranice a jeho objemové vlastnosti se velmi liší od okolního zředěnějšího aerosolu [5].

Jako mlhu označujeme kapalný aerosol, který vznikl kondenzací přesycených vodních par nebo atomizací kapaliny, kdy částice mají kulový tvar a velikost rozsahu od desetin mikrometru do 100 μm [5].

Za opar označujeme jev, který má vliv zejména na viditelnost v atmosféře a je podobný mlze. Jako dým se jeví aerosol z pevných částic, které mají velikost zpravidla menší než 0,05 μm a tvar shluků nebo řetězců tvořených aglomerací částic primárně vzniklých kondenzací par generovaných především při vysokoteplotních procesech [5].

Obdobně lze definovat kouř, který navíc obsahuje i částice kapalné a je důsledkem nedokonalého spalování [5].

Prach označujeme jako soubor hrubých částic, větších než 0,6 μm, vzniklých působením mechanických sil. Podobně definujeme sprej nebo tříšť vzniklé působením mechanických sil na kapalinu [5].

Smogem rozumíme obecný termín označující viditelné znečištění atmosféry hlavně v městských oblastech. Suspendované částice oxidačního smogu tvoří kapalné nebo pevné částice obvykle menší než 2 μm [5].

Rozlišujeme aerosol primární a sekundární. Primární emise jsou emitovány do atmosféry přímo ze zdroje. Sekundární aerosol vzniká chemickou reakcí plynných složek atmosféry a jeho vznik označujeme zkráceně jako konverze plyn-částice (gas-to-particle conversion). Zvláštní kategorií je bioaerosol, který zahrnuje životaschopné organismy, jako jsou viry, bakterie, houby a případně jejich části a živočišné a rostlinné produkty jako spory a pyl [5].

Podle velikosti může suspendované částice rozlišovat zejména na:

- Hrubou frakci- (PM_{10}) – aerosolové částice o aerodynamickém průměru menším než 10 mikronů, které mohou vstoupit do horních cest dýchacích a plic,
- Jemnou frakci ($\text{PM}_{2,5}$) – aerosolové částice průměru menším, než 2,5 mikronu, jsou nebezpečné, protože mohou pronikat až do alveolární oblasti plic,
- Ultrajemnou frakci – tento termín je většinou používán v medicínské literatuře a označuje částice menší, než 0,1 μm , vzniklé nukleárním způsobem [8].

2.2 Zdroje suspendovaných částic

Atmosférický aerosol může být přirozeného i antropogenního původu. Mezi hlavní přirozené zdroje patří výbuchy sopek, lesní požáry a prach unášený větrem. Dalším přirozeným zdrojem jsou částice, které vznikají při zvětrávání hornin, tyto částice mohou být transportovány větrem na značné vzdálenosti. Tohoto původu je např. i prach přinášený na území ČR ze Sahary a Ukrajiny, prach z pouště Gobi je součástí smogu v Pekingu. V pobřežních oblastech je významným přírodním zdrojem mořská sůl, která obsahuje vysoký obsah chloridů, které mohou mít korozivní vliv na místní budovy a památky. Tyto částice mají rozměry přibližně 10 μm . Přirozeného původu je i tzv. bioaerosol, který zahrnuje organismy, jakou jsou viry, bakterie, houby a případně jejich části a živočišné a rostlinné produkty (kam patří především pyl a spory) [9] [10] [12].

Mezi hlavní antropogenní zdroje PM_{10} a hrubých částic patří spalovací procesy, hlavně v spalovacích motorech, prach a nečistoty ze zemědělství, vysokoteplotní technologické procesy, jako je tavení rud a kovů nebo svařování. U spalovacích motorů jsou problematické

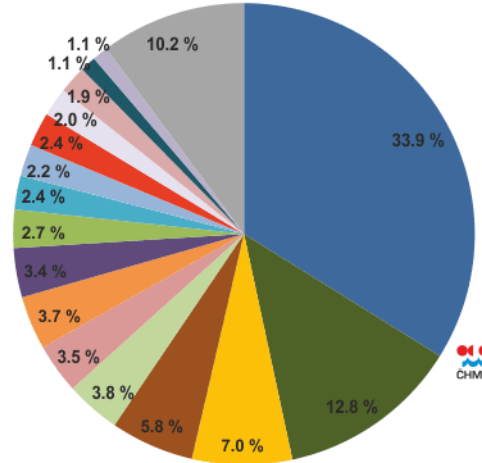
především vznětové (dieselové) motory, které v porovnání se zážehovými (benzínovými) produkují až 100násobně větší koncentraci drobných částic ve výfukových plynech. Dalším významným zdrojem jsou technologické procesy ve stavebnictvím a těžebním průmyslu. V těchto odvětvích dochází k manipulaci s velkým objemem materiálu. Pokud je materiál volně ložený a také manipulovaný tak je zdrojem uvolňování těchto částic na každém přesypu [9] [12]. Objem suspendovaných částic, které vznikají při těžbě a úpravě surovin se odhaduje na 3×10^5 tun za den celosvětově. Většina částic se usadí v blízkosti okolí zdroje, ale aerosoly a částice, jejichž velikost je menší než 0,005 mm zůstávají v ovzduší a dochází k transportu na velké vzdálenosti od zdroje [11].

Nejvíce PM_{2,5} a nejmenších ultrajemných částic pochází ze spalování fosilních paliv, elektráren a průmyslových závodů, jako jsou ocelárny a také spalování fosilních paliv v lokálních topeništích. Elektrárny a další spalovací zařízení mohou produkovat popílek, který je složen z jemných částic obsahujících uhlík, uhlovodíky, oxidy kovů a oxid křemičitý. Popílek také sorbuje dioxiny vznikající při spalování. Venkovské oblasti emitují značné množství PM při spalování biomasy [9].

Podle Obr. 1 v České republice v roce 2014 patřili mezi hlavní zdroje emisí PM₁₀ lokální topeniště, které se podíleli na znečišťování ovzduší 33,9 %. Druhým největším zdrojem emisí PM₁₀ s podílem 12,8 % byly polní práce. Tyto emise vznikají především při zpracování půdy, sklizni a čištění zemědělských plodin. Významným zdrojem emisí PM₁₀ byla i silniční doprava s podílem 9,7 % [12].

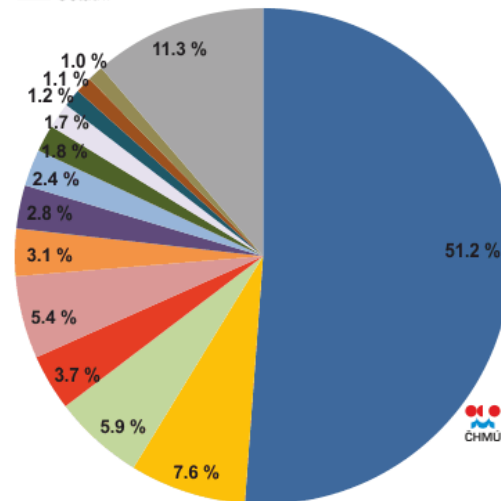
Obr. 2 ukazuje, že v roce 2014 v České republice byly největším zdrojem emisí PM_{2,5} lokální topeniště s podílem 51,2 %. Mezi další významné zdroje emisí PM_{2,5} patřila silniční doprava s podílem 8,2 % a sektor veřejné energetiky a výroby tepla s podílem 7,6 % [12].

- 1A4bi - Lokální vytápění domácností
- 3Dc - Polní práce (orba, sklizeň apod.)
- 1A1a - Veřejná energetika a výroba tepla
- 1B1a - Fugitivní emise z pevných paliv: Těžba a manipulace s uhlím
- 1A4cii - Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní stroje
- 1A3biii - Silniční doprava: Nákladní doprava nad 3,5 tuny
- 2A5a - Těžba nerostných surovin (mimo uhlí)
- 1A3bvi - Silniční doprava: Otěry pneumatik a brzd
- 3B4gii - Chovy hospodářských zvířat - Chov broilerů
- 3B4gi - Chovy hospodářských zvířat - Nosnice
- 2C1 - Výroba železa a oceli
- 1A3bi - Silniční doprava: Osobní automobily
- 1A3bvii - Silniční doprava: Abráže vozovky
- 3B3 - Chovy hospodářských zvířat - Chov prasat
- 1A2f - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Minerální nekovové produkty
- 2A5b - Výstavba a demolice
- Ostatní



Obr. 1: Procentuální rozdělení zdrojů emisí PM_{10} v roce 2014 [12].

- 1A4bi - Lokální vytápění domácností
- 1A1a - Veřejná energetika a výroba tepla
- 1A4cii - Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní stroje
- 1A3bi - Silniční doprava: Osobní automobily
- 1A3biii - Silniční doprava: Nákladní doprava nad 3,5 tuny
- 2A5a - Těžba nerostných surovin (mimo uhlí)
- 1A3bvi - Silniční doprava: Otěry pneumatik a brzd
- 2C1 - Výroba železa a oceli
- 3Dc - Polní práce (orba, sklizeň apod.)
- 1A3bvii - Silniční doprava: Abráže vozovky
- 1A2f - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Minerální nekovové produkty
- 1B1a - Fugitivní emise z pevných paliv: Těžba a manipulace s uhlím
- 1A2gviii - Spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví: Ostatní
- Ostatní



Obr. 2: Procentuální rozdělení zdrojů emisí $PM_{2.5}$ v roce 2014 [12].

2.3 Metody měření suspendovaných částic na stanicích ČHMÚ

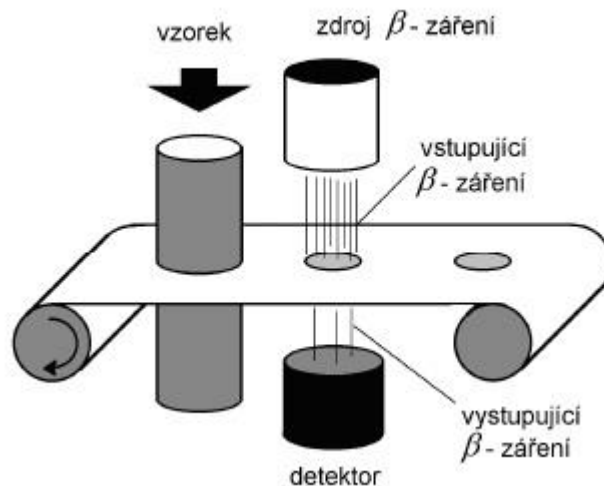
Pro měření koncentrací suspendovaných částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ používá Český hydrometeorologický ústav, jak automatizované monitorací stanice, tak i manuálně obsluhované stanice. V síti automatizovaných monitorovacích stanic se používají metody radiometrie, nefelometrie a křemenné oscilační mikrováhy. U manuálních stanic se používá metody gravimetrie [13].

Radiometrie (RADIO) je metoda stanovení založena na měření změn intenzity beta záření, které prochází vrstvou částic zachycených na vhodně upraveném filtračním materiálu. Do detektoru je přiváděn proud aerosolu, kde je prosáván páskovým filtrem vyrobeným ze skelné tkaniny. Aby se na filtru nahromadilo dostatečné množství částic, tak je s ním pohybováno v určených sekvencích. Pohyb filtračního pásku je řízen tak, aby záření emitované zdrojem procházelo postupně exponovanou a neexponovanou část filtru. Z rozdílu absorpce beta záření mezi exponovaným a neexponovaným filtračním materiálem, který je úměrný hmotnosti zachycených částic aerosolu, je odvozen údaj o jeho koncentraci. Určení hodnoty koncentrace SMP a PM_{10} . Absorbance beta záření depozitem se měří obvykle Geiger-Mullerovým počítačem. Princip metody je zřejmý z Obr. 3 [13] [14].

Metoda křemenné oscilační mikrováhy (TEOM) měří hmotnostní množství vzorku zachyceného na výměnném filtru podle změny frekvence oscilujícího kuželovitého nosiče. Vzorek vzduchu prochází filtrem, kde dochází k záchytu částic prachu a dále pokračuje dutým kuželovitým elementem přes elektronické ovládání průtoku do vývěvy. Touto metodou se stanovuje PM_{10} [13].

Principem nefelometrie je usměrnění množství rozptýleného světla od odražené plochy aerosolových částic. Počtu a intenzitě impulzů je pak přiřazena počáteční koncentrace a velikost aerosolových částic. Tyto údaje lze matematicky přepočítat na hmotnostní koncentrace aerosolových částic v ovzduší. Metoda se používá ke stanovení PM_x [13].

Gravimetrické stanovení se provádí tak, že dochází k odebírání vzorku spojitou filtrací venkovního ovzduší přes membránový filtr z derivátu celulózy či teflonu s odpovídající velikostí pórů nebo skelných vláken. Účinnost záchytu je větší jak 99,5 %. Hmotnostní koncentrace se stanoví z rozdílu hmotnosti filtru před expozicí a po expozici. Pro stanovení koncentrací PM_{10} a $PM_{2,5}$ [13].



Obr. 3: Princip analyzátoru využívajícího absorpce beta-záření [13].

2.4 Vliv suspendovaných částic na lidské zdraví

Důkazy o tom, že znečištění ovzduší suspendovanými částicemi má vliv na lidské zdraví, je často demonstrováno na obyvatelích měst v rozvinutých i rozvojových zemích. Rozsah efektu suspendovaných částic na lidský organismus je široký, ale hlavní účinek mají na kardiovaskulární a dýchací systém. Veškerá populace je ovlivněna, nicméně viditelný efekt je zejména v populačních skupinách, kde citlivost souvisí s věkem nebo zátěží nemocemi [15].

Z hlediska respirační depozice může být dýchací systém rozdělen na tři oblasti, z nich každá pokrývá jednu nebo více anatomických oblastí. Tyto oblasti se výrazně liší strukturou, tokem vzduchu, funkcí a citlivostí na usazené částice. První je oblast hlavy, která zahrnuje nos, ústa, hltan a hrtan. V této oblasti dochází k ohřívání a zvlhčování vdechovaného vzduchu. Druhá oblast je tracheobronchiální, která zahrnuje dýchací cesty od hrtanu po průdušinky. Třetí oblast zahrnuje plicní sklípky, kde dochází k výměně plynů. Po depozici jsou částice v plicích po různou dobu v závislosti na jejich chemických vlastnostech, jejich umístění v plicích a mechanismu uvolnění. V prvních dvě oblasti plic mají povrch pokryt vrstvou hlenu, který je pomalu hnán do hltanu, kde dochází ke spolknutí. Díky tomu jsou částice odváděny z dýchacích cest během několika hodin. Alveolární oblast tuto hlenovitou vrstvu nemá a vylučování nerozpustných částic může probíhat až po dobu několika měsíců. Rozpustné částice se mohou pomalu rozpouštět nebo mohou být zachyceny fagocytem a rozpuštěny anebo mohou být transportovány do vyšších dýchacích cest. Fibrogenní prachy, jako je oxid křemičitý, narušují tento mechanismus a způsobují postupné zjizvení nebo fibrózu alveolární oblasti [7].

Působení částic závisí především na jejich velikosti, tvaru a chemickém složení. Rozhodující pro průnik a ukládání v dýchací soustavě je velikost částic. Hrubé větší částice jsou zachyceny v horních částech dýchacího ústrojí, především v nosu. Částice o velikosti 10 μm (PM_{10}) jsou zachytávány v dolních dýchacích cestách. Částice frakce $\text{PM}_{2,5}$ dostávají až do průdušinek, a nejmenší jemné částice submikrometrické frakce až do plicních sklípků. Na povrch suspendovaných částic se mohou sorbovat další látky (např. těžké kovy), které mohou zvyšovat negativní účinky na zdraví [16].

Krátkodobá expozice zvýšených koncentrací suspendovaných částic se podílí na nárůstu celkové morbidity a mortality, zejména na onemocnění srdečně-cévních a dýchacích a na zvýšení počtu osob hospitalizovaných pro tato onemocnění, zvýšení kojenecké úmrtnosti, zvýšení výskytu respiračních symptomů jako je kašel a ztížené dýchání – zejména u astmatiků, a na změnách plicních funkcí při spirometrickém vyšetření [16].

Dlouhodobá expozice zvýšených koncentrací vede ke zvýšené mortalitě na onemocnění srdečně – cévní a respirační, včetně rakoviny plic a s tím související zkrácení délky života, chronický zánět průdušek a snížení plicních funkcí u dětí i dospělých. Také se objevují důkazy, že dlouhodobá expozice částic má za následek vznik diabetu II. typu, ovlivnění neurologického vývoje u dětí a vzniku neurologické poruchy u dospělých [16].

Environmentálními studii bylo prokázáno, že suspendované částice mohou vést k přechodnému výskytu supraventrikulární tachykardie a slabé redukci maximální hodnoty srdeční frekvence. Studie z Helsinek ukázala vazbu změny vedení vzruchu s důsledkem deprese S-T segmentu EKG, což je typické pro ischemii myokardu. Byla nalezena souvislost mezi jemnými částicemi a rizikem deprese S-T segmentu EKG, které bylo způsobenou fyzickou zátěží u osob s koronární nemocí srdeční. Osoby trpící poruchou srdečního rytmu (jako je supraventrikulární tachykardie) mohou podléhat riziku srdečního selhání v důsledku expozice jemnými částicemi [8].

Nebezpečí hrozí i u inhalování aerosolů z jehličkových a prašných minerálů, jako je sillimanit, azbestové minerály, grafit a jílové materiály. Díky masovému používání azbestu při výstavbě lodí se přišlo na to, že vdechování azbestového prachu, zejména v kombinaci s kouřením cigaret, představuje zvýšení rizika výskytu rakoviny plic i relativně vzácné rakoviny pohrudnice a poplicnice. U dělníků, kteří instalovali azbestové materiály do konstrukce lodí, zejména u kuřáků, byl zaznamenán až 300x vyšší výskyt rakoviny plic v porovnání s běžnou populací nekuřáků. Ohroženi byli také řidiči v městské dopravě (z dříve používaného

azbestového obložení brzd), horníci a zemědělci (zvýšené riziko vdechnutí sillimanit, který se uvolňuje při hluboké orbě). Horníci jsou ohroženi i koncentrací spor a hub, které rostou na dřevěných konstrukcích v dolech [11].

Zatím nebyla zjištěna bezpečná prahová koncentrace pro působení suspendovaných částic v ovzduší. Předpokládá se, že citlivost jedinců v populaci má tak velkou variabilitu, že ti nejcitlivější jsou v riziku účinku i při velmi nízkých koncentracích. Při chronické expozici suspendovanými částicemi frakce PM_{2,5} se redukce očekávané délky života začíná projevovat již od průměrných ročních koncentrací 5 µg.m⁻³ [16].

2.5 Vliv suspendovaných částic na životní prostředí

Suspendované částice mohou způsobit rostlinám akutní nebo chronické zranění. Akutní poranění je vyvolané, když jsou rostliny vystaveny vysokým koncentracím plynu po relativně krátkou dobu a projevuje se jasnými viditelnými příznaky na listu (např. vznik nekrotických oblastí). Chronické zranění je vyvolané důsledkem dlouhodobé expozice nižších koncentrací plynu a často nemá viditelné příznaky, může mít však vliv na snížení výtěžku [17].

Znečišťující látky mohou způsobit poškození listů a stomat, předčasné stárnutí rostliny, snížení fotosyntetické aktivity, narušení propustnosti listových membrán a snížení růstu a výnosu [17].

Částice mohou ovlivňovat morfologii rostliny. Před tím, než tyto znečišťující látky vstupují do listové tkáně, interagují s plochou listu. Usazení prachu na povrchu listu, který se skládal z hrubých a velmi jemných částic, ukázalo snížení růstu rostliny vlivem omezení výměny plynů mezi rostlinou a okolním prostředím [17].

Deponování prachu na rostlině ovlivňuje také stomata, protože částice vstupují do listu skrze stomatální otvor a toxicita částic narušuje fyziologickou aktivitu rostlin, jako je inhibice růstu rostlin, rychlost fotosyntézy a další. Bylo prokázáno, že u rostliny *Brassica campestris* (hořčice), které byly vystaveny cementovému prachu, vykazovaly snížený růst, nižší obsah fotosyntetického pigmentu a oleje, oproti kontrolní skupině. Částice mění odrazivost listu a zvyšují teplotu listu [17].

Prach s vysokým obsahem oxidu manganatého (MnO) způsobuje degradaci epikutikulárního vosku, inhibuje transpiraci, což může vyvolat fyziologické následky. Prach vznikající při těžbě v lomech vyvolává nekrózu tkání, vznik žlutých a hnědých míst,

v extrémních případech až odumření listů a zánik rostliny. Přítomnost těžkých kovů, jako je měď a síra, způsobuje různé fyziologické změny, jako jsou příznaky chlorózy, předčasné stárnutí a ztráta listů [17].

Různé hodnoty pH prachu mohou mít vliv na morfologii i fyziologii rostlin. Například cementový prach při hydrataci uvolňuje hydroxid vápenatý, který může v některých případech zvýšit alkalitu povrchu listu na pH 12. Prach s hodnotami pH ≥ 9 může hydrolyzovat složky lipidů a vosků na povrchu listu, denaturovat bílkoviny a poškozovat chloroplasty. Kyselé aerosoly (SO₂, NO_x) snižují pH na povrchu listu a mohou přes něj difundovat a vytvářet kyselé radikály v listové matrici reakcí s buněčnou vodou ovlivňující molekuly chlorofylu. Tab. 3 ukazuje, jak změna pH může ovlivnit stomatální chování a fotosyntézu [17].

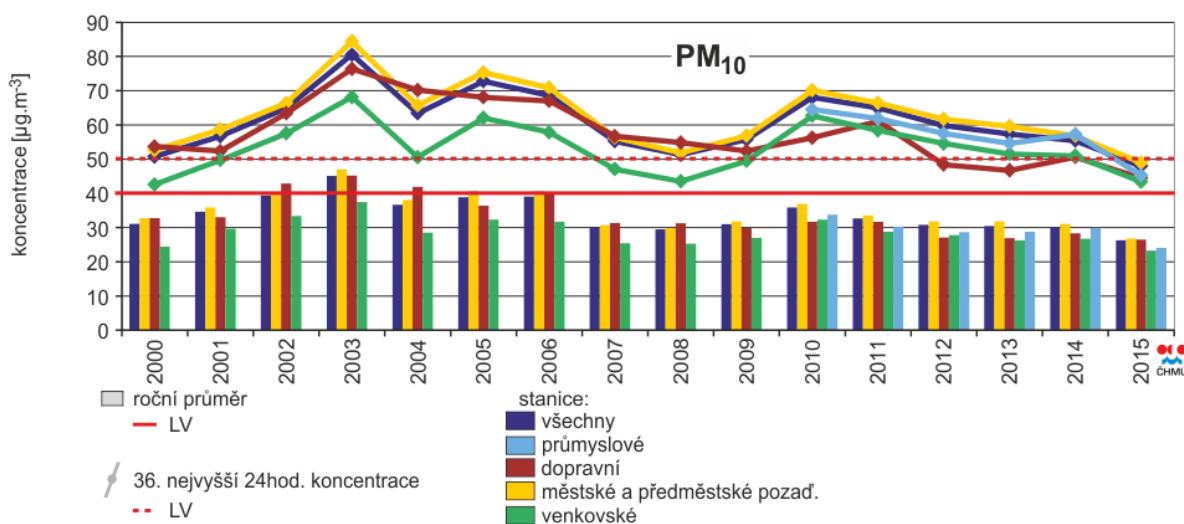
Tab. 3: Vliv změn pH na stomatální chování a fotosyntézu [17].

Rozsah pH	Rostlina	Dopad
4-5,6	<i>Liriodendron tulipifera</i>	snížená fotosyntéza a stomatální vodivost
4-5,6	<i>Picea abies</i>	snížená fotosyntéza a stomatální vodivost
2,5-5	<i>Picea rubens</i>	dlouhodobý pokles transpirace
3-5,5	<i>Fagus sylvatica</i>	Zvýšená stomatální vodivost a inhibice nočního uzavření
3,5-5,5	<i>Picea abies</i>	Snížená maximální a zvýšená minimální stomatální vodivost
5-6,5	<i>Mangifera indica</i>	Snížená fotosyntéza a ovlivnění chlorofylu
5,5-6,5	<i>Psidium guajava</i>	Snížená fotosyntéza a stomatální vodivost
7-9	<i>Ficus religiosa</i>	Zvýšená tvorba kyseliny askorbové

2.6 Vývoj koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5}

2.6.1 Vývoj koncentrací suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5} v období 1990-2015

V letech 1990-2001 poklesly významně koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ v důsledku legislativních změn, restrukturalizace hospodářství, modernizace nebo ukončení provozů zdrojů [12], zavádění BAT technologií a zvýšení výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách a z obnovitelných zdrojů [18]. Pokles emisí pokračuje po roce 2001 pomaleji. Z Obr. 4 je patrné, že v období 2001-2003 byl zaznamenán vzestupný trend ve znečištění ovzduší PM₁₀ téměř na všech lokalitách, kde docházelo k měření. V roce 2003 byly v důsledku nepříznivých rozptylových podmínek zaznamenány vysoké koncentrace PM₁₀. Vysoké koncentrace suspendovaných částic byly zaznamenány i v letech 2005 a 2006 a to následkem dlouhých epizod s nepříznivými rozptylovými podmínkami v zimním období. Příznivější rozptylové podmínky a poklesem emisí některých prekurzorů částic, v důsledku útlumu některých hospodářských odvětví vlivem ekonomické krize, došlo v období 2007-2009 k poklesu koncentrací PM₁₀. V roce 2010 následoval vzestup koncentrací suspendovaných částic vyvolaný opakovaným výskytem nepříznivých meteorologických a rozptylových podmínek především v zimním období. Od roku 2011 dochází k poklesu koncentrace suspendovaných částic, který se projevil na všech lokalitách [12].



Obr. 4: Trendy ročních charakteristik PM₁₀ v ČR v období 2000-2015 [12].

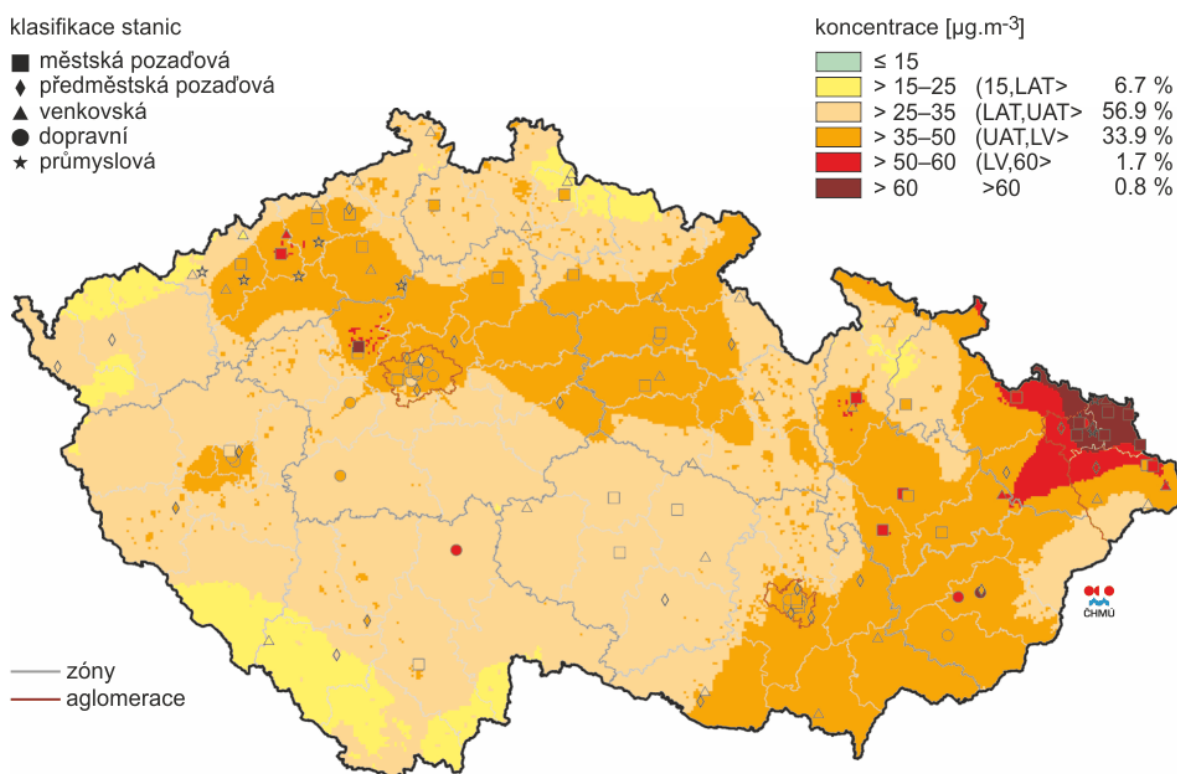
Roční průměrná koncentrace PM₁₀ se dlouhodobě drží pod hodnotou imisního limitu, zatím co nejvyšší 36. denní koncentrace PM₁₀ a průměrná roční koncentrace PM_{2,5} kolísá kolem hodnoty imisního limitu [12].

Dlouhodobé nadlimitní roční koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ jsou především na území aglomerace Ostrava/Karviná/ Frýdek-Místek (O/K/F-M) a část Moravskoslezského kraje [12].

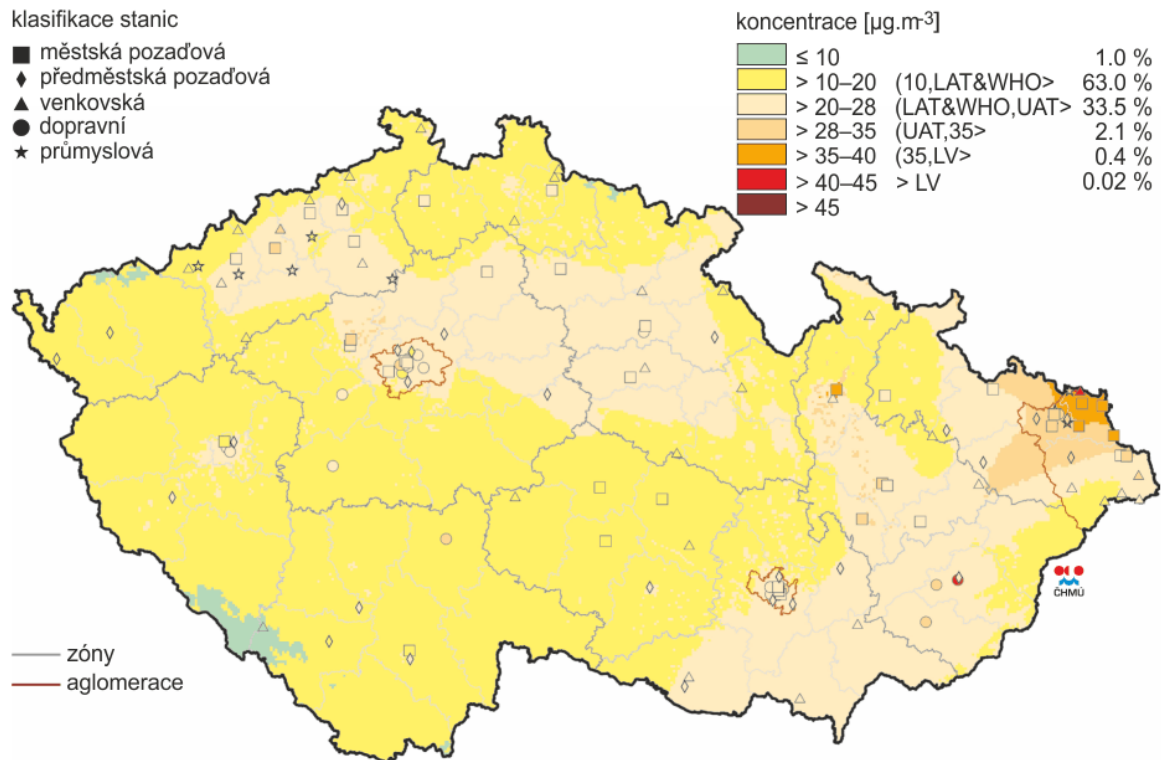
2.6.2 Znečištění ovzduší suspendovanými částicemi v roce 2015

Suspendované částice PM_{10}

Během roku 2015 docházelo k překročení 24hodinového imisního limitu PM_{10} na 23,4 % stanic (29 stanic z 124). to je méně než předcházející rok, kdy došlo k překročení denního imisního limitu na 42,9 % stanic (57 stanic ze 133). Zmenšilo se i území, na kterém došlo k překročení 24hodinového imisního limitu PM_{10} z 8,1 % území na 2,5 %, jak je vidět na Obr. 5. Zmenšení území se projevilo zejména v Ústeckém, Středočeském a Olomouckém kraji. Nejvíce zatíženou oblastí byla aglomerace O/K/F-M, kde byl denní imisní limit pro PM_{10} překročen na většině stanic. Překročení limitu nedošlo v zónách Severovýchod, Jihovýchod a v aglomeraci Praha. V aglomeraci Brno došlo k překročení denního imisního limitu pouze na dopravní lokalitě Brno-Zvonařka. [12].



Obr. 5: Pole 36. nejvyšší 24hodinové koncentrace PM_{10} v roce 2015 [12].

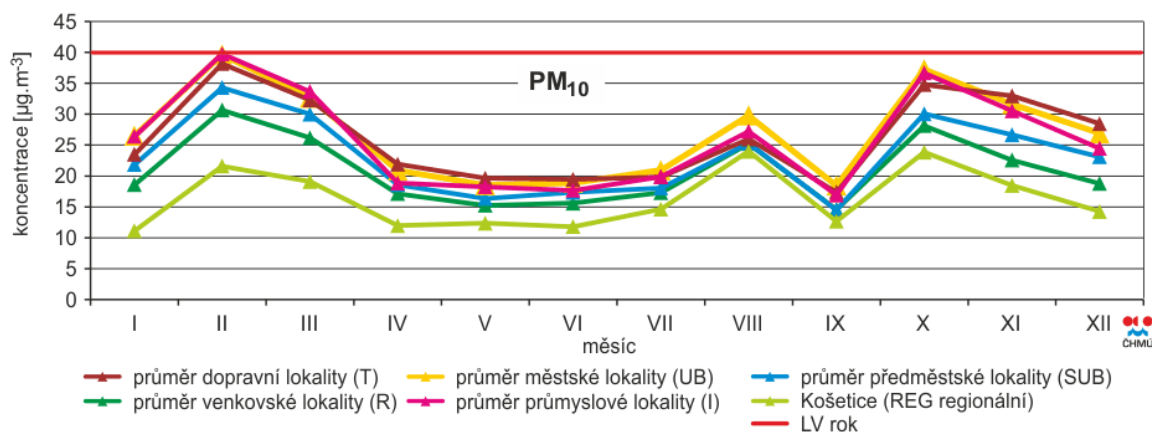


Obr. 6: Pole roční průměrné koncentrace PM_{10} v roce 2015 [12].

V roce 2015 byl roční imisní limit PM_{10} překročen na 2,3 % stanic (3 stanice z 132), jak ukazuje i Obr. 6. K překročení došlo na dvou stanicích v aglomeraci O/K/F-M a na jedné stanici v oblasti Střední Morava. Oproti roku 2014 došlo ke zmenšení území, kde došlo k překročení ročního imisního limitu z 0,45 % na 0,02 % [12].

Z Obr. 7 je patrné, že v roce 2015 nejvyšší koncentrace PM_{10} byly zaznamenány v chladných měsících roku. To je způsobeno především zvýšenými hodnotami emisí částic, ze sezonních tepelných zdrojů a zhoršenými rozptylovými podmínkami, které panují obzvlášť v zimních měsících. Nejvyšších průměrných měsíčních koncentrací bylo dosaženo v únoru a říjnu. Měsíce leden, listopad a prosinec byly teplotně nadnormální a díky příznivým rozptylovým podmínkám nebyly měsíční průměrné koncentrace PM_{10} tak vysoké jako v předešlém roce. V období od dubna do září byly průměry měsíčních koncentrací nejnižší, a to hlavně z důvodu skončení topné sezóny. Výjimkou byl srpen, kdy byly zaznamenány vyšší

koncentrace, a to z důvodů mimořádně vysokých teplot, které podmiňovaly zvýšenou resuspenzi [12].

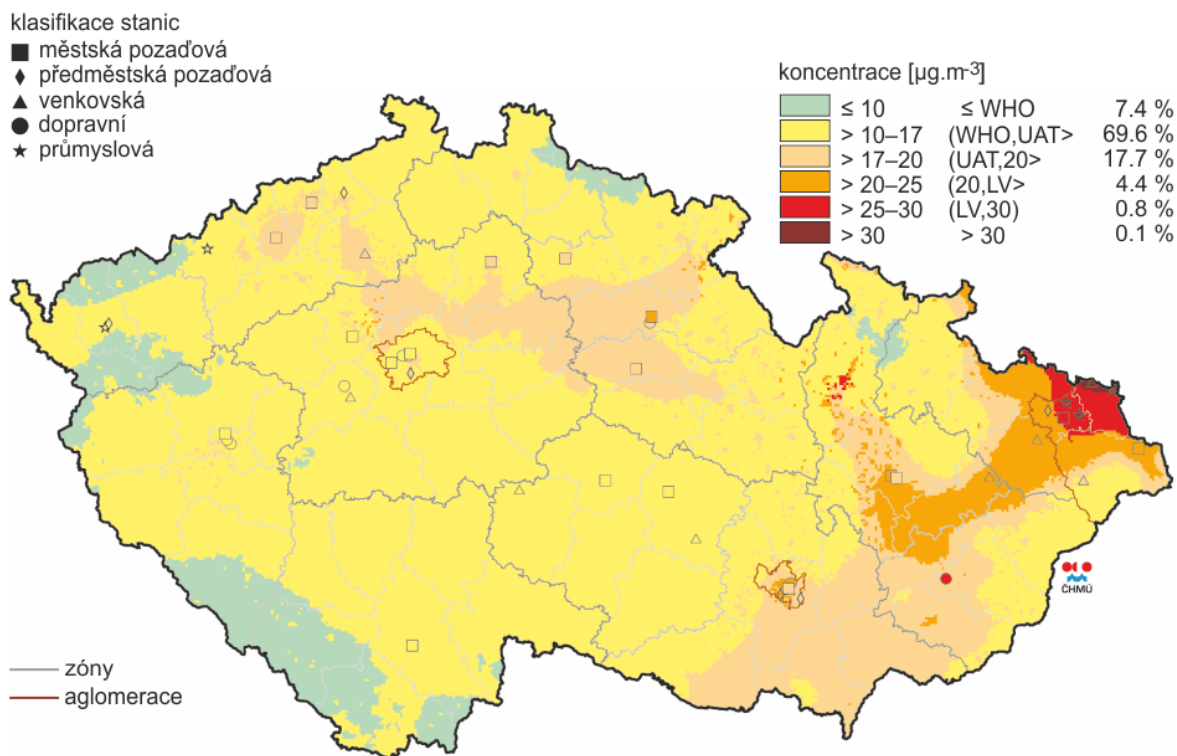


Obr. 7: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací PM₁₀ v roce 2015 [12].

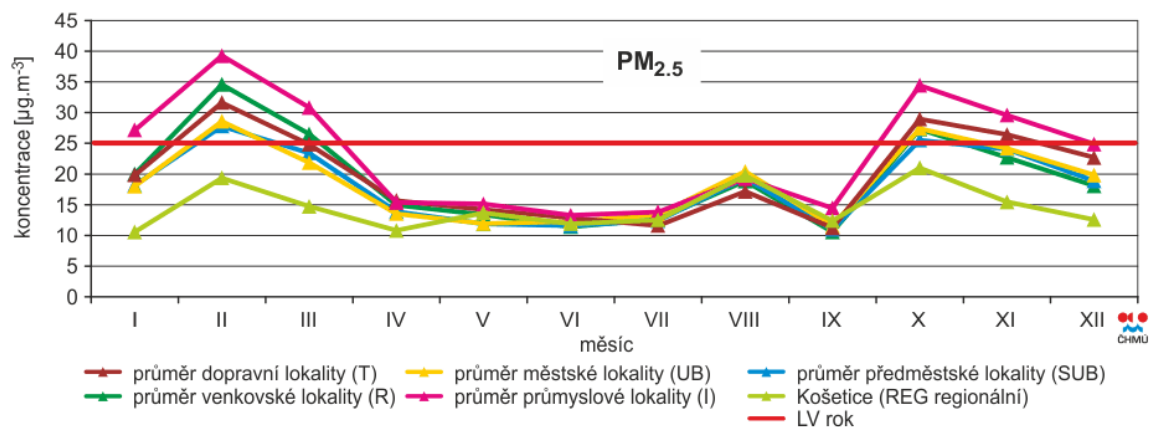
Suspendované částice PM_{2,5}

V roce 2015 došlo ke snížení úrovně znečištění částicemi PM_{2,5}, oproti roku 2014. ukazuje, že na 0,9 % území ČR došlo k překročení ročního imisního limitu. Limit byl překročen na pěti stanicích v aglomeraci O/K/F-M a na jedné stanici v oblasti Střední Morava. Imisní limit pro denní koncentraci byl překročen na 12,5 % stanic (6 stanic ze 48, kde probíhá měření PM_{2,5}). Doporučená denní hodnota PM_{2,5} pro ochranu lidského zdraví WHO byla překročena skoro na celém území ČR (99,2 %) [12].

Z Obr. 9 je patrné, že zvýšené znečištění ovzduší PM_{2,5} se objevuje obzvlášť v chladných měsících roku a je způsobeno, stejně jako u PM₁₀ vyššími emisemi z lokálních topenišť a horšími rozptylovými podmínkami. Nejvyšší průměrné koncentrace PM_{2,5} byly naměřeny v únoru a říjnu, což je shodné s PM₁₀ [12].



Obr. 8: Pole roční průměrné koncentrace $\text{PM}_{2.5}$ v roce 2015 [12].



Obr. 9: Roční průběh průměrných koncentrací $\text{PM}_{2.5}$ v roce 2015 [12].

3 OXIDY DUSÍKU

Mezi oxidy dusíku (NO_x) řadíme: oxid dusnatý (NO , bezbarvý plyn bez zápachu, pro člověka jedovatý), oxid dusičitý (NO_2 , červenohnědý plyn štiplavého zápachu), oxid dusitý (N_2O_3), tetraoxid dusíku (N_2O_4) a oxid dusičný (N_2O_5). V ovzduší se nejvíce vyskytují oxid dusnatý a dusičitý [19]. Oxid dusičitý je součástí kyselé atmosférické depozice a dále přispívá ke vzniku fotochemického smogu [20].

3.1 Zdroje NO_x

Zdroje emisí oxidů dusíku dělíme na přirozené a antropogenní. Přirozeným zdrojem dusíkatých sloučenin jsou biologické procesy v půdách, při nichž bakterie produkují kromě N_2 také NO_2 , dále oxidy dusíku vznikají při výbojích blesků, kdy dochází k oxidaci vzdušného N_2 [21]. Významným přirozeným zdrojem NO_x je i sopečná činnost a lesní požáry [22].

Hlavním zdrojem oxidů dusíku v troposféře jsou však emise z antropogenních zdrojů [5]. Primárním zdrojem je však doprava, nejen silniční, ale i lodní a letecká. Instalace třícestných katalyzátorů do benzínových vozidel výrazně přispěla k redukci emisí benzínových motorů, zvyšuje se objem nákladní automobilové dopravy a roste množství dieselových motorů i v osobní přepravě, které tyto katalyzátory (při kterých se redukuje NO_x na N_2) neobsahují [21]. Při spalování paliv v motorových vozidlech je dosahováno vysoké teploty hoření, a proto zde dochází k oxidaci vzdušného N_2 na takzvané vysokoteplotní NO_x . [22].

Mezi další možné antropogenní zdroje úniků NO_x je nutné zařadit veškeré chemické procesy, kde jsou tyto oxidy přítomny a kde může k jejich úniku dojít, například výroba kyseliny dusičné, amoniaku, hnojiv. Takové výroby jsou však dnes vybaveny účinným zařízením na odstranění NO_x z odpadních plynů [19].

V roce 2014 v ČR pocházelo největší množství emisí NO_x z dopravy bylo to 38,9 %. Druhým největším producentem emisí byl sektor veřejné energetiky a výroby tepla s podílem 32 %. Mezi další zdroje emisí patřily spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví, lokální vytápění domácností a zpracování uhlí [23].

Produkce emisí NO_x v ČR je soustředěna především podél dálnic, komunikací s intenzivní dopravou, ve velkých městech a v krajích (Ústecký, Středočeský, Moravskoslezský), ve kterých jsou umístěny významnější energetické výrobní celky [23].

3.2 Metody měření NO_x na stanicích ČHMÚ

V České republice provádí měření NO_x Český hydrometeorologický ústav, který má 93 měřicích stanic. K měření používá stanice automatizované a manuální [23].

V síti automatizovaných monitorovacích stanic probíhá měření NO_x pomocí metody chemiluminiscence [13]. Tato luminiscenční analýza měří luminiscenční záření, které zkoumaný vzorek emituje. Luminiscence je vlastní záření látky ve viditelné oblasti spektra nebo blízko ní, které se tvoří po nebo při ozáření této látky. Luminiscenční záření není tepelným zářením, má jinou vlnovou délku než záření primární a trvá i po přerušení primárního záření. U chemiluminiscence je zdroj excitace energie chemické reakce [24].

Vzorek oxidu dusnatého z ovzduší reaguje s ozonem za tvorby oxidu dusičitého v excitovaném stavu (reakce 1). Při návratu molekul z excitace zpět na základní hladinu je přebytečná energie emitována ve formě světla (reakce 2) [24].



Intenzita chemiluminiscence je přímo úměrná koncentraci oxidu dusnatého. Vlnová délka emitovaného světla se nachází v červené a infračervené oblasti spektra (640-3000 nm). I když jsou detektory emitovaného světla citlivé jen v oblasti vlnových délek pod 900 nm, náleží metoda chemiluminiscence k necitlivějším metodám pro stanovení oxidu dusnatého [24].

Měření NO_x na manuálních stanicích probíhá pomocí metody triethanolaminové spektrofotometrie. Metoda je založena na oxidaci oxidu dusnatého s následnou absorpcí oxidu dusičitého do roztoku thiethanolaminu s přidavkem kyseliny sulfanilové v kyselém prostředí kyseliny fosforečné s kopulačním činidlem NEDA (N-(1naftyl)ethylendiamin, Griessovo činidlo). Intenzita zbarvení se měří pomocí spektrofotometru při 540 nm [13].

3.3 Vliv NO_x na lidské zdraví

Zvýšení emisí oxidu dusičitého, NO₂, vede k obavám z jeho vlivů na zdraví. NO₂ je oxidační činidlo a může poškodit plicní tkáň jeho oxidačními vlastnostmi. Na vysoké úrovni působí jako silný iniciátor zánětu v plicích, přednostně postihuje dolní cesty dýchací, především míst, kde dochází k výměnám plynů. Studie na zvířatech prokázaly, že NO₂ ve vysokých dávkách může narušit obranyschopnost organismu. Tyto studie probíhaly za vysokých

koncentrací NO₂, které se normálně v atmosféře nevyskytují a zvířata byla vystavena působení infekčního agens. Dlouhodobá expozice vysoké koncentrace NO₂ může způsobit fibrózu plic a emfyzém zvířat [6].

Bylo provedeno mnoho kontrolovaných experimentů, kde lidé byli vystaveni expozici NO₂, často s konfliktními výsledky. Je to proto, že expozice probíhali za různých podmínek u subjektů s různými charakteristikami a často i s různými měřenými koncovými body. Nedávná metaanalýza ukázala, že při expozici pod 1880 µg.m⁻³ (1000 ppb) pouze 47 % normálních jedinců vykazovalo zvýšenou bronchiální reaktivitu, zatímco nad koncentrací 1880 µg.m⁻³ (1000 ppb) jevílo zvýšenou bronchiální reaktivitu 79 % jedinců. Při expozicích pod 940 µg.m⁻³ (500 ppb) byly u 69 % lidí s astmatem zaznamenány změny v bronchiální reaktivitě, při fyzické aktivitě byly zaznamenány změny u 51 % lidí. Z toho vyplývá, že lidé trpící astmatem jsou obecně více citliví ke koncentracím NO₂, než normální jedinci a fyzická aktivita snižuje citlivost. Jedna studie z Velké Británie ukázala, že expozice nízké hladiny NO₂ (760 µg.m⁻³, 400 ppb) zvyšuje reakci na alergeny u lidí s alergickým astmatem [6].

Obyvatelé velkých městských aglomerací, významně ovlivněných dopravou jsou vystaveni oxidu dusičitému nejvíce. Dětem, které jsou vystaveny vyšším expozicím oxidu dusičitého, hrozí vyšší riziko respiračních onemocnění v důsledku snížené imunity a snížení plicních funkcí. Řada studií našla souvislosti mezi působením oxidu dusičitého a zvýšením celkové úmrtnosti na kardiovaskulární a respirační onemocnění, ale je obtížné oddělit účinky dalších, současně působících látek. Nelze tedy určit, zda se jedná o nezávislý vliv oxidu dusičitého nebo spíše působení směsi látek, např. aerosolu, uhlovodíků, ozónu a dalších látek [16].

Oxid dusičitý (NO₂) je výrazněji toxičtější než oxid dusnatý (NO), ale koncentrace NO₂ v atmosféře zřídka dosahuje toxických hladin. Náhodné uniky NO₂ mohou být dostačující k tomu, aby způsobily toxický účinek nebo dokonce smrt. Krátká expozice NO₂ ve vzduchu v koncentraci 50-100 ppm poškozuje plicní tkáň na dobu 6 až 8 týdnů, po níž následuje zotavení. Koncentrace 500 ppm nebo větší NO₂ způsobuje smrt během 2 až 10 dní. Expozice v rozmezí 100 až 500 ppm NO₂ způsobuje plicní onemocnění *bronchilitis fibrosa obliterans*. Toto onemocnění je smrtelné během 3 až 5 týdnů po expozici [25].

3.4 Vliv NO_x na životní prostředí

3.4.1 Příznaky poškození a účinky na růst

Fytotoxicita NO₂ je relativně menší oproti SO₂ a O₃. Akutní poškození listů u citlivých rostlin (jako je ředkvička nebo tolice vojtěška) nastává po expozici 3 ppm NO₂ po dobu 4 až 8 hodin. Při zvýšené expozici NO₂ může u rostliny dojít ke vzniku relativně velké bílé nebo hnědé nekrotické oblasti. Viditelné zranění způsobené NO_x je v polním terénu velmi vzácné. Ve sklenících může dojít k tvorbě NO₂ z hnojiva působením půdních bakterií, když tato expozice dosáhne přibližně koncentrace 20 ppm, může nastat poškození na lilcích, okurkách a rajčatech. U rostlin pepře bylo pozorováno, že může docházet k viditelnému nebo vnitřnímu poškození, pokud je skleník vybavený propanovým nebo petrolejovými hořáky za účelem získání obohaceného atmosférického CO₂. Hořáky při spalování vytváří relativně vysokou úroveň emisí NO_x (400–2000 ppb NO a 50–500 ppb NO₂) ve skleníku a poskytují přibližně 1000 ppm CO₂ [26].

Účinky NO₂ na růst nejsou jasné, je pravděpodobné, že růst je stimulován nízkými koncentracemi (méně než 100 ppb), ale vysoké koncentrace NO₂ (více než 1 ppm) růst zpomalují [26].

3.4.2 Mechanismus působení NO₂

Při rozpouštění NO a NO₂ v extracelulární vodě uvnitř listu vznikají ve stejném poměru dusičnany (NO₃⁻) a dusitany (NO₂⁻), dále se také tvoří protony H⁺. Rostliny absorbují NO₃⁻ z kořene (důležitý zdroj dusíku), ze kterého dále metabolickou cestou syntetizují aminokyseliny a proteiny. NO₃⁻ a NO₂⁻ vzniklé z atmosférického NO₂ se také podílejí na syntéze aminokyselin a proteinů. Proto nízká koncentrace NO₂ může působit jako hnojivo pro rostlinu a tím může být podpořen růst. Zvláště tento růst podporující účinek se často vyskytuje u rostlin, které rostou na půdách s nízkým obsahem dusíku. Na druhé straně, rostliny vystavené vysoké expozici NO₂ mohou jevit příznaky viditelného poškození a sníženým růstem [26].

NO₃⁻ z atmosférického NO₂ se redukuje nejprve na NO₂⁻ pomocí nitrátové reduktázy (NaR), která se nachází v cytosolu. Dále je redukován NO₂⁻ na amonný iont (NH₄⁺) pomocí nitritreduktázy (NiR), která je umístěná v chloroplastu. NH₄⁺ iont je poté včleněn do glutamátu kombinovaným účinkem glutaminsyntetázy a glutamátsyntázy v chloroplastu a dále převeden na aminokyselinu. Aktivita těchto enzymů je vyšší ve dne než v noci. Zejména redukce NO₂⁻ na NH₄⁺ pomocí NiR vyžaduje energii redukováného ferredoxinu a ATP z fotosyntézy [26].

Je dobře známé, že NO_2^- je více toxické než NO_3^- . Rostliny obecně neakumulují NO_2^- v listech, protože aktivita NiR je přibližně dva až desetkrát vyšší než aktivita NaR ve dne. Avšak k akumulaci NO_2^- v listech může dojít při snížené aktivitě NiR, která může nastat, pokud byla rostlina vystavena působení NO_2 v noci nebo pokud rostla na půdách s nízkým obsahem dusíku [26].

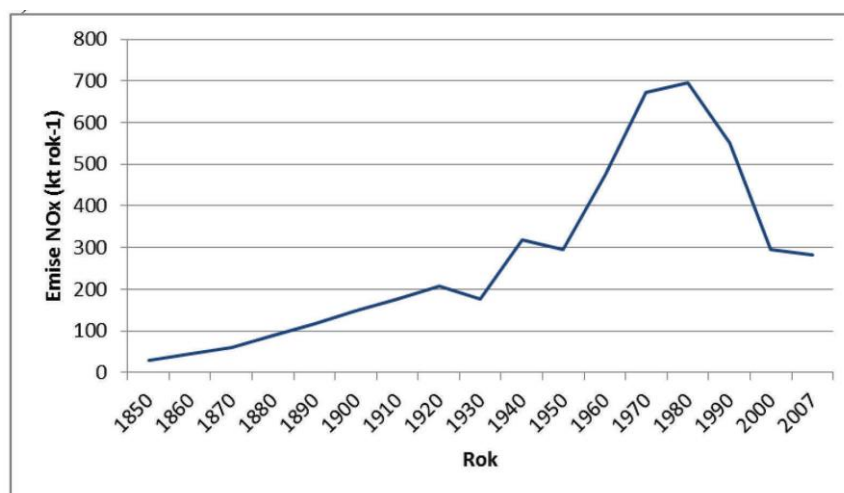
SO_2 a O_3 inhibují průběh fotosyntézy uzavřením stomat a ovlivňují fotosystém v chloroplastu, zatímco NO_2 snižuje průběh fotosyntézy bez uzavření stomat. Snížení rychlosti fotosyntézy je navíc jasné pouze tehdy, když rostliny byly vystaveny značně vysokým koncentracím NO_2 (500–700 ppb a vyšším) v krátkodobém období. Bylo zjištěno, že NO_2^- se hromadil v listu, když byla slunečnice vystavena působení NO_2 (2–4 ppm), a že naakumulovaný NO_2^- v listu se po ukončení expozice snížil. Tato změna v koncentraci NO_2^- souhlasí s inhibicí a obnovou fotosyntézy a naznačuje, že snížení rychlosti fotosyntézy může být přičítáno akumulaci NO_2^- v listu, který vznikl z atmosférického NO_2 . Vzhledem k tomu, že je známo, že NO_2^- inhibuje aktivitu karboanhydrázy, tak když je tento enzym inhibován NO_2^- je snížené zásobování CO_2 v systému fixace uhlíku. Na druhé straně bylo zjištěno, že světlo má dvě okrajové role při vývoji viditelného poškození způsobené NO_2 . Světlo by mělo potlačovat destrukci chlorofylu redukcí koncentrace NO_2^- v listech, ale má to opačný vliv, protože začínají vznikat reaktivní druhy kyslíku a ty ničí chlorofyl [26].

3.5 Vývoj koncentrací NO_x na území ČR

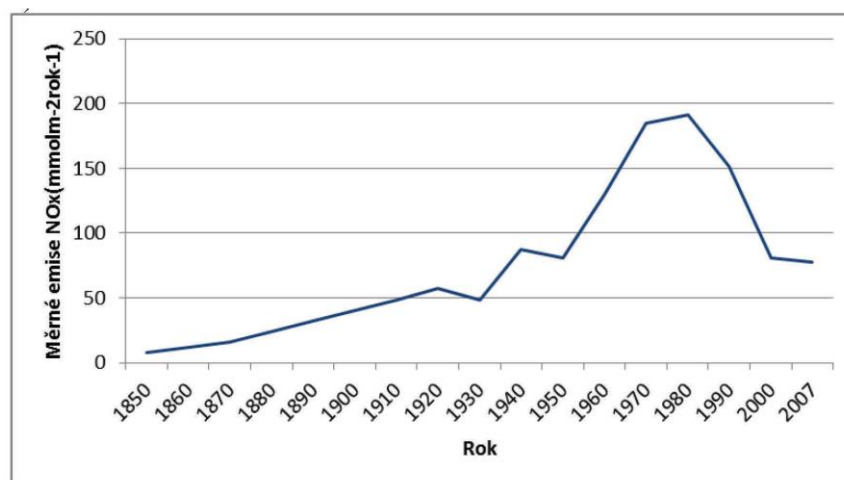
Obr. 10 a Tab. 4 ukazují, že v letech 1850–1920 se množství antropogenních emisí NO_x rostlo téměř lineárně z 30 kt.rok⁻¹ (8 mmol.m⁻².rok⁻¹) na 207 kt.rok⁻¹ (57 mmol.m⁻².rok⁻¹). Tento nárůst byl zapříčiněn rozvojem průmyslu, zejména vzestupem strojírenství, metalurgie a těžby uhlí v 2. polovině 19. století. Kolem roku 1850 patřila mezi hlavní zdroje emisí NO_x výroba energie spalováním uhlí a dřeva a činila asi $1,1 \times 10^{14}$ J.rok⁻¹. Výroba energie prudce vzrostla až na koci 19. století a ustálila se na $5-7 \times 10^{14}$ J.rok⁻¹ na dalších padesát let. Vlivem obchodní politiky Rakouska-Uherka docházelo k postupnému růstu emisí NO_x , které pokračovalo do počátku 20. století. Během 1. světové války se začal průmysl zaměřovat na výrobu zbraní, a zřejmě proto lze zvyšování emisí NO_x sledovat až do počátečního období první republiky. Poté ve 20. letech následuje k mírnému snížení emisí NO_x . Ve 30. letech lze pozorovat prudší nárůst koncentrace NO_x , kulminující v roce 1940, který zřejmě souvisel s rozvojem dopravy a zbrojního průmyslu ve druhé polovině 30. let. Počet motorových vozidel stoupl z 6986 v roce 1922 na 15250 v roce 1936 a podobně se zvyšovala také domácí produkce dopravních

prostředků (i nákladních automobilů). Mezi lety 1940 a 1950 došlo ke snížení emisí NO_x z počátečních 318 kt.rok^{-1} na 295 kt.rok^{-1} , byl to zřejmě vlivem válečných a poválených událostí [22].

a)



b)



Obr. 10: Historický vývoj emise NO_x v kt (a) a měřené emise NO_x v $\text{mmol.m}^{-2}\text{.rok}^{-1}$ (b) na území dnešní České republiky [22].

V 50. letech začala restrukturalizace československého hospodářství, které se začalo více zaměřovat na těžký průmysl (hutnictví, energetika těžba černého a hnědého uhlí, strojírenství), to mělo vliv na emise NO_x , které se začali strmě narůstat a svého maxima dosáhli v roce 1980, kdy dosáhli nejvyšších hodnot (696 kt.rok^{-1}). Od roku 1989 se emise NO_x , vlivem nižší produkce energie, optimalizace spalovacích režimů ve významných stacionárních zdrojích emisí NO_x a díky narůstajícímu podílu jaderné energie, snižují. Ke snižování emisí NO_x

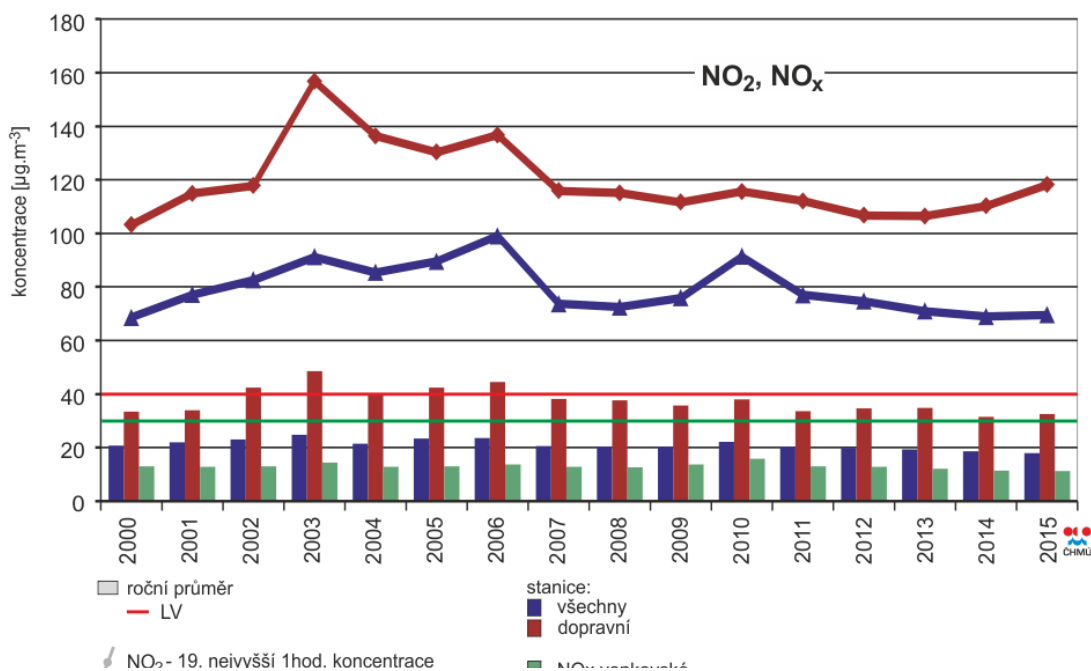
přispělo i plnění závazků, které vyplývaly z dodržování úmluvy o dálkovém znečištění ovzduší přesahující hranice států a s ní související protokol o snižování emisí oxidu dusíku. Mezi roky 1990 a 2000 nastal rychlý pokles NO_x a emise klesly o 256 kt.rok^{-1} a dosáhli v roce 2000 hodnoty kt.rok^{-1} ($81 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$), a poté pokračovalo snižování úrovně emisí na 283 kt.rok^{-1} v roce 2007, jak vidíme na Obr. 10 [22].

Tab. 4: Historický vývoj emisí NO_x v kt na území dnešní České republiky [22].

Rok	Emise NO_x
1850	30
1860	44
1870	59
1880	88
1890	118
1900	148
1910	176
1920	207
1930	176
1940	318
1950	295
1960	474
1970	673
1980	696
1990	551
1991	527
1992	698
1993	574
1994	378
1995	412
1996	366
1997	423
1998	321
1999	313
2000	295
2001	302
2002	305
2003	290
2004	292
2005	291
2006	281
2007	283

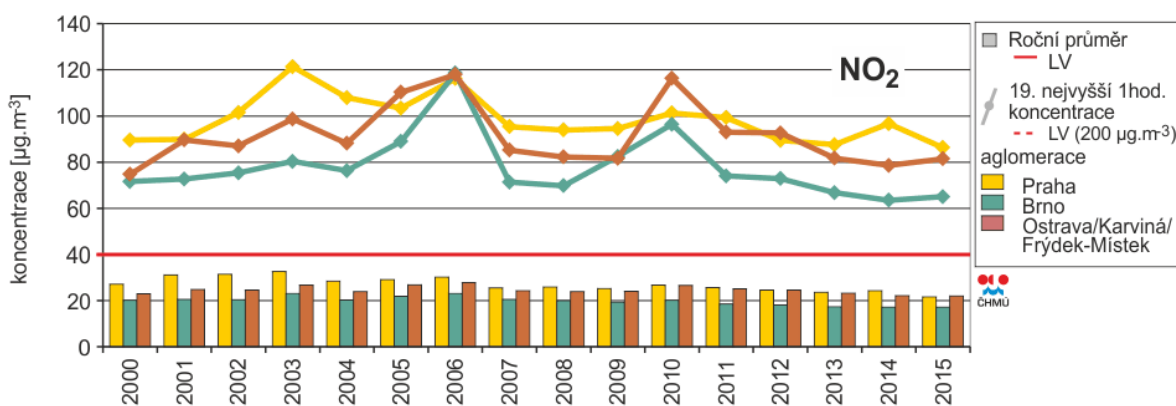
Obr. 11 ukazuje, že od roku 2000 dochází střídavě k nárůstům a poklesům průměrných ročních koncentrací. V letech 2003, 2006 a 2010 byly zaznamenány nejvýraznější nárůsty koncentrací, patrně v důsledku nepříznivých meteorologických a rozptylových podmínek, které

se v těchto letech vyskytovaly. Od roku 2011 bylo možné pozorovat pozvolna klesající trend. V roce 2015 opět došlo ke snížení průměrné roční koncentrace, ale 19. nejvyšší hodinová koncentrace mírně vzrostla [23].



Obr. 11: Trendy ročních charakteristik NO_2 a NO_x v České republice v období 2000-2015 [23].

Ve sledovaném období 2000-2015 bylo dosahováno nejvyšších hodnot v aglomeracích Praha a O/K/F-M, jak vidíme na Obr. 12. Příčinou je velmi vysoké zatížení těchto území dopravou a v případě aglomerace O/K/F-M i emisemi z průmyslu. Naopak nejnižších hodnot byl dosahováno v aglomeraci Brno [23].



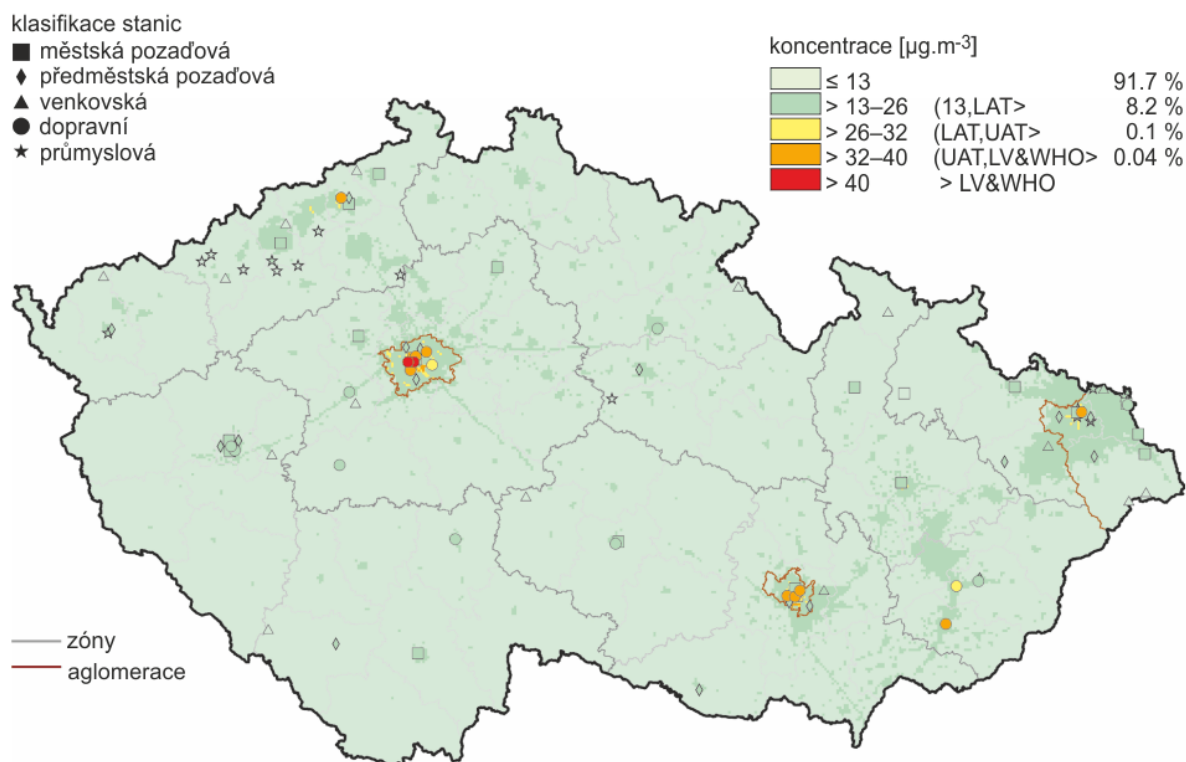
Obr. 12: Trendy ročních charakteristik NO_2 v období 2000-2015 na městských a předměstských stanicích v aglomeracích [23].

V roce 2015 došlo k překročení imisního limitu pro ochranu zdraví pouze na omezeném počtu stanic, a to převážně na dopravně exponovaných lokalitách aglomerací a velkých měst.

Z celkového počtu 93 lokal, kde byl v roce 2015 sledován oxid dusičitý, došlo na 2 lokalitách k překročení ročního imisního limitu $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Obě stanice (Praha 2-Legerova (hot spot) a Praha 5-Smíchov), kde došlo k překročení imisního limitu, jsou klasifikovány jako dopravní městské. Lze se tedy domnívat, že k překročení imisních limitů může docházet i na dalších dopravně vytižených místech, kde není prováděno měření [23].

Imisní limit $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pro hodinovou koncentraci NO_2 byl překročen na třech stanicích. Ani na jedné však nebyl dosažen maximální povolený počet 18 překročení v kalendářním roce. Na stanici Praha 2-Legerova (hot spot) došlo k 16 překročení, Plzeň-Slovany 4 překročení a Praha 5-Smíchov jedno překročení [23].

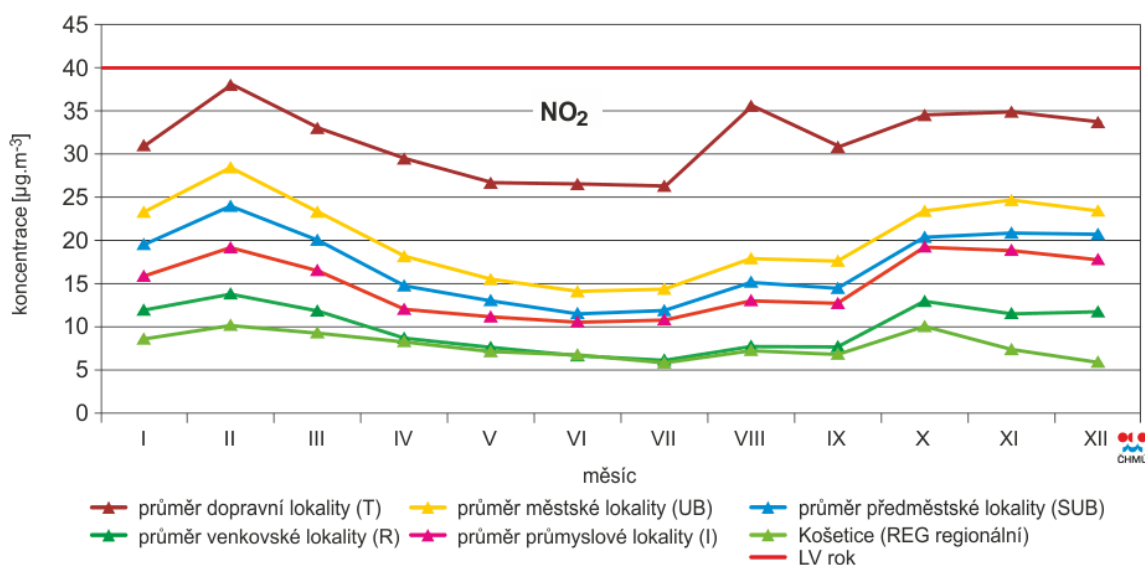
Vyšší koncentrace oxidů dusíku ve městech v porovnání s mimoměstskými lokalitami je způsobeno převážně dopravou. Na Obr. 13 lze vidět, že nejvyšších hodnot koncentrací NO_2 je dosahováno v Praze, Brně a Ostravě. Roční průměrná koncentrace je však na většině území ČR (99,9 %) nižší než $26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, tj. hodnota dolní meze pro posuzování. Zvýšené koncentrace NO_2 mohou být i v blízkosti místních komunikací v obcích s intenzivní dopravou a hustou místní dopravní sítí [23].



Obr. 13: Pole roční průměrné koncentrace NO_2 z roku 2015 [23].

Vyšší koncentrace NO_2 jsou měřeny především na dopravních lokalitách než na ostatních typech lokalit. Obr. 14 ukazuje, že v období duben až září je obecně patrný pokles

koncentrací NO_2 na všech lokalitách. Je to z důvodu vyšší intenzity slunečního záření v tomto ročním období, které má za následek fotodisociaci NO_2 na NO a O . Z produktů, které vznikly fotodisociací se za vhodných podmínek vytváří troposférický ozon, a proto jsou v období duben až září koncentrace přízemního ozonu vyšší. V srpnu 2015 byl velký nárůst průměrné koncentrace NO_2 způsoben výjimečně vysokou průměrnou měsíční koncentrací ($73,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na lokalitě Praha 2-Legerova (hot spot) [23].



Obr. 14: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací NO_2 (průměry pro daný typ stanice) v roce 2015 [23].

V roce 2015 nedošlo k překročení imisních limitů pro ochranu ekosystémů a vegetace ani na jedné z 16 venkovských stanic. Na 71 % stanic (10 lokalit ze 14), které měřily v letech 2014 a 2015, došlo v porovnání s rokem 2014 ke snížení průměrné roční koncentrace NO_x [23].

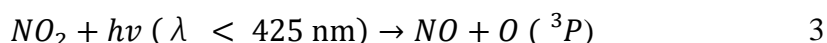
4 TROPOSFERICKÝ OZON

Molekula ozonu je tvořena třemi atomy kyslíku a za normálních podmínek jde o neviditelný jedovatý plyn s charakteristickým zápachem. Řadí se mezi nejsilnější oxidační činidla. Pojmem troposférický ozon rozumíme ozon, který se tvoří v přízemní vrstvě atmosféry cca do 10 km od zemského povrchu [27] [28].

4.1 Vznik troposférického ozonu

U troposférického ozonu neexistují žádné primární zdroje emisí. Jedná se o tzv. sekundární polutant, který vzniká komplikovanými nelineárními fotochemickými reakcemi. Prekurzory přízemního ozonu jsou oxidy dusíku, nemethanické těkavé organické látky, v globálním měřítku hrají roli i metan a oxid uhelnatý [28].

Produkce ozonu v atmosféře má původ v jedné reakci, která spočívá v adici atomu kyslíku O v základním stavu na molekulu kyslíku O₂ za přítomnosti nezávislé molekuly M (N₂, O₂, ...), která stabilizuje produkty reakce. Rovnice 3 ukazuje, jak v troposféře dochází k produkci atomárního kyslíku za pomoci fotodisociace oxidu dusičitého a oxidu dusíku při vlnových délkách <425 nm. I když jsou tyto plyny v pozadové, lidskou činností neovlivněné troposféře často přítomny v nízkých koncentracích, hrají klíčovou roli v chemii jak přirozené, tak znečištěné troposféry. Reakce 4 je jediným významným zdrojem ozonu v atmosféře a takto vzniklý ozon reaguje s NO a vzniká NO₂ podle rovnice 5 [29].



Podle uvedených reakcí dochází k vytvoření ustáleného stavu mezi NO₂, NO a O₃. Rychlost reakcí vedoucích k tvorbě O₃ je stejná jako rychlost zániku ozonu. V troposféře se O₃ kumuluje, pokud NO reaguje s radikálem HO₂ (hydroperoxylem) nebo radikálem CH₃O₂ (methylperoxylem) za vzniku NO₂. Oba tyto radikály se vznikají, jako meziproducty při oxidaci oxidu uhličitého a methanu [29].

Vznik nebo zánik ozonu nezávisí pouze na absolutních koncentracích jeho prekurzorů, ale důležitý je i jejich poměr. Při vysoké hodnotě poměru (VOC : NO_x > 5,5) dochází k tvorbě organických radikálů reakcí VOC a hydroxylových radikálů OH. Organické radikály poté

oxidují oxid dusnatý za vzniku oxidu dusičitého a ke tvorbě a kumulaci ozonu dojde následkem výše uvedených reakcí. Naopak při nízké hodnotě poměru převládá reakce hydroxylového radikálu OH s oxidem dusičitým (dochází ke vzniku kyseliny dusičné), což způsobí zpomalení vzniku ozonu z toho důvodu, že v ovzduší je nízká koncentrace oxidu dusičitého, který by se mohl zúčastnit reakce 3 a 4 [30].

Tato složitá směs anorganických i organických sloučenin je označována jako letní fotochemický nebo oxidační smog. První záznamy o tomto typu znečištění se objevili ve Spojených státech amerických, ve městě Los Angeles. Proto se tento typ smogu nazývá též „losangeleský“ [29] a vzniká především ve městech s teplým a slunečním klimatem [31]. Vzrůst populace, a s ním spojený nárůst dopravy na celém světě, vedl ve většině subtropických a tropických měst ke vzniku chronických smogových podmínek. Letní smogové epizody se běžně vyskytují i v regionálním měřítku v populačně výrazně osídlených částech světa během slunných období za podmínek stálého vysokého tlaku [31]. Ve městech dochází k odbourávání ozonu v nočních hodinách, kdy nepobíhá fotodisociační reakce, ozon je rozptylován a částečně odbouráván oxidem dusnatým. V těchto oblastech je tedy výraznější změna koncentrací ozonu s výraznými extrémy, kdy jsou maximální hodnoty dosaženy mezi 12 a 15 hodinnou v návaznosti na ranní dopravní špičku, intenzitu slunečního záření a produkci prekurzoru ozonu [30].

Nastávají situace, kdy nadlimitní koncentrace ozonu se dlouhodobě vyskytují v přírodních oblastech, které jsou zatíženy dálkovým přenosem prekurzorů ozonu. Také horské oblasti jsou zatíženy vysokými koncentracemi ozonu, díky působení intenzivnějšího slunečního záření. V těchto oblastech není kontinuální produkce oxidu dusnatého a nedochází tedy k rozkladu ozonu ale spíše k jeho kumulaci [30].

4.2 Měření troposférického ozonu na stanicích ČHMÚ

V České republice provádí měření koncentrací troposférického ozonu Český hydrometeorologický ústav. Měření probíhá na 72 lokalitách, kde se využívá metody ultrafialové absorpční fotochemie. Tato metoda je založena na absorpci záření o vlnové délce 254 nm ozonem přítomným v analyzovaném vzorku. Pod UV lampou se střídavě mění nulový – čistý vzduch a vlastní vzorek v kyvetách [13].

UV ozonové fotometry měří absorbanci světla při vlnové délce 200-300 nm, v tzv. Hartleyho pásu, které prochází kyvetou s definovanou délkou naplněnou plynným vzorkem.

Zdrojem světla ve většině případů bývá nízkotlaká rtuťová UV lampa. UV záření je měřeno dvěma různými detektory ve dvou paprskovém fotometru. Jeden je referenční detektor, který měří světlo vycházející přímo z lampy (I_0). Druhý detektor slouží k měření záření prošlé květou (I), které je více či méně zeslabené ozonem. Nosný plyn nemá žádný vliv na změnu světla, pokud jím je čistý kyslík nebo vzduch [32].

Pro tyto dvě intenzity světla je molární absorpční koeficient (A) při vlnové délce 254 nm roven $3000 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Podle Lambert-Beerova zákona pak lze při délce optické dráhy (d) zjistit koncentraci (c) ozonu dle rovnice 6 [32]:

$$I = I_0 \cdot 10^{-Acd} \quad 6$$

Musíme si však dát pozor na tlak a teplotu, protože při stejném vzorku a rozdílné teplotě může dojít ke zkreslení výsledku až o 7 %. V případě velké změny tlaku může dojít ke zkreslení až o 50 % [32].

4.3 Vliv troposférického ozonu na lidské zdraví

4.3.1 Účinky troposférického ozonu na biochemické úrovni

Vzhledem k tomu, že je ozon vysoce reaktivní a silné oxidační činidlo, může reagovat se širokou škálou buněčných složek a biologických látek [33]. Jeho reakce v biologických systémech jsou heterogenní (reakce plyn-kapalina) a bylo prokázáno, že ozon reaguje rychle, ale selektivně s mnoha organickými sloučeninami. Ozon reaguje s bioorganickými sloučeninami obsahující dvojné vazby, jako jsou nenasycené mastné kyseliny [34], které oxiduje na peroxidy mastných kyselin [35]. Ozon také oxiduje sulfhydrylové skupiny a aminoskupiny, které jsou součástí enzymů, koenzymů, proteinů a peptidů a narušuje buněčné membrány [34]. Narušení buněčných součástí způsobuje přímý i nepřímý oxidační stres respiračního epitelu. Při zánětlivé reakci nastává nepřímý oxidační stres. Pokud se ozon dostane do styku s buňkami epitelu reparačních cest v oblasti, kde nejsou kryté sekretem, dochází ke vzniku přímého oxidačního stresu. Sekret epitelu respiračních cest slouží jako určitá bariéra, která brání přímému kontaktu ozonu s epitelem. Oxidací složek může docházet k tvorbě látek, které mohou vyvolat zánětlivou reakci a tím poškodit buňky. Ke vzniku těchto látek dochází i navzdory antioxidantům přítomným v sekretu. Opakované expozice však mohou vyvolat určitý stupeň tolerance díky zesílení antioxidačních obranných mechanismů, jako je vyšší produkce hlenu, kyseliny močové, kyseliny askorbové, glutathionu a cytokinů [35].

4.3.2 Akutní expozice

Ozon má na lidský organismus převážně přechodné účinky, které nastávají po krátkodobé expozici. Mohou to být například změny v kapacitě plic nebo v propustnosti epitelu v respirační soustavě. Účinky vyvolané expozicí ozonem mohou být pozorovány několik hodin od počátku expozice a mohou trvat i několik dní po ukončení expozice [35].

Mezi krátkodobé akutní účinky ozonu patří respirační příznaky, změny funkce plic, zvýšení citlivosti dýchacích cest, záněty dýchacích cest. Tyto účinky na zdraví byly statisticky významné při koncentraci $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ při 6hodinové expozici ve skupině zdravých dospělých, u těch nejcitlivějších subjektů se vyskytlo funkční snížení až o více než 10 % během 4-5 hodin. Také při vystavení koncentraci ozonu $240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ po dobu 2 hodin může nastat u dětí i dospělých snížení plicní funkce. Není pochyb, že při vystavení koncentraci $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo vyšší po dobu 1 hodiny může dojít akutním nežádoucím účinkům, a to zejména u vnímavých jedinců [37].

Krátkodobá inhalace vyšších koncentrací ozonu může také vyvolat změny v mechanické funkci plic, které vedou k rychlejšímu a mělčímu dýchání, snížení objemů vdechovaného vzduchu, a zvýšení reaktivity dýchacího traktu na inhalační stimulanty a dráždivé látky a omezení schopnosti zhluboka se nadechnout do plic [34].

Terénní studie u dětí, dospívajících a mladých dospělých naznačují, že ke snížení funkce plic může dojít jako důsledek krátkodobé expozice ozonu při vystavení koncentracím 120 - $240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo vyšším. Respirační příznaky, zejména kašel, nastává až při koncentracích $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [37].

Řada studií prováděná na krysách a opicích, které byly vystaveny expozici ozonu po dobu několika hodin, nebo dnů prokázala změnu v dýchacím traktu, ve kterém byl zaznamenán nejmenší pozorovaný účinek v rozsahu 160 - $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tyto změny zahrnovaly bakteriální infekci plic, záněty, morfologické změny v plicích, zvýšení funkce některých plicních enzymů působících v ochraně proti oxidantům a zvýšení koncentrace kolagenu [37].

Existují důkazy o tom, že akutní expozice ozonu zvyšuje nemocnost i mortalitu. Většina studií je zaměřená na onemocnění dýchací soustavy a jejich příčin. U nemocnosti se používají různé zdravotní indikátory, podle kterých jsou posuzovány účinky ozonu. Hledají se spojení mezi úrovněmi ozonu a například školní absencí, hospitalizací s onemocněním dýchacích cest atp. Účinky ozonu na nemocnost a úmrtnost se projevují sezónní proměnlivostí s tím, že jsou vyšší během teplejšího období [36].

U akutních účinků na kardiovaskulární systém u lidí existuje méně publikovaných informací a není obecně možné oddělit účinky způsobené koncentracemi suspendovanými částicemi od těch, které jsou způsobené ozonem. V Bostonu byla provedena studie, kterou podstoupilo 603 mužů, a byla jim měřena srdeční frekvence. Protože snížená srdeční frekvence je dobře dokumentovatelný rizikový faktor srdečního onemocnění. Srdeční frekvence byla snížena o 11,5 % na přírůstek $2,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v předcházejícím 4hodinovém průměru ozonu a silnější účinek byl zaznamenán u mužů s ischemickou srdeční chorobou a u těch kteří měli vysoký tlak. Bylo zde také významné spojení mezi srdeční frekvencí a hladinami aerosolových částic [36].

4.3.3 Chronická expozice

O chronických účincích ozonu na lidský organismus je poměrně omezené množství informací, ale poměrně více údajů je o chronických účincích, které byly pozorovány u laboratorních zvířat [36].

Epidemiologické studie, které byly prováděny v jižní Kalifornii v USA, naznačují, že chronická expozice ozonu ovlivňuje základní funkce dýchací soustavy, jako je změna struktury a předčasné stárnutí plic. V pěti letech po sobě byly porovnávány dvě komunity, kde jedna komunita (Glendora) byla vystavena vyšším koncentracím ozonu a druhá (Lancaster) byla vystavena nižším koncentracím. V komunitě Glendora, která byla vystavena vyšším dávkám, byla zaznamenána klesající funkce dýchací soustavy v pětiletém období. Přesto přetrvává nejistota ohledně charakterizace expozice populací a nedostatečné kontroly možných důležitých faktorů. K podobným výsledkům však došly studie prováděné i na dalších zvířatech [38].

V kontrolované laboratorní studii byli vystaveni 7 měsíční samci opic koncentraci ozonu 250 ppb po dobu 8 hodin, a to buď každý den, nebo v sezónním modelu v celkové době 18 měsíců. Kontrolní skupina dýchala pouze filtrovaný vzduch. U opic ze sezónního modelu se výrazně zvýšil celkový obsah kolagenu v plicích. Všechny opice vystavené ozonu měly respirační bronchiolitidu s významným zvýšením souvisejících morfometrických parametrů. Jediný významný morfometrický rozdíl mezi sezónními a denními skupinami byl v objemovém podílu makrofágů. I když byly sezónně exponované opice vystaveny stejné koncentraci ozonu pouze půl dne, měly ekvivalentní morfologické změny jako ty, které byly vystaveny expozici ozonu denně. Plicní růst nebyl zcela normální ani u jedné z exponovaných skupin. Z toho vyplývá, že dlouhodobé účinky oxidačních látek znečišťující ovzduší, které mají sezónní

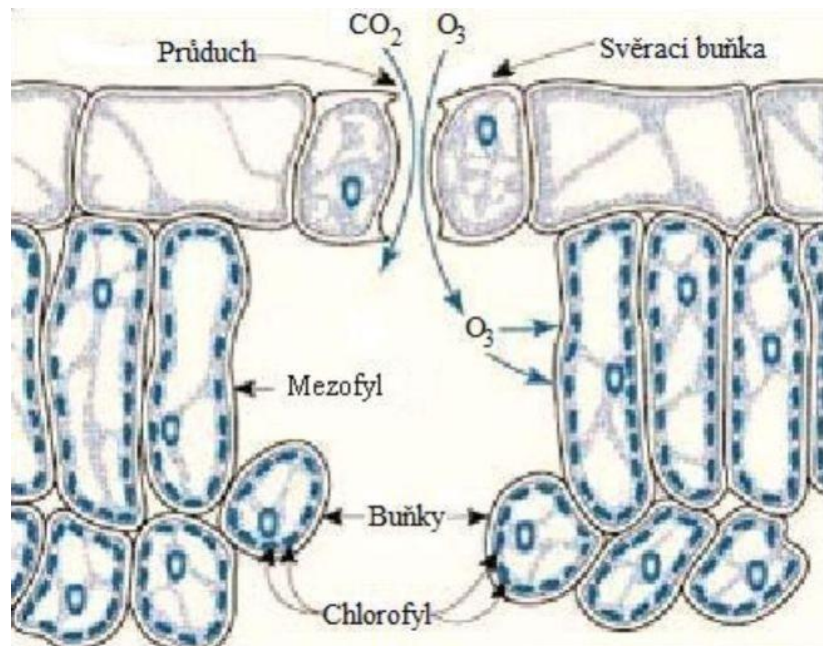
výskyt, mohou více záviset na posloupnosti střídání znečištěného a čistého vzduchu než na celkovém počtu dní znečištění [38].

4.4 Vliv troposférického ozonu na životní prostředí

4.4.1 Vliv ozonu na vegetaci

K akutním účinkům ozonu může dojít při krátkých expozicích vysokých koncentrací. Závažnější jsou však chronické účinky dlouhodobých nebo opakovaných expozic. Potenciální škodlivé účinky na dlouho žijící stromy a na pomalu rostoucí zemědělské plodiny jsou značné. Ozon poškozují jehličí a listy citlivých stromů a rostlin nejvíce tím, že rozrušuje celistvost buněčných membrán, ale zasaženy jsou také metabolické pochody (např. fotosyntéza). Ozon má také škodlivý vliv na veškeré organické tkáně živých organismů, s kterými přijde do styku. Vliv ozonu na poškození jednotlivých orgánů je dán především jejich kontaktem se znečištěným ovzduším a velikostí kontaktní plochy. Abiotické faktory, jako je vlhkost vzduchu, zásobení rostlinou vodou a koncentrace ostatních škodlivin v ovzduší (SO_2 , NO_x , NH_4 , VOCs), mají vliv na snížení konduktivity stomat organických tkání a posílení účinnosti ozonu na rostlinu. Vlivem ozonu na rostliny může docházet k viditelným příznakům jako je žloutnutí listů, defoliace, předčasné stárnutí a nekróza. Rovněž u rostlin může docházet vlivem ozonu ke snížené obranyschopnosti vůči virům, houbám, hmyzu nebo klimatickým stresům (mrazu a suchu) [39].

Do rostliny se ozon dostává skrz průduchy na listu spolu s dalšími složkami přijímaného vzduchu, jak vidíme na Obr. 15. Průduchy jsou struktury zejména na spodní straně listu vyšších rostlin, díky kterým může rostlina vyměňovat plyny, jako je oxid uhličitý, kyslík a vodní pára, s okolním prostředím. Jsou tvořeny dvěma svěřacími buňkami, mezi kterými je průduchová štěrbina. Pokud dochází k vysokému výparu vody, klesá osmotický tlak v obou buňkách průduchu, které se k sobě více přimykají, a štěrbina se zužuje. Naopak při nízkém výparu, osmotický tlak v buňkách stoupá, průduchy se oddalují a štěrbina se zvětšuje. Změny osmotického tlaku v buňce jsou způsobeny tokem draselných iontů [40].



Obr. 15: Vstup ozonu průduchem do listu [40].

Působením přízemního ozonu může docházet u rostlin k rozrušování chloroplastové struktury a narušení biosyntézy makromolekulárních sloučenin. Vliv ozonu může poté být zvýšen nebo snížen průběhem počasí. Pokud rostlina trpí nedostatkem vláhy, uzavírá listové průchody, aby zabránila ztrátám vody, dochází tím ke snížení citlivosti na ozon, tím pádem brání i vstupu ozonu do listu, čímž se omezuje poškozování [39].

Mezi dřevinami jsou na negativní působení ozonu velmi citlivé některé druhy dubu, jasanu, smrku nebo borovice. Zvýšená koncentrace přízemního ozonu omezuje přírůstky smrků v přirozených porostech, a to především u starších stromů. K snížení růstu dřevin dochází i při koncentracích nezpůsobujících viditelné poškození. Z krajinářského významu má ozon nejvýznamnější vliv na vegetaci na okrajích porostů, které jsou nejvíce exponovány a může dojít k nižšímu zastoupení citlivějších druhů na okrajích v porovnání s chráněným centrem porostu [39].

V 70. letech byly na jihu Švédska zaznamenány viditelné negativní vlivy ozonu na špenát. Také byl zjištěn negativní vliv na růst jarní pšenice, kde vyšší koncentrace ozonu v rostlinách zvyšovala koncentrace proteinů. Zvýšená expozice ozonu způsobuje vyšší koncentrace dusíku, fosforu, draslíku a hořčíku v hlízách brambor při rané sklizni [39].

Různé druhy rostlin, a dokonce odrůdy zemědělských plodin jsou rozdílně citlivé na poškození troposférickým ozonem. Reakce plodin a volně rostoucí vegetace jsou druhově specifické, liší se dle původu a místa. Data ukazují, že v důsledku zvýšené koncentrace ozonu

dochází k redukci výnosů biomasy v Evropě. Záporné vlivy ozonu na plodiny jsou větší ve Španělsku a v dalších státech Středomoří, protože v těchto oblastech silné sluneční záření urychluje sérii chemických reakcí, které vedou k tvorbě přízemního ozonu v troposféře než např. ve Velké Británii, kde není tak silné sluneční záření [39].

Ve Švédsku byly vypracovány studie, které dokazují, že ozon způsobuje ztráty na úrodě o 9 %, což vede k ročním ztrátám až 170 milionů euro. Ve Velké Británii proběhl experiment, který u nejcitlivější varianty řepky (Euro1), zaznamenal o 14 % nižší produkci semen a o 5 % nižší obsah oleje v semenech, což vedlo k celkové ztrátě 34 liber na tunu. V USA měl přízemní ozon za následek snížení produkce sóji o 10 % [39].

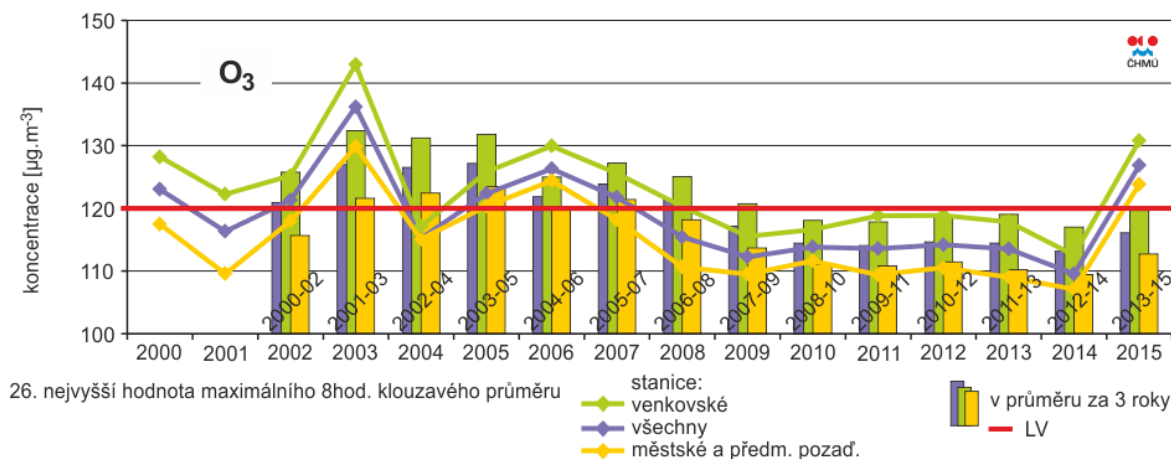
Zdá se že, pokud nedojde k omezení vzniku ozonu, mohla by se kolem roku 2100 snížit celosvětová produkce zmíněných plodin až o 12 %. Předpokládá se, že v následujících desetiletích bude docházet k významnému nárůstu množství ozonu v ovzduší [39].

4.5 Vývoj koncentrací troposférického ozonu na území ČR

4.5.1 Vývoj koncentrací troposférického ozonu za období 2000-2015

Obr. 16 ukazuje, že od roku 2000 má trend 26. nejvyššího denního maximálního 8hodinového klouzavého průměru koncentrací troposférického ozonu sestupnou tendenci. Výrazně se vymykají roky 2003 (resp. průměr za 2001-2003), 2006 (resp. průměr 2004-2006) a 2015 (resp. průměr za 2013-2015). Za celé sledované období byla 26. nejvyšší hodnota maximálního 8hodinového klouzavého průměru v roce 2003, tento rok se vyznačoval nadprůměrnými teplotami během letního období a díky tomu byly i nadprůměrné koncentrace troposférického ozonu nejen v ČR, ale i v celé Evropě. Od roku 2009 došlo k výraznému poklesu počtu překročení cílového imisního limitu $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. V roce 2014 byla 26. nejvyšší hodnota maximálního 8hodinového klouzavého průměru nejnižší za celé sledované období. Naopak v roce 2015 došlo opět k růstu koncentrací troposférického ozonu v ovzduší [28].

Mezi roky 1990 až 2015 došlo k celkovému poklesu emisí prekurzorů troposférického ozonu (VOC, NO_x , CO a CH_4) o 68,7 %, z 1 265,8 na 396,4 $\text{kt}\cdot\text{rok}^{-1}$. Emise NO_x se snížily o 70,1 % (tj. z 672,2 na 201,1 $\text{kt}\cdot\text{rok}^{-1}$), u emisí VOC došlo k poklesu o 69,6 % (tj. ze 441,0 na 134,1 $\text{kt}\cdot\text{rok}^{-1}$) a emise CO poklesly o 61,7 % (tj. ze 140,3 na 53 $\text{kt}\cdot\text{rok}^{-1}$). Nejméně poklesly emise methanu, u kterých došlo k poklesu o 39,7 % (z 12,4 na 7,5 $\text{kt}\cdot\text{rok}^{-1}$). K největším poklesům došlo především na začátku 90. let 20. století následkem restrukturalizace národního hospodářství [18].



Obr. 16: Trendy ročních charakteristik troposférického ozonu v ČR v období 2000-2015 [28].

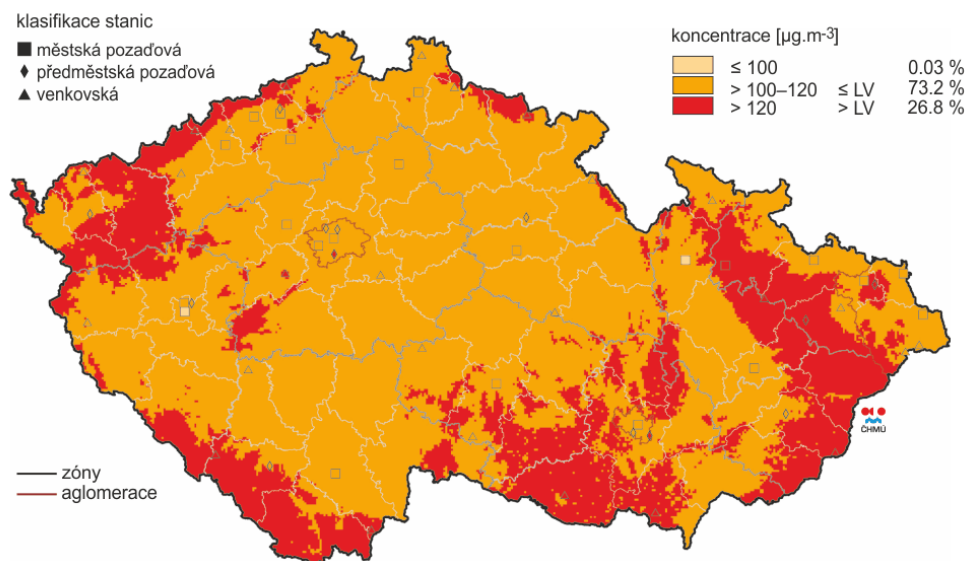
Mezi lety 2000-2015 pokračoval trend snižování prekurzorů troposférického ozonu, byl zaznamenán celkový pokles o 42 %. K nejvýznamnějšímu snížení došlo v období 2007-2008 (o 6,4 %) a v období 2008-2009 (o 7,7 %), a to z důvodu útlumu národního hospodářství, které bylo způsobeno ekonomickou krizí. V tomto období také došlo k poklesu jednotlivých emisí prekurzorů, nejvíce emise CO o 53,8 %, VOC o 44,8 %, NO_x o 43,4 % a nejméně emise CH₄ o 3,5 % [18].

4.5.2 Koncentrace troposférického ozonu v roce 2015

Za tříleté období 2013-2015 (roční imisní limit je překročen, jestliže byl maximální denní 8hodinový průměr troposférického ozonu vyšší než 120 µg.m⁻³ alespoň v průměru za 3 roky) byl imisní limit troposférického ozonu pro ochranu zdraví překročen u 22 % lokalit (tj. 16 ze 72 lokalit), tudíž v porovnání s předchozím obdobím 2012-2014 došlo ke zvýšení počtu překročení imisního limitu. Nejnižší koncentrace troposférického ozonu ze sledovaných lokalit byly změřeny na dopravních stanicích, kde byl ozon rozkládán chemickou reakcí s oxidem dusnatým. Naopak na venkovských pozadových lokalitách byly měřeny koncentrace nejvyšší [28].

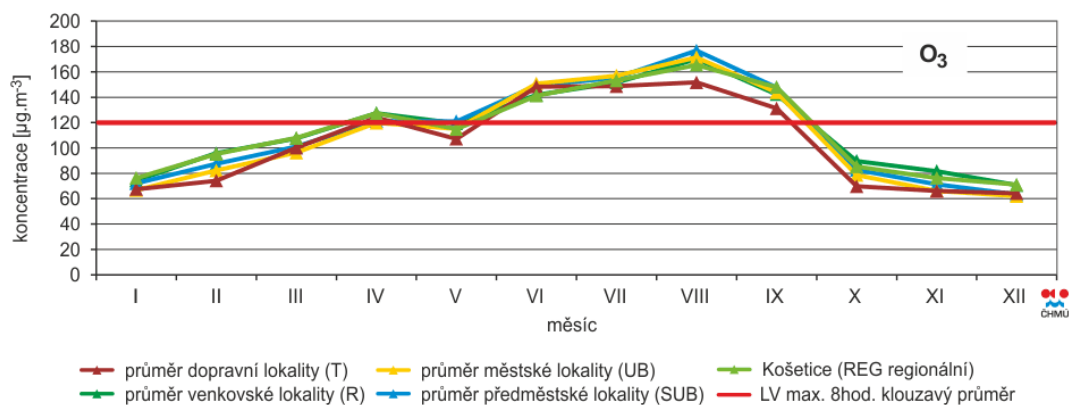
Jak ukazuje Obr. 17 v období 2013-2015 došlo k překročení imisního limitu na 26,8 % území ČR s cca 9,5 % obyvateli. Oproti předchozímu období 2012-2014 se plocha zasaženého území zvýšila o 21,2 % (z 5,6 %). Důvod vyšších koncentrací troposférického ozonu a zvětšení plochy zasaženého území bylo horké léto 2015, které vykazovalo příznivé meteorologické podmínky pro vznik a trvání vysokých koncentrací ozonu. V roce 2015 byla doporučena hodnota Světové zdravotnické organizace pro maximální denní 8hodinový klouzavý průměr O₃

($100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) překročena na celém území ČR. Dále docházelo častěji k překročení hodinové průměrné koncentrace, jejíž limit je $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [28].



Obr. 17: Pole 26. největšího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního ozonu v průměru za 3 roky (2013-2015) [28].

Obr. 18 zachycuje roční chod průměrných měsíčních koncentrací troposférického ozonu (max. 8hod. klouzavý průměr pro daný měsíc). Vidíme nárůst koncentrací v jarních a letních měsících, kdy převažují příznivé meteorologické podmínky pro vznik ozonu, jako je vysoká intenzita slunečního záření, vysoké teploty a nízká vlhkost vzduchu. Je také patrné, že nejvyšší maximální 8hodinové klouzavé průměry jsou zaznamenávány na venkovských lokalitách, kde jsou též nejčastěji překračovány hodnoty imisního limitu [28].



Obr. 18: Roční průběh průměrných měsíčních koncentrací max. 8hod. klouzavého průměru O₃ pro rok 2015 [28].

V roce 2015 došlo k meziročnímu snížení celkových emisí prekurzorů troposférického ozonu o 2,2 %. Nejvíce k tomu přispělo snížení emisí NO_x (o 3,3 %) a VOC o 2,4 %, naopak u emisí CO byl zaznamenán slabý meziroční nárůst o 2,8 % a u emisí CH₄ nedošlo k žádné změně [18].

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce přehledně shromažďuje informace k vybraným aktuálním problémům kvality ovzduší. Zaměřuje se především na problémy spojené se suspendovanými částicemi, oxidy dusíku a troposférickým ozonem v ovzduší a jejich vlivu na zdraví a životní prostředí. Práce se zabývá též zdroji těchto znečišťujících látek (popřípadě jejich vznikem). Jsou uvedeny metody jejich měření na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), charakteristika, jejich vývoj na území České republiky a zmíněn je i legislativní rámec.

Suspendované částice představují širokou třídu chemických a fyzikálních nečistot v ovzduší, které mohou mít rozměry v rozsahu od 1 nm – 100 µm. Jedná se o soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic, které mohou být organického nebo anorganického původu. V atmosféře vytváří dobře viditelné jevy, jako jsou mrak, oblak, mlha, opar, dým, kouř a další. Podle velikosti je můžeme rozdělit na hrubou (PM₁₀), jemnou (PM_{2,5}) a ultrajemnou frakci. Jejich hlavním přirozeným zdrojem jsou sopečná činnost, lesní požáry a prach vznikající zvětráváním hornin. Mezi antropogenní zdroje patří doprava, zemědělství, těžba nerostů a lokální topeniště, kde jsou spalována fosilní paliva. V ČR jsou největším zdrojem suspendovaných částic lokální topeniště. Na stanicích ČHMÚ jsou částice stanovovány metodami radiometrie, nefelometrie, gravimetrie a používány jsou i křemenné oscilační mikrováhy. V lidské organismu ovlivňují zejména kardiovaskulární a dýchací systém. Krátkodobé expozice zvýšených koncentrací částic může vyvolat kašel a ztížené dýchání. Dlouhodobé expozice mohou vést k rakovině plic, chronickému zánětu průdušek a snížení plicní funkce. Inhalace anorganických materiálů, jako je sillimanit nebo azbest může vyvolat i relativně vzácné rakoviny pohrudnice a poplicnice. U rostlin mohou suspendované částice způsobit poškození listů a stomat, předčasné stárnutí, snížení fotosyntézy a růstu. Různé hodnoty pH prachu mohou ovlivnit morfologii i fyziologii rostlin. Vývoj koncentrací PM₁₀ má v posledních letech klesající trend. Ve sledovaném období 2000-2015 došlo pouze v letech 2003, 2005 a 2006 k překročení ročního imisního limitu (40 µg.m⁻³) vlivem nepříznivých rozptylových podmínek. Během roku je dosahováno nejvyšších koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} v chladných měsících. Nejvíce zasažená je oblast aglomerace Ostrava/Karviná/ Frýdek-Místek (O/K/F-M) a to jak koncentracemi PM₁₀ tak i PM_{2,5}.

Oxidy dusíku (NO_x) nazýváme zejména směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO₂). Přirozeně tyto dusíkaté sloučeniny vznikají při biologických procesech v půdách, při

výbojích blesků, při sopečné činnosti nebo při lesních požárech. V ČR jsou nejvýznamnějšími antropogenními zdroji především doprava a sektor veřejné energetiky. K měření NO_x se na stanicích ČHMÚ využívají metody chemiluminiscence a triethanolaminové spektrofotometrie. Pro lidský organismus je výrazně toxičtější oxid dusičitý (NO_2), který může poškozovat plicní tkáň jeho oxidačními vlastnostmi. Při krátkodobé expozici NO_2 může dojít k poškození plicní tkáně, přednostně postihuje dolní cesty dýchací. Dlouhodobé expozice vyšších koncentrací NO_2 mohou způsobit fibrózu plic. Nejvíce jsou vystaveni působení NO_2 obyvatelé velkých měst, které jsou zatíženy dopravou. U rostlin při zvýšené expozici NO_2 mohou vznikat nekrotické oblasti a může být snížena fotosyntetická aktivita naopak nízké koncentrace u rostlin, které rostou na půdách s nízkým obsahem dusíku, působí jako hnojivo a prospívají růstu. Koncentrace NO_x v ovzduší prošly značným časovým vývojem. Emise NO_x začaly strmě stoupat v 50. letech minulého století rozvojem těžkého průmyslu (hutnictví, strojírenství, těžební průmysl) a svého maxima dosáhly v roce 1989. Mezi lety 1990 a 2000 nastal rychlý pokles emisí zavedením nové legislativy. Ve sledovaném období 2000-2015 došlo v letech 2003, 2006 a 2010 k překročení ročního imisního limitu ($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Během roku jsou nižší koncentrace NO_x měřeny v jarních a letních měsících. Nejvíce zatížené oblasti NO_x jsou Praha, Brno a Ostrava.

Troposférický ozon nemá žádné primární zdroje emisí, a proto se řadí mezi sekundární polutanty. Vznik ozonu je popsán komplikovanými fotochemickými reakcemi, které probíhají v přízemní vrstvě atmosféry. Na vzniku ozonu se podílejí jeho prekurzory, mezi které řadíme zejména NO_x , nemethanické těkavé organické látky, methan (CH_4) a oxid uhelnatý (CO). Spolu s dalšími anorganickými a organickými látkami se podílí na tvorbě fotochemického smogu, který vzniká především ve městech s teplým a slunečným počasím, navíc při značné dopravní zátěži. Na stanicích ČHMÚ se využívá k měření troposférického ozonu metoda ultrafialové absorpční fotochemie. V lidském organismu může ozon reagovat se širokou škálou buněčných složek a biologických látek. Mezi krátkodobé akutní účinky ozonu na lidský organismus patří změny funkce plic, zvýšení citlivosti dýchacích cest, snížení objemu vdechovaného vzduchu a záněty dýchacích cest. Dlouhodobé expozice ozonu mohou vyvolat předčasné stárnutí plic a změnu struktury plic, jako je zvýšený obsah kolagenu v plicích. U vegetace jsou problémem především dlouhodobé nebo opakované expozice ozonu mohou způsobit snížení fotosyntézy, žloutnutí listů a defoliaci. U citlivých dřevin, jako jsou některé druhy dubu, jasanu smrku borovice, mohou zvýšené koncentrace přízemního ozonu omezit jejich přírůstek. Vývoj koncentrací troposférického ozonu na území ČR je proměnlivý. V obdobích 2001–2003, 2004–

2006 a 2013–2015 jsou koncentrace ozonu vyšší než dlouhodobý imisní cíl $120 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$. Během roku jsou vyšší koncentrace ozonu hlavně v jarních a letních měsících, kdy jsou příznivé meteorologické podmínky pro jeho vznik.

I když koncentrace vybraných znečišťujících látek od 90. let minulého století značně poklesly, stále můžeme koncentrace snižovat vhodnými omezeními. Vyhlášení nízkoemisních zón, v oblastech, která jsou nejvíce zasažena suspendovanými částicemi, NO_x a troposférickým ozonem. Do těchto zón je omezován vjezd vozidlům způsobujících větší znečištění. Mezi další omezení může patřit podpora veřejné dopravy nebo automobilů s hybridním pohonem a elektro-pohonem. Podpora zeleně ve městech, která může působit jako filtr k zachycování jemných částic prachu. Kropení silnic v letních měsících, aby nedocházelo k víření poletavého prachu. V energetice a průmyslu dochází k zavádění nových technologií pro omezování emisí NO_x a suspendovaných částic.

6 POUŽITÁ LITERATURA

[1] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Grafická ročenka 2015: Úvod* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/Obsah_CZ.html

[2] ČESKO. Zákon č. 201/2012 o ochraně ovzduší. In: Sbíрка zákonů České republiky. 2012, částka 69, s. 2785-2848. ISSN 1211-1244. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/201-2012_ZakonOOchraneOvzdusi.pdf

[3] ČESKO. Vyhláška č.330/2012 o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. In: Sbíрка zákonů České republiky. 2012, částka 121, s. 4177-4192. ISSN 1211-1244. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/330-2012_ImisniVyhlaska.pdf

[4] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Suspendované částice (aerosol)* [online].2010 [cit. 2017-04-18] Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecistenisusp_castice.pdf

[5] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009, 121-139. ISBN 9788024615981.

[6] HARRISON, Roy M. *Pollution: Causes, Effects, and Control*. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, c1996. ISBN 0854045341.

[7] HINDS, William C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. New York: J. Wiley, c1982. ISBN 0471087262.

[8] RYCHLÍKOVÁ, Eva. *Epidemiologická analýza vlivu znečištění ovzduší na zdraví v regionálním měřítku* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-04-18]. s.63. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/113272/>. Dizertační práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce MUDr. Radim Šrám, DrSc.

[9] HILL, Marquita K. *Understanding Environmental Pollution*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 9780521736695.

[10] INTEGROVANÝ REGISTR ZNEČIŠŤOVÁNÍ. *Polétavý prach (PM10)* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://www.irz.cz/irz/repository/latky/poletavy_prach.pdf

- [11] BENCKO, Vladimír, Jaroslav NOVÁK a Miloš SUK. *Zdraví a přírodní podmínky: medicína a geologie*. Praha: Dolin, 2011, s. 398. ISBN 9788090504707.
- [12] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Grafická ročenka 2015: Suspendované částice* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV1_PM_CZ.html
- [13] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Komentář k souhrnnému ročnímu tabelárnímu přehledu* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-06-1]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/pdf/kom.pdf
- [14] INTEGROVANÝ REGISTR ZNEČIŠŤOVÁNÍ. *Polétavý prach* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: https://www.irz.cz/dokumenty/irz/metody_mereni/ovzdusi/poletavy_prach.pdf
- [15] DOCKERY, Douglas and C. A. POPE III. Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annu. Rev. Public Health* [online]. 1994 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.pu.15.050194.000543>
- [16] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Zdravotní důsledky znečištění ovzduší* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdravotni_dusledky_znecistení_ovzdusi/\\$FILE/000-Zdravotni_rizika_2015-20170105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdravotni_dusledky_znecistení_ovzdusi/$FILE/000-Zdravotni_rizika_2015-20170105.pdf)
- [17] KUMAR, Rai P. *Impacts of Particulate Matter Pollution on Plants: Implications for Environmental Biomonitoring*. *Ecotoxicology and environmental safety* [online]. 2016, roč. 129, s. 120-136 [cit. 2017-06-18]. ISSN 0147-6513. DIO: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651316300719?via%3Dihub>
- [18] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Zpráva o životním prostředí České republiky v roce 2015* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_o_stavu_zivotního_prostředí_publicace/\\$FILE/SOPSPZP-Zprava_ZP_CR_2015-20170301.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_o_stavu_zivotního_prostředí_publicace/$FILE/SOPSPZP-Zprava_ZP_CR_2015-20170301.pdf)
- [19] INTEGROVANÝ REGISTR ZNEČIŠŤOVÁNÍ. *Oxidy dusíku (NO_x/NO₂)* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/79>
- [20] ČISTÉ NEBE. *Oxid dusičitý* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z:

<http://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/10-oxid-dusicity-no2>

[21] EKOLOGICKÉ CENTRUM MOST. *Znečišťující látky v ovzduší a jejich škodlivost I. SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁* [online]. [2013] [cit. 2017-06-14]. Dostupné z:

http://www.ecmost.cz/clanky.php?page=znecistujici_latky

[22] ZAPLETAL, Miloš. *Historický vývoj atmosférické depozice síry a dusíku v České republice*. Opava: Slezská univerzita, Filozoficko-přírodovědecká fakulta, Ústav historických věd, 2014. ISBN 9788075100856.

[23] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Grafická ročenka 2015: Oxidy dusíku* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV3_NOx_CZ.html

[24] KUPKOVÁ, Zdeňka a Luděk BENEŠ. Chemické vlastnosti, biologické účinky a metody detekce biologického oxidu dusnatého. *Chemické listy* [online]. 2004, č. 79, s. 116-122 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z:

http://www.chemicke-listy.cz/common/content-volume_98-year_2004.html

[25] MANAHAN, Stanley E. *Fundamentals of Environmental and Toxicological Chemistry: Sustainable Science*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, c2013. ISBN 9781466553163.

[26] OMASA, Kenji, Hiharu SAJI, Shohab YOUSSEFIAN a Noriaki KONDO. *Air Pollution and Plant Biotechnology: Prospects for Phytomonitoring and Phytoremediation*. S.l.: Springer Verlag, Japan, 2002. ISBN 9784431683902.

[27] OSTRAVSKÁ UNIVERZITA. *Ostravská Univerzita* [online]. [2005] [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/Student/OVSE_tex.pdf

[28] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Grafická ročenka: Přízemní ozon*. [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z:

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV4_O3_CZ.html

[29] FIALA, Jaroslav a Dušan ZÁVODSKÝ. Chemické aspekty znečištěného ovzduší. *Kompendium ochrany kvality ovzduší*. Ed. Jiří Kurfürst. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2008, s. 267-309. ISBN 9788086832388.

[30] CENIA. *Znečištění ovzduší přízemním ozonem* [online]. [2007] [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://www.cenia.cz/web/www/cenia-akt-tema.nsf/\\$pid/MZPEBFL8NIS5](http://www.cenia.cz/web/www/cenia-akt-tema.nsf/$pid/MZPEBFL8NIS5)

- [31] HOLOUBEK, Ivan. *Troposférická chemie*. Brno: Masarykova univerzita, 2005. ISBN 8021036567.
- [32] VÉDLOVÁ, Petra. *Tištěný ozonový dozimetr* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-04-26]. 51 s. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/58506/DP_Vedlova.pdf?sequence=7.
- Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce doc. Ing. Michal Veselý, CSc.
- [33] European Environment. Health Effects of Exposure to Ozone [online]. *Tropospheric Ozone in the European Union*. 1998 [cit. 2017-05-03]. ISBN: 9282856720. Dostupné z:
<https://www.eea.europa.eu/publications/TOP08-98/page010.html>
- [34] TILTON, Beverly E. Health Effects of Tropospheric ozone. *Environmental Science & Technology* [online]. 1989. roč. 23, č. 3, s. 257-263 [cit. 2017-06-08]. ISSN 0013936X. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es00180a002>
- [35] ŘEZÁČKOVÁ, Jana. *Vliv přízemního ozonu na kardiovaskulární a respirační onemocnění lidí žijících v Praze, v letech 2002-2006* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-06-08]. 60 s. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/56989/>. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Iva Hůnová, CSc.
- [36] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air Quality Guidelines Global Update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization, c2006. ISBN 9289021926
- [37] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Air Quality Guidelines for Europe*. 2nd edition. Copenhagen: World Health Organization, c2000. ISSN 03782255
- [38] LIPPMANN, Morton. Health Effects of Ozone a Critical Review. *Taylor & Francis Online* [online]. 2012, roč. 35, č. 5, s. 672-695, [cit. 2017-06-12]. DOI: 10.1080/08940630.1989.10466554. Dostupné z:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08940630.1989.10466554>
- [39] VÝZKUMNÝ ÚSTAV ROSTLINÉ VÝROBY. Monitoring imisí: Kauzální monitoring vlivu imisí na zemědělskou výrobu. [online]. 2011 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z:
<https://sites.google.com/a/eto.vurv.cz/monitoring-imisi/monitoring-imisi/vyzkumna-zprava>

[40] BYSTRIANSKÝ, Martin. *Vliv ozónu na vegetaci* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-04-22]. 24 s. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/83039/>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Iva Hůnová, CSc.