UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022 Jakub Vobořil

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Vybrané aspekty produkce plynů ovlivňujících klimatické změny

Bakalářská práce

2022 Jakub Vobořil

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Jakub Vobořil**
Osobní číslo:	**C19168**
Studijní program:	**B0588A130001 Chemie a technologie ochrany životního prostředí**
Téma práce:	**Vybrané aspekty produkce plynů ovlivňujících klimatické změny**
Zadávající katedra:	**Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši k zadanému tématu s ohledem na stav od nedávné minulosti do současnosti. Pozomost zaměřte na příklady významných faktorů v kontextu s mezinárodně diskutovanými tématy, studovanými jevy a doporučovanými opatřeními.

2. Získané poznatky o zdrojích, produkci a účincích diskutovaných plynů na životní prostředí a případně i na zdraví vyhodnoťte v souvislosti s možnou reaktivitou zúčastněných látek, jejich chemickými přeměnami, případnými mechanizmy, koncentracemi apod. Vyjádřete se alespoň rámcově rovněž k stavu diskutovaného tématu v ČR.

3. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 „Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací“ v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr. Ing. Ladislav Novotný, DrSc.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Konzultant bakalářské práce: **Mgr. Gabriela Kuchtová**

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2022**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc. v.r.
děkan

prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2022

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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 22.06.2022

Jakub Vobořil

PODĚKOVÁNÍ

Největší poděkování patří mé rodině za psychickou podporu při psaní bakalářské práce, a hlavně během studia. Neméně bych chtěl také poděkovat vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Ladislavu Novotnému, DrSc. za vstřícný přístup a cenné rady k práci a také Mgr. Gabriele Kuchtové za přínosné konzultace.

ANOTACE

Práce je zaměřena na vybrané aspekty produkce plynů ovlivňujících klimatické změny. Je zde obecně pojednáváno o komplexu faktorů působících na zemské klima a o roli plynů v životním prostředí. Pozornost je věnována tzv. skleníkovým plynům a specifickým plynným složkám. V práci jsou dále uvedeny vybrané příklady procesů spojených s plyny v životním prostředí. Závěrem je popsána ochrana ovzduší a prostředí s přihlédnutím na situaci v České republice.

KLÍČOVÁ SLOVA

skleníkové plyny, klimatická změna, znečištění ovzduší, globální oteplování

TITLE

Selected Aspects of Gas Production Affecting Climate Change

ANNOTATION

The work is focused on selected aspects of gas production affecting climate change. There is a general discussion of the complex of factors affecting the Earth's climate and the role of gases in the environment. Attention is paid to the so-called greenhouse gases and specific gaseous components. The thesis also presents selected examples of processes related to gases in the environment. Finally, the protection of the air and the environment is described, considering the situation in the Czech Republic.

KEYWORDS

Greenhouse gases, climate change, air pollution, global warming

OBSAH

OBSAH 8
SEZNAM VYBRANÝCH ZKRATEK 10
SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK 11
0. ÚVOD 13
1. ROLE PLYNŮ V ŽIVOTNÍM PROSTŘEDÍ 14
1.1 PLYNNÉ SLOŽKY V ATMOSFÉŘE 14
1.2 PLYNNÉ SLOŽKY V LITOSFÉŘE 16
1.3 PLYNY VE VODNÍM PROSTŘEDÍ 19
1.4 ZVLÁŠTNÍ VÝZNAM SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ 22
2. SKLENÍKOVÉ A SPECIFICKÉ PLYNNÉ SLOŽKY 26
2.1 PŘÍRODNÍ ZDROJE A JEJICH PROJEVY 26
2.2 ANTROPOGENNÍ ZDROJE A JEJICH VLIVY 27
2.2.1. Opatření k zamezení úniku 29
2.3 SPECIFICKÉ PLYNY 31
2.3.1. Radon (Rn) 31
2.3.2. Ozon (O_3) 34
3. PŘÍKLADY PROCESŮ SPOJENÝCH S PLYNY V ŽIVOTNÍM PROSTŘEDÍ 37
3.1 PLYNOVÉ CYKLY 37
3.1.1. Koloběh vody 37
3.1.2. Cyklus vodíku (H_2) 38
3.1.3. Cyklus kyslíku (O_2) 38
3.1.4. Cyklus uhlíku (C) 39
3.1.5. Cyklus dusíku (N_2) 39
3.1.6. Cyklus síry (S) 40
3.2 PŘÍKLADY FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÝCH MECHANISMŮ 41
3.2.1. Příklad reakce fotochemické a radikálové 41
3.2.2. Příklad reakce organických látek 42
3.2.3. Reakce jaderné 42
3.2.4. Příklad reakce acidobazické 42
3.3 BIOLOGICKÉ A ZDRAVOTNÍ PŮSOBENÍ 44
3.3.1. Pevné částice (PM) 44
3.3.2. Přízemní ozon (O_3) 45
3.3.3. Oxid dusičitý (NO_2) 45
3.3.4. Oxid siřičitý (SO_2) 45

3.3.5. Oxid uhelnatý (CO) 45
3.4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – PŮSOBENÍ SO_X (JAKO SLOŽKY KYSELÉHO DEŠTĚ) NA ROSTLINY 46
3.4.1. Úvod 46
3.4.2. Průběh experimentu 46
3.4.3. Závěr experimentu 48
4. OCHRANA OVZDUŠÍ A PROSTŘEDÍ 49
4.1 LEGISLATIVA A REGULACE 49
4.2 UDRŽITELNÝ ROZVOJ 52
4.2.1. Historie udržitelného rozvoje 52
4.2.2. Agenda 21 a indikátory udržitelného rozvoje 53
4.2.3. Shrnutí 55
4.3 STAV PROBLEMATIKY V ČR 56
4.3.1. Stav ovzduší v ČR v roce 2021 56
5. ZÁVĚR 62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 63

SEZNAM VYBRANÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
CFC	chlor-fluorované uhlovodíky
HCFC	částečně halogenované uhlovodíky
PM_{10}	prachové částice s průměrem 10 μm
$PM_{2,5}$	prachové částice s průměrem 2,5 μm
SO_X	oxidy síry
NO_X	oxidy dusíku
VOC	těkavé organické látky
POP	perzistentní organické látky
USD	americký dolar
GHG	skleníkové plyny

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Seznam obrázků

Obrázek 1: Změna teploty s výškou v atmosféře [1] 14
Obrázek 2: Stratifikace Země [91] 16
Obrázek 3: Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální hlinité půdy (obj. %) [92] 17
Obrázek 4: Tvorba a emise methanu z vlhkých půd [11] 18
Obrázek 5: Rozložení zásob vody na Zemi [16] 19
Obrázek 6: Teplotní závislost hustoty vody [18] 20
Obrázek 7: Zdroje a výdaje kyslíku v rybniční vodě (úrodný, letní období) [22] 21
Obrázek 8: Vztah kyslíku rozpuštěného ve vodě k teplotě [22] 21
Obrázek 9: Vertikální stratifikace (rozvrstvení) rozp. O_2 a CO_2 (vysoká produktivita, letní stagnace) [20] 22
Obrázek 10: Porovnání přirozeného skleníkového efektu a efektu podpořeného vyšší koncentrací skleníkových plynů v atmosféře [24] 23
Obrázek 11: Spektrum slunečního záření pro přímé světlo na horní hranici zemské atmosféry i na hladině moře [27] 24
Obrázek 12: Graf nárůstu hladin CO_2 v atmosféře od roku 1000 našeho letopočtu [29] 25
Obrázek 13: Keelingova křivka koncentrací CO_2 v atmosféře naměřená na observatoři Mauna Loa (1958-2021) [30] 25
Obrázek 14: Podíl sektorů na celkových emisích SO_X (2019) [35] 28
Obrázek 15: Podíl sektorů na celkových emisích NO_X (2019) [35] 29
Obrázek 16: Podíl sektorů na celkových emisích CO (2019) [35] 29
Obrázek 17: Schéma technologické linky ReNOx [37] 30
Obrázek 18: Protiproudý bezvýplňový absorbér [37] 31
Obrázek 19: Přírodní rozpadové řady thoria ^{232}Th a uranu ^{235}U a ^{238}U [46] 32
Obrázek 20: Vstup radonu do domu [51] 33
Obrázek 21: Průměr objemové aktivity radonu v obcích ČR [48] 34
Obrázek 22: Příklad ozonové izoplety [52] 35
Obrázek 23: Pole 26. nejvyššího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního ozonu v průměru za 3 roky (2018-2020) [35] 36
Obrázek 24: Hydrologický cyklus [93] 37
Obrázek 25: Koloběh vodíku v atmosféře [44] 38
Obrázek 26: Koloběh kyslíku v atmosféře [44] 38
Obrázek 27: Koloběh uhlíku v atmosféře [44] 39
Obrázek 28: Koloběh dusíku v atmosféře [44] 39
Obrázek 29: Koloběh síry v atmosféře [44] 40
Obrázek 30: Příklad propojení mezi koloběhy [58] 40
Obrázek 31: Kompletní schéma cyklu kyselého deště [61] 43
Obrázek 32: Zahájení experimentu 46
Obrázek 33: Pozorování odpařování 47
Obrázek 34: Úbytek objemů kyselin 47
Obrázek 35: Výsledný efekt po aplikaci na papírový kapesník 48
Obrázek 36: Pilíře udržitelného rozvoje [95] 53
Obrázek 37: Schéma cyklu interakcí mezi změnou klimatu a udržitelným rozvojem [86] 56
Obrázek 38: Měsíční úhrny srážek v roce 2021 v porovnání s normálem 1981-2010 [89] 57

Obrázek 39: Průměrné měsíční teploty vzduchu v roce 2021 v porovnání s normálem 1981-2010 [89] 57
Obrázek 40: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací PM_{10} (průměry pro všechny stanice), 2021 [89] 58
Obrázek 41: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací $PM_{2,5}$ (průměry pro všechny stanice), 2021 [89] 58
Obrázek 42: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací O_3 (max. denní 8hod. klouzavý průměr; průměry pro stanice), 2021 [89] 59
Obrázek 43: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací NO_2 (průměry pro stanice), 2021 [89] 59
Obrázek 44: Vývoj průměrných 24 h koncentrací PM_{10} na stanicích pro daný typ stanic a celorepublikového průměru teploty a ventilačního indexu, červenec–prosinec 2021 [89] 60

Seznam tabulek

Tab. 1: Koncentrace plynných složek troposférického vzduchu [4] 15
Tab. 2: Přehled hlavních směrnic pro ochranu a zlepšení kvality ovzduší EU [35] 49
Tab. 3: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení [33] 51
Tab. 4: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [33] 51
Tab. 5: Přehled indikátorů Komise OSN pro TUR: Environmentální – ovzduší [83] 54
Tab. 6: Kmenový soubor indikátorů OECD: Klimatické změny [83] 55

0. ÚVOD

Klima neboli podnebí je dlouhodobý stav počasí, který není pro všechny oblasti na Zemi stejný. Podnebí se dělí na podnebné pásy, které v závislosti na zeměpisné poloze mění svoje charakteristiky. Nejvýznamnějšími jsou průměry teploty vzduchu a průměrné úhrny srážek. Změny klimatu jsou na rozdíl od počasí dlouhodobou záležitostí.

Na zemské klima působí celá řada faktorů, ať už pozitivních tak i negativních. Sledování a posuzování těchto faktorů je významné, protože většina živých organismů je v přímém kontaktu s ovzduším, a tím i s případným negativním jevem. Příkladem může být narušená funkce fotosyntézy u rostlinstva nebo zdravotní komplikace u živočichů.

Znečišťování ovzduší je nejčastěji způsobeno vnášenými plyny, které mají toxické vlastnosti nebo vysokou koncentraci. Zdroje znečišťování se nejčastěji dělí na přírodní a antropogenní. Za přírodní zdroje je považována např. vulkanická činnost, lesní požáry apod. Antropogenní znečišťování znamená veškerá produkce z lidské činnosti a lidských sídel. Patří sem provoz automobilů se spalovacími motory, produkce polutantů z topenišť atd. Dalším významným dělením je rozlišení zdrojů znečišťování dle pohyblivosti na stacionární a mobilní. Polutanty se dělí na primární, kdy vnášený plyn působí přímo ve své počáteční formě, a na sekundární, u kterých se toxický vliv projeví až po určité fyzikálně-chemické přeměně.

Jednou z cest ochrany ovzduší a prostředí jsou regulace. V České republice máme kvalitní legislativní rámec v čele se zákonem o ochraně ovzduší. Jsme také součástí Evropské unie, která klade na péči a ochranu životního prostředí značný důraz. Změna klimatu je ale celosvětový problém.

Cílem bakalářské práce je sumarizovat informace a údaje o rolích plynů v životním prostředí s přihlédnutím na klimatické změny a vyhodnotit je v souvislosti s potřebami udržitelného rozvoje a kvality ovzduší v České republice.

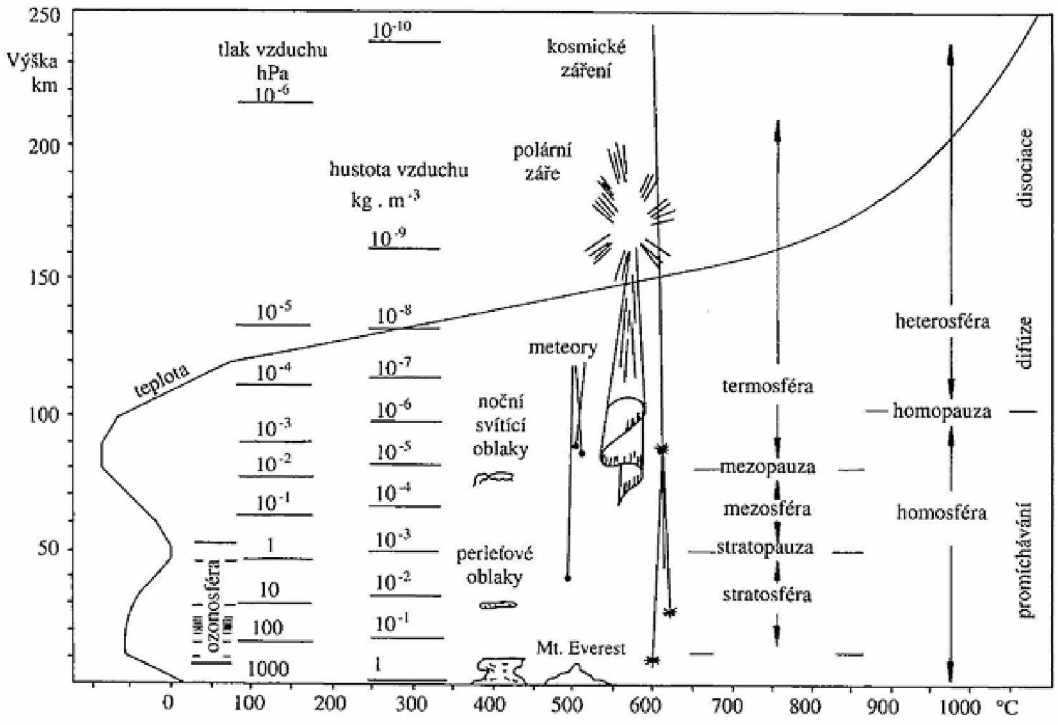
1. ROLE PLYNŮ V ŽIVOTNÍM PROSTŘEDÍ

Plyny hrají v životním prostředí obrovskou roli, ať už pozitivní tak i negativní. Byť se jedná o látky specifického skupenství a očekávali bychom jejich působení pouze v atmosféře, mají i významný podíl na dějích probíhajících v hydrosféře a litosféře Země. Zvláštní skupinou plynů jsou tzv. skleníkové plyny, kterým je zde také věnována pozornost.

1.1 PLYNNÉ SLOŽKY V ATMOSFÉŘE

Atmosféru lze nejvýstižněji označit jako vzdušný obal Země. Není tvořena pouze plynným prostředím, ale obsahuje také soubory rozptýlených tuhých a kapalných částic. Vlastnosti atmosféry se s rostoucí výškou od povrchu země značně mění, a proto bylo zavedeno vertikální členění atmosféry na tyto vrstvy:

- Troposféra (přibližně do 12 km od zemského povrchu),
- Stratosféra (12-50 km),
- Mezosféra (50-80 km),
- Termosféra (80-320 km),
- Exosféra (nad 320 km).



Obrázek 1: Změna teploty s výškou v atmosféře [1]

Na obrázku č. 1 je znázorněno kolísání teploty s rostoucí výškou od zemského povrchu. V termosféře to může být až 1500 °C, což je dáno vysokou kinetickou energií molekul, které již unikají z atmosféry. Ve výškách nad 800 km dochází k překonání zemské gravitační síly a

k přestupu do volného vesmíru. Dále je patrný pokles tlaku (vlivem snižující se účinnosti gravitace) a významné jevy atmosféry (např. výskyt polární záře) [1; 2; 3].

Z hlediska ochrany ovzduší a obecně s pojmem „ovzduší" souvisí pouze nejspodnější vrstva atmosféry – troposféra. Hlavním důvodem tohoto faktu je přímý kontakt troposféry s organismy a ekosystémy. Zároveň zde dochází k hromadění vzdušné vlhkosti, respektive k formování aktuálního stavu klimatického systému (tj. počasí). Troposféru lze z chemického hlediska dělit na:

- směs termodynamicky dokonalých plynů (tj. suchá a čistá složka troposféry),
- vodní složku (vodní pára, kapky, led),
- aerosolové částice [1; 2; 3].

Složení a koncentrace čistého (troposférického) vzduchu jsou uvedeny v tab. č. 1.

Tab. 1: Koncentrace plynných složek troposférického vzduchu [4]

Složky	Koncentrace [ppm obj.]	Koncentrace [μg/m^3]	Průměrná doba setrvání
Dusík N_2	$7{,}808.10^5$	$9{,}2.10^8$	2.10^7 roků
Kyslík O_2	$2{,}095.10^5$	$2{,}84.10^8$	10^4 roků
Voda H_2O	$4 - 40.10^3$	$3{,}5.10^6$	9 dnů
Oxid uhličitý CO_2	360	$6{,}9.10^5$	10^2 roků
Oxid uhelnatý CO	0,1	120	0,3 roku
Methan CH_4	1,7	1250	5 roků
Vyšší uhlovodíky	0,001	0,001	dny
Oxid dusný N_2O	0,3	600	4 roky
Oxid dusnatý NO	0,0002	0,3	9 dnů
Oxid dusičitý NO_2	0,0005	1	10 dnů
Amoniak NH_3	0,003	2,5	6 dnů
Ozon O_3	0,025	50	0,3 roku
Argon Ar	$9{,}34.10^3$	$1{,}6.10^7$	?
Neon Ne	18,2	$1{,}6.10^4$	10^9 roků
Krypton Kr	1,14	4100	?
Helium He	5,2	2800	10^7 roků
Radon Rn	6.10^{-14}	1.10^{-9}	5 dnů

V tabulce je také uvedena velmi významná veličina – průměrná doba setrvání látky v ovzduší. Pro ideální a dokonalé mísený rezervoár lze tuto veličinu vyjádřit jako podíl množství látky v rezervoáru ku množství látky vstupující/vystupující. V reálném systému ale homogenita prostředí není splněna nikdy, proto průměrnou dobu setrvání nelze chápat jako

konstantu pro danou látku. Například dusík (N_2) nebo vzácné plyny (Ne) mají velmi vysokou průměrnou dobu setrvání v ovzduší – je to dáno velmi nízkou reaktivitou (Ne je zcela inertní). Významným ovlivňujícím faktorem je intenzita sluneční záření a množství srážek. Proto například amoniak (NH_3), který je snadno z atmosféry vymýván, má vůči ostatním nízkou dobu setrvání. Obecně lze také říci, že krátká doba setrvání je dána výrazným kolísáním koncentrace dané látky v atmosféře. Tyto poznatky vysvětlují současné rozložení plynů v ovzduší (cca. 78 % N_2 a 21 % O_2), které je mimo jiné ideální pro život, ale také např. negativní vliv oxidu dusičitého (NO_2), který může za poměrně krátkou dobu přestoupit a kontaminovat další sféry životního prostředí [5].

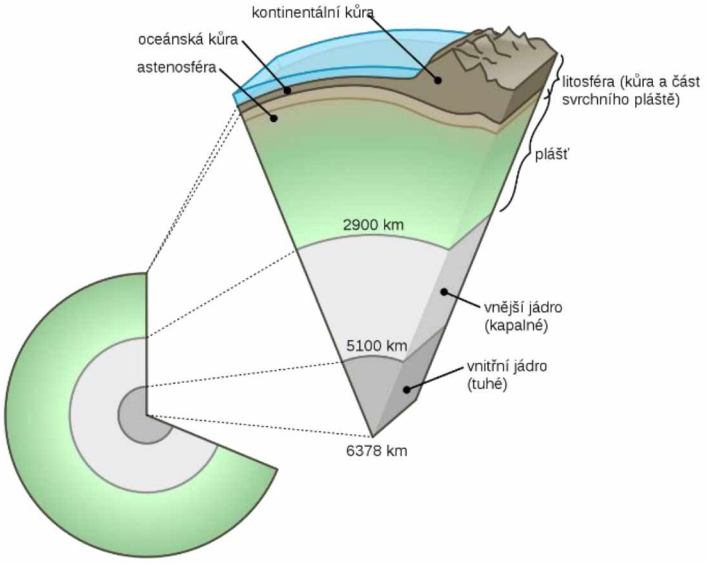
Speciální skupinou plynných složek v atmosféře jsou tzv. skleníkové plyny. Tyto plyny umožňují slunečnímu záření prostoupit skrze atmosféru. Když sluneční světlo dopadne na zemský povrch, část se odrazí zpět do vesmíru jako infračervené záření (teplo). Skleníkové plyny absorbují toto infračervené záření a zachycují teplo v atmosféře [6].

S výjimkou vodní páry, která je nejúčinnější ze všech skleníkových plynů (ale se zanedbatelnými antropogenními emisemi), nejvýznamnějšími z hlediska změny klimatu jsou oxid uhličitý (CO_2), methan (CH_4), oxid dusný (N_2O), ozón (O_3), chlor-fluorované uhlovodíky (CFC) a částečně halogenovanými uhlovodíky (HCFC) [7].

Skleníkovým plynům a skleníkovému efektu je podrobněji věnována podkapitola „1.4 Zvláštní význam skleníkových plynů“.

1.2 PLYNNÉ SLOŽKY V LITOSFÉŘE

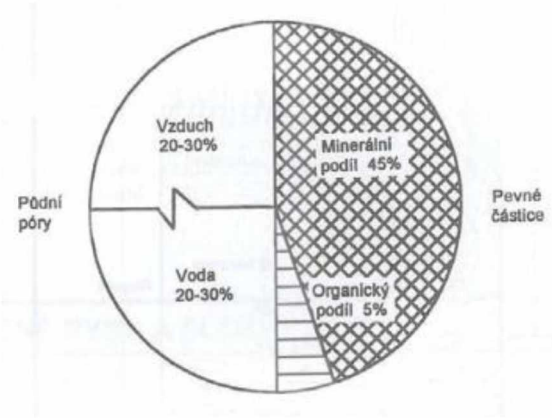
Litosféru lze popsat jako tuhou, skalnatou vnější vrstvu Země, sestávající ze zemské kůry a pevné vnější vrstvy svrchního pláště. Sahá do hloubky asi 100 km. Je rozdělena přibližně na 12 samostatných, pevných bloků nebo desek (odtud pojem desková tektonika). Předpokládá se, že pomalé konvekční proudy hluboko v plášti, generované radioaktivním zahříváním vnitřku,



Obrázek 2: Stratifikace Země [91]

způsobují boční pohyby desek (a kontinentů, které na nich spočívají) rychlostí několika centimetrů za rok [8].

Hmota půdy je porézní. Prostor pórů však není prázdný – obsahuje značné množství vody ale také plynných složek. Tzv. „půdní atmosféra“ je obecně vzduch přítomný v těchto pórech. Jeho biologický význam spočívá v působení na půdní organismy a kořeny rostlin (je s nimi v přímém kontaktu, oddělen tenkým filmem vody nebo koloidní hmotou). Jedná se samozřejmě o součást běžné atmosféry, ale jeho poloha je ovlivněna dvěma skutečnostmi:



Obrázek 3: Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální hlinité půdy (obj. %) [92]

- absorpce kyslíku a produkce oxidu uhličitého závisí na „obyvatelích“ půdy,
- a difúzní a další procesy výměny plynů tyto koncentrace neustále nahrazují běžným atmosférickým vzduchem, čímž se vyloučí jakékoli rozdíly ve složení způsobené biochemickými nebo jinými změnami.

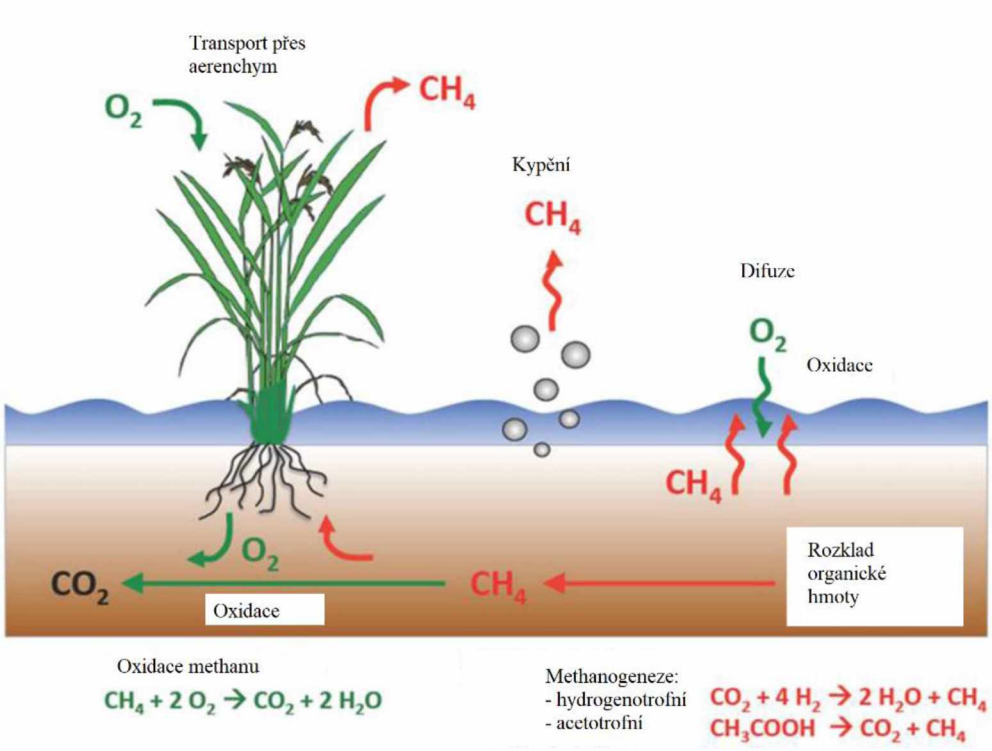
Výsledek složení půdního vzduchu je v každém okamžiku určen rozdílem rychlostí těchto procesů [9].

Jak již bylo tedy zmíněno, v nejjednodušším případě jsou póry půdy obsazeny atmosférickým vzduchem. Ovzduší ovšem obsahuje určitou míru vlhkosti, která podporuje tvorbu půdy a zároveň také flóru a faunu, které s tímto vzduchem interagují a upravují jeho složení. Odlišnost ve složení půdního vzduchu od atmosférického je nejvýrazněji dána dýcháním – snížením obsahu O_2 a zvýšením obsahu CO_2. Plyny téměř nepřítomné v atmosféře obohacují půdní vzduch díky biogenní činnosti organismů. Nejvýraznějšími jsou:

- methan (CH_4) – uvádí se, že 80 % obsahu je nedávného biologického původu,
- sulfan (H_2S) – většina biogenní, což je důsledek bakteriální redukce síranů za anaerobních podmínek.

CH_4 i H_2S jsou pouze metastabilní v půdním vzduchu, ale biogenní aktivita je víceméně vytváří kontinuálně, takže kdykoli mohou být přítomny ve významných koncentracích. Dalšími významnými složkami půdního vzduchu jsou plyny migrující z hloubky (např. z ložisek nerostů nebo nahromadění ropy). Důležitý je poznatek, že výsledné složení půdního vzduch (na rozdíl od atmosférického vzduchu) nemá pevné nebo stabilní složení [10].

Pro představu byl cyklus methanu v půdě naznačen na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Tvorba a emise methanu z vlhkých půd [11]

Dalším významným zdrojem produkce plynů v půdě může být zvětrávání minerálních ložisek. Typickým zástupcem této skupiny je bezpochyby radon (Rn), který je produkován během radioaktivního rozpad uranu a radia (problematice radioaktivních plynů se více věnuje podkapitola „2.3 Specifické plyny“). Hélium (He) je dalším plynem produkovaným během radiogenního rozpadu. Minerály s obsahem rtuti (Hg) při oxidaci uvolňují páry tohoto velmi toxického plynu. Chemicky se jedná zejména o sulfidy (např. ZnS – sfalerit). Oxidací sulfidů vzniká oxid siřičitý (SO_2), sirovodík (H_2S) a oxid uhličitý (CO_2), což jsou další plyny, které lze zahrnout do této skupiny [12].

Z hlediska ochrany životního prostředí jsou i zde problematické skleníkové plyny. V souvislosti s litosférou a půdou se mluví hlavně o zemědělství. Z chemického pohledu se jedná o methan (CH_4) a oxid dusný (N_2O). Oxid uhličitý (CO_2) se v této spojitosti neuvádí (předpoklad rovnosti emisí a spotřeby). Dusík jako takový do půdy patří, jedná se o biogenní prvek a v půdě je zpracováván příslušnými organismy. Současným trendem je ovšem tzv. přehnojování půd a polí průmyslovými i organickými hnojivy, což vede k neschopnosti všechen využít a vznikají tak plynné formy dusíku navíc, tedy i N_2O. Rozkladem organické hmoty vzniká CO_2 a CH_4. Množství významně ovlivňuje chov hospodářských zvířat, obdělávání půd (provzdušňování, odvodňování, orba – zvýšení mineralizace, snížení obsahu organické hmoty

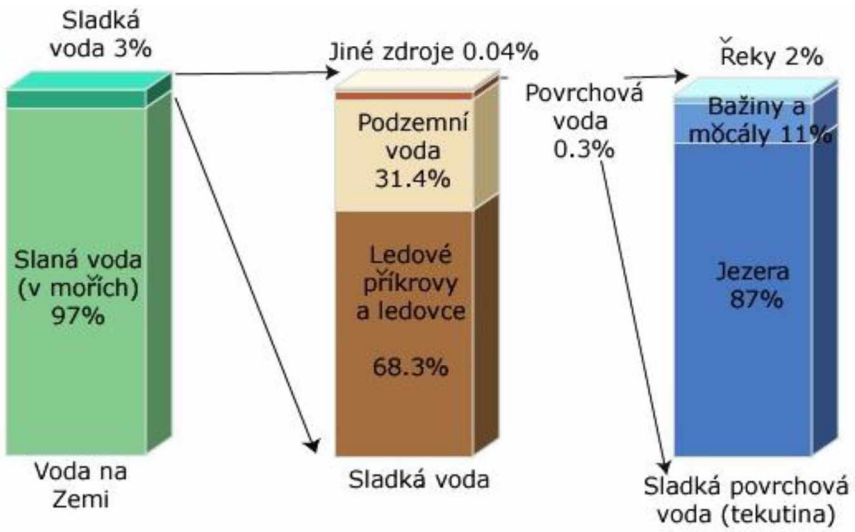
v půdě) ale i aplikace organických hnojiv. Z velké části platí, že produkce N_2O a CH_4 spolu souvisí [13].

Poslední uvedený případ se spíše už děje na rozhraní atmosféry a litosféry nežli pouze v půdě.

1.3 PLYNY VE VODNÍM PROSTŘEDÍ

Vodní prostředí neboli hydrosféra („vodní obal Země“) je nesouvislá vrstva vody na povrchu Země a pod ním. Zahrnuje kompletně všechny kapalné a zmrzlé povrchové vody, podzemní, zadržované vody v půdě a horninách a atmosférické vodní páry. Voda je nejrozšířenější chemickou látkou na povrchu Země [14].

Přibližně 74 % zemského povrchu je pokryto vodou, z toho 97 % (přibližně 10^{21} kg) v oceánech. Ledové příkrovy a ledovce obsahují asi 3.10^{19} kg vody, řeky 10^{15} kg, jezera a vnitrozemská moře asi 2.10^{17} kg a podzemní vody (až do 4000 metrů) přibližně 8.10^{19} kg. Vody v atmosféře je „pouze“ 10^{16} kg [15].

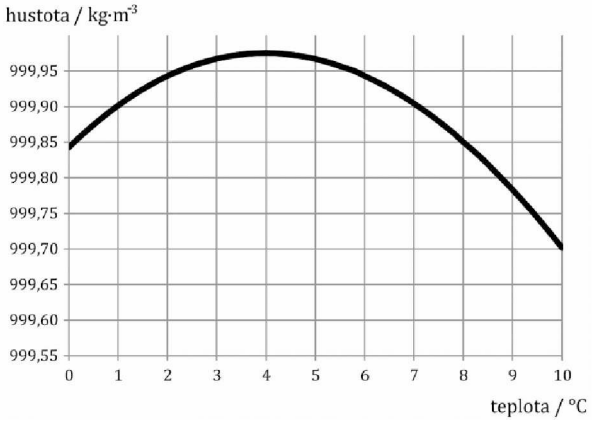


Obrázek 5: Rozložení zásob vody na Zemi [16]

Voda (H_2O) jako chemické individuum je bezbarvá kapalina (ρ =1 g/ml; t_t = 0 °C; t_v 100 °C). Mezi jednotlivými molekulami se uplatňují vodíkové vazby, které dávají kapalné vodě strukturu, jakou známe. Významným jevem u vody je tzv. anomálie vody – v rozmezí od 0 °C do 4 °C její objem klesá (hustota roste) a nad 4 °C začíná objem růst a hustota klesat (znázorněno na obr. č. 6). To má zásadní biologickou hodnotu pro vodní organismy. Voda je také nejdokonalejší polární ale i iontové rozpouštědlo (např. díky trvalému dipólovému momentu). Čistá kapalná voda je velmi slabě disociována na ionty:

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

Z této skutečnosti byla i odvozena stupnice pH. Další vlastností vody, která má zásadní význam pro celou planetu, je její silná absorpce IČ záření a její průhlednost vůči viditelnému a blízkému UV záření – umožnění prostupu slunečního záření ve dne a zamezení ztrát tepla v noci. Atmosférická voda tak zabraňuje prudké denní oscilaci teploty Země (více viz. podkapitola „1.4 Zvláštní význam skleníkových plynů“) [17].

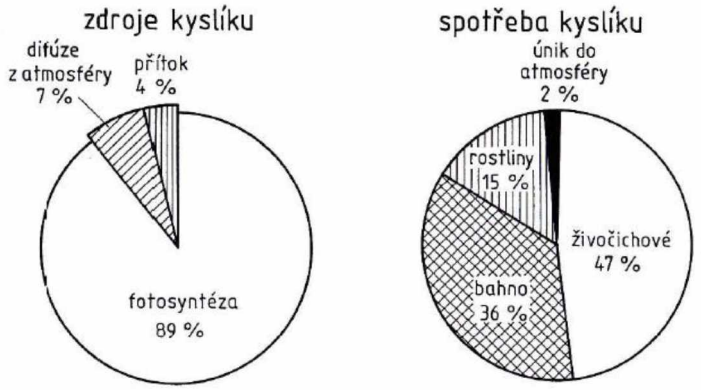


Obrázek 6: Teplotní závislost hustoty vody [18]

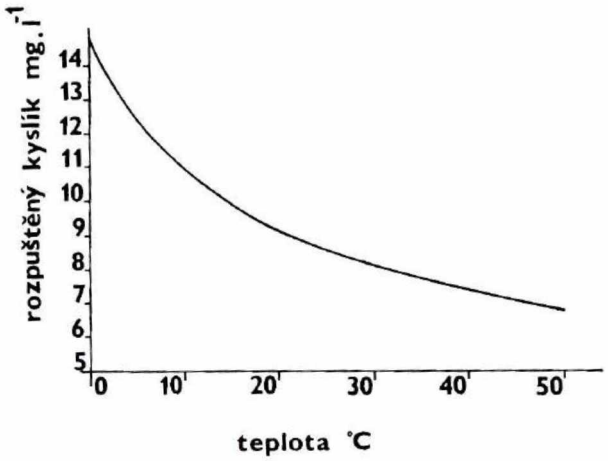
Pro popis rozpustnosti plynů obecně v kapalinách existuje Henryho zákon, který zní: „Koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad její hladinou“. Nejvýznamnějším činitelem je tedy v tomto případě velikost parciálního tlaku (p_i). Henryho zákon lze vyjádřit: $x_i = K_{H,i} \cdot p_i$. Ze znalosti stavové rovnice také vyplývá, že rozpustnost plynů je silně závislá na teplotě. Změny v teplotě zkoumaného systému se promítají ve změnách hodnot Henryho konstanty ($K_{H,i}$), které jsou tabelovány. Nežádoucí látky v sytému mohou také ovlivnit rozpustnost (negativně i pozitivně) [19].

Vzhledem ke skutečnosti, že hydrosféra je často v přímém kontaktu s atmosférou, všechny plyny v ní obsažené jsou více méně ve vodě rozpustné a přestupují do ní prostou difúzí. Mohou se v ní vykytovat v původní plynné formě (např. kyslík), nebo podléhat reakci (např. oxid uhličitý přechází na kyselinu uhličitou). Plyny lze z vodního prostředí opět uvolňovat (např. zahřátím, změnou pH apod). Závislost obsahu plynů ve vodním prostředí je dána také zeměpisnou polohou, podložím, zda se jedná o stojatou nebo tekoucí vodu apod [20; 21].

Kyslík (O_2) je významným plynem ve vodním prostředí. Kromě již zmíněné difúze u hladiny je jeho dalším zdrojem fotosyntetická asimilace vodních rostlin (respektive fotosyntéza). Z toho vyplývá, že jeho koncentrace je spojena s koncentrací oxidu uhličitého ve vodě (jeden přibývá, druhý ubývá). Množství kyslíku ve vodě je tedy dáno výskytem organismů, denní dobou, dále pak typicky teplotou prostředí (viz obrázek č. 8) a také hloubkou (u dna mohou probíhat až anaerobní procesy). Dalšími faktory jsou i atmosférický tlak, stav počasí a nadmořská výška (obsah O_2 klesá s klesajícím tlakem) [20; 21; 22].

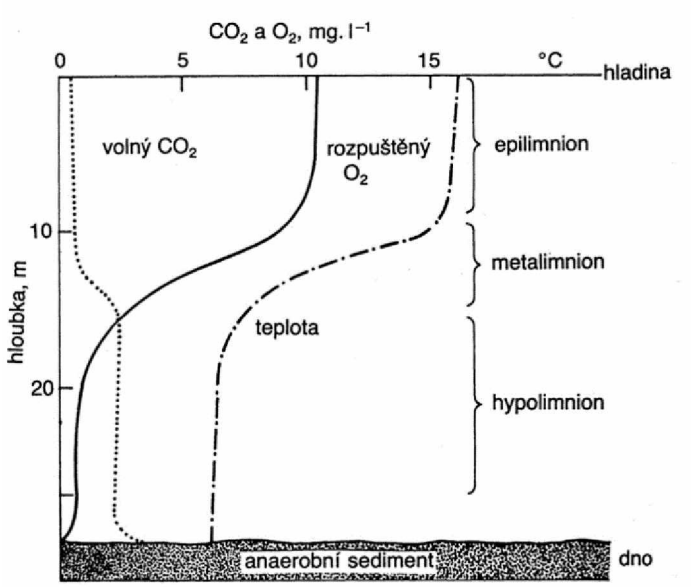


Obrázek 7: Zdroje a výdaje kyslíku v rybniční vodě (úrodný, letní období) [22]



Obrázek 8: Vztah kyslíku rozpuštěného ve vodě k teplotě [22]

Oxid uhličitý (CO_2) se kromě difúze z atmosféry a dýchání organismů do vody dostává rozkladem organických látek (např. z hnojiv) nebo uvolněním z hydrogenuhličitanů. CO_2 může významně měnit pH vody svou chemickou přeměnou na kyselinu uhličitou, pokud nemá k dispozici vápenaté nebo hořečnaté ionty. Takový oxid se označuje jako volný. Pokud tyto ionty jsou k dispozici, vznikají příslušné HCO_3^- ionty a poměrně stabilní prostředí [20].



Obrázek 9: Vertikální stratifikace (rozvrstvení) rozp. O_2 a CO_2 (vysoká produktivita, letní stagnace) [20]

Ve vodě se vyskytuje i dusík (N_2). Figuruje zde jako inertní plyn s nízkou rozpustností, který do vody opět přestupuje difúzí [22].

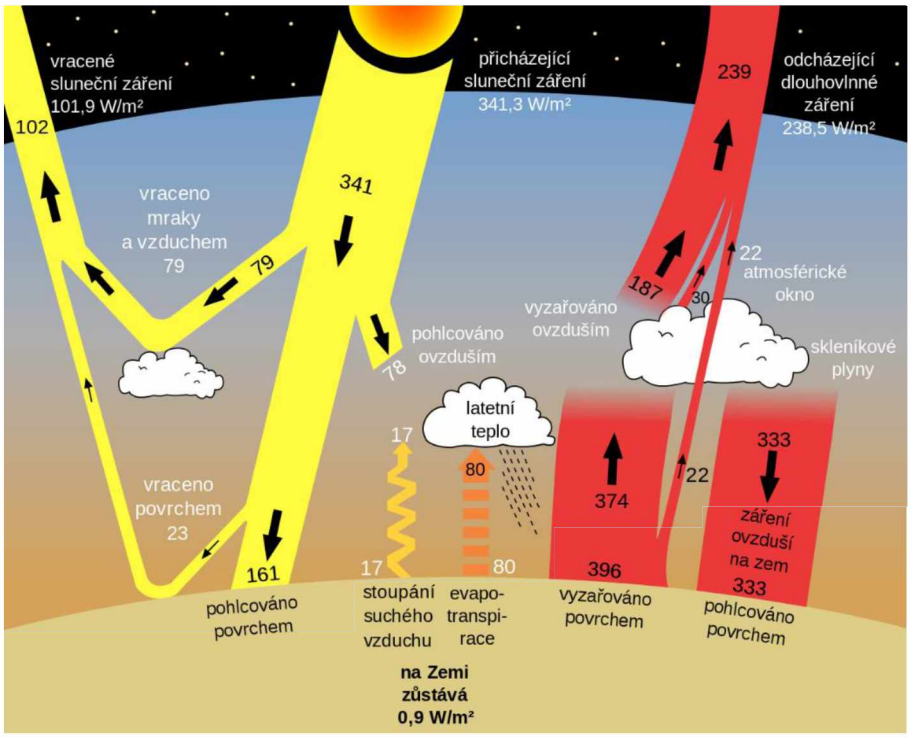
Dalším významným plynem vyskytujícím se ve vodním prostředí je methan (CH_4). Jedná se o nežádoucí produkt mikrobiálních anaerobních rozkladů organických látek sedimentů. Také se mu říká bahenní plyn. V extrémních případech může dosahovat produkce až 250 l na 0,4 ha za den. Do této skupiny patří dále sulfan (H_2S), vznikající při anaerobním bakteriálním rozkladu bílkovin (přes aminokyseliny = mineralizace). Takové povrchové vody jsou zatížené odpadními vodami a jevem spojeným se sulfanovým hnitím je černá barva dna a typický zápach. Stejnou cestou vzniká i ve vodě velmi dobře rozpustný amoniak (NH_3). Jeho forma NH_4OH přechází vlivem pH na $NH_3.H_2O$ (tzv. volný amoniak), která je velmi toxická pro ryby. Těmto nežádoucím procesům se zabraňuje řádným hospodařením. Jedním z řešení je saturace (zásobování kyslíkem) dané vodní plochy [22].

Voda může obsahovat např. i oxid siřičitý (SO_2), oxid uhelnatý (CO) apod. Jedná se ale o ojediněle se vyskytující plyny ve vodním prostředí.

1.4 ZVLÁŠTNÍ VÝZNAM SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ

Jak již bylo zmíněno, v atmosféře Země existují tzv. skleníkové plyny. Do této skupiny se z hlediska koncentrace a škodlivosti nejčastěji uvádí vodní pára (H_2O), methan (CH_4), oxid uhličitý (CO_2) a oxid dusný (N_2O), je jich ale daleko více. Jejich negativní dopad na klima v důsledku zvyšující se produkce je v současnosti nepopiratelný, ty přírodního původu mají ovšem v atmosféře i svou zvláštní roli a z historického hlediska velmi významnou.

Jako jejich zvláštní význam chápeme jako tzv. přirozený skleníkový efekt. Jedná se o proces, při kterém plyny přirozeně obsažené v atmosféře (v tomto případě vodní pára H_2O a oxid uhličitý CO_2) zachycují část sluneční energie ve formě infračerveného (IR) záření. Když sluneční světlo dopadne na zemský povrch, část této energie se pohltí a ohřívá Zemi. Od povrchu je pak část této energie odražena do atmosféry jako IR záření. Skleníkové plyny jsou zvláštní tím, že na rozdíl od jiných molekul selektivně pohltí 80 % záření a poté toto záření vyzařuje zpět do vesmíru a k povrchu Země. V tomto případě mluvíme o přirozeném skleníkovém efektu. Díky němu je teplota Země dostatečně vysoká, aby zde existoval život, jak ho známe [23].

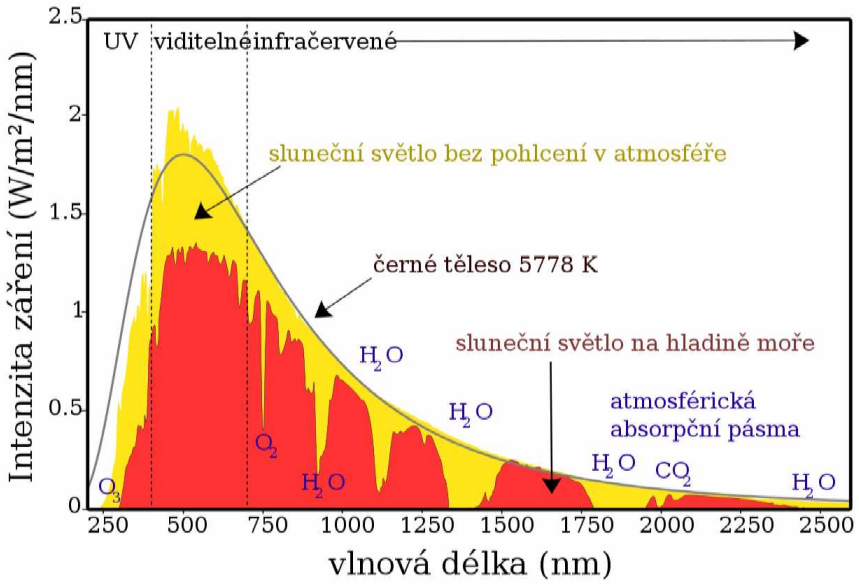


Obrázek 10: Porovnání přirozeného skleníkového efektu a efektu podpořeného vyšší koncentrací skleníkových plynů v atmosféře [24]

Z fyzikálního hlediska lze skleníkový jev popsat následovně. Obecně skleníkové plyny přítomné v atmosféře přeměňují energii záření na tepelnou energie – absorpcí elektromagnetického záření a naopak. Mechanismus pro absorpci záření v plynu je dán absorpcí energie molekulami zvýšením jejich kinetické energie skrze molekulární translace, rotace, vibrace apod. Zvýšením tepelné energie plynu dochází ke zvyšování teploty. Čím déle záření prochází plynem, tím více energie se přemění. Záření má různé vlnové délky. Dopadající sluneční záření je na bázi poměrně nízkých vlnových délek (0,2-3 μm), a to buď ve viditelné (0,4-0,8 μm), nebo ve blízko viditelné (např. ultrafialové <0,4μm) oblasti. Záření vyzářené ze

země a plynů má vyšší vlnové délky (0,7-300 μm), což je infračervené záření. Na zemský povrch tedy dopadá krátkovlnné záření a dlouhovlnná délka záření je emitována [25].

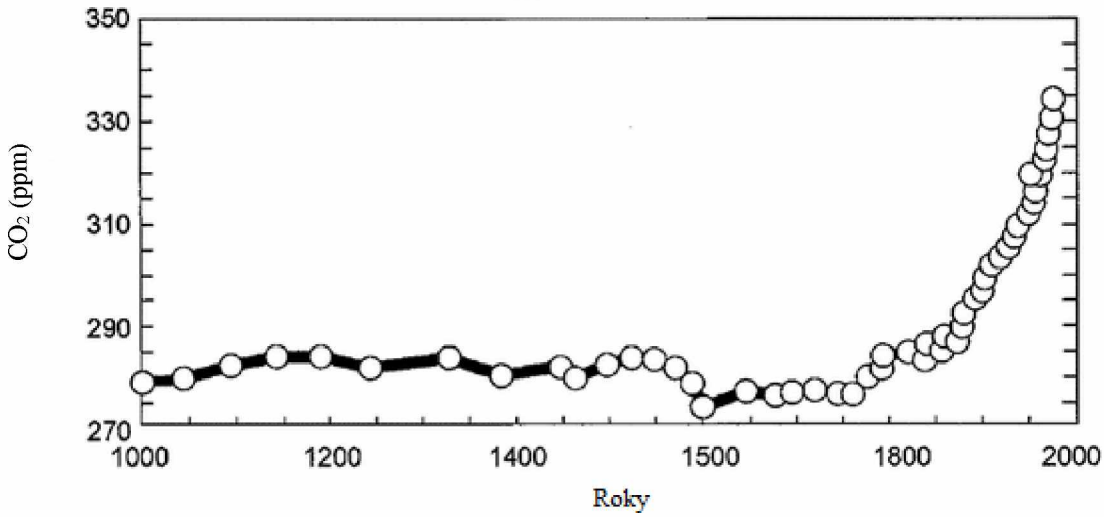
Sluneční záření je jediným zdrojem energie pro Zemi. V horní vrstvě atmosféry Slunce vyzařuje tepelný tok 1 368 W/m^2 (tj. sluneční konstanta). Protože plocha průřezu země je pouze čtvrtinou povrchu země, je ozářen tokem cca. 342 Wattů. Přibližně z 50 % je Země pokryta mraky. Ty mají funkci „radiačního štítu“, který snižuje záření na polovinu. Záření dopadající na povrch Země je tak sníženo na 25 %. Z důvodu výskytu prachových částic, aerosolů a krátkovlnného pásma H_2O v atmosféře, které také působí jako radiační štíty, záření na zemském povrchu je redukováno celkem o 30 % (což je popisováno jako albedo). Výsledný vyzářený tepelný tok 235 W/m^2 musí být převeden zpět do prostoru tak, aby nastala tepelná rovnováha [26].



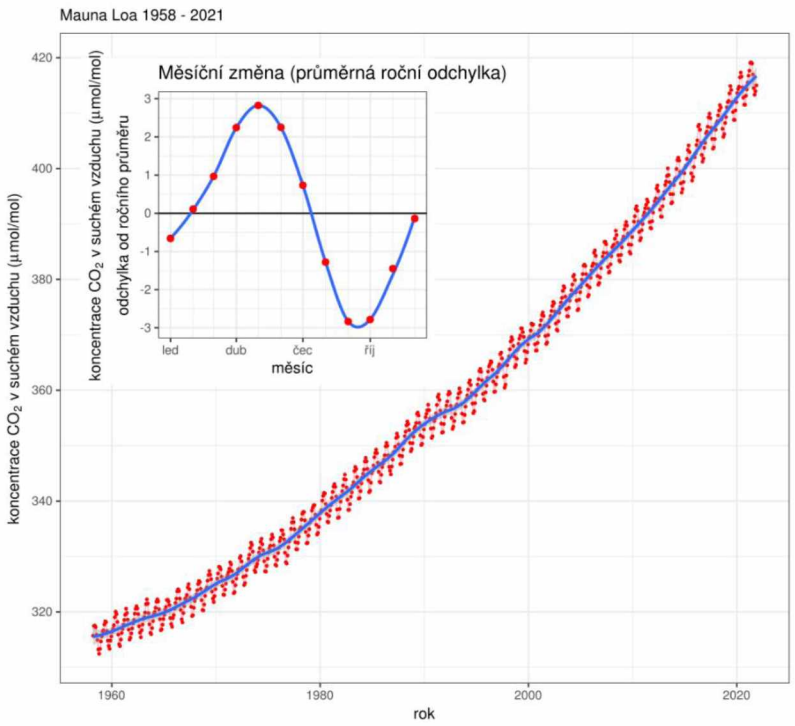
Obrázek 11: Spektrum slunečního záření pro přímé světlo na horní hranici zemské atmosféry i na hladině moře [27]

Výsledkem je tedy poznatek, že kdyby neexistovala atmosféra, respektive skleníkový efekt, Země by byla mrtvou zmrzlou planetou. Stejně důležitým jevem je téměř dokonalá propustnost atmosféry pro procházející sluneční záření, a naopak schopnost nepropustit dlouhovlnné záření ze zemského povrchu. Kdybychom předpokládali povrch Země jako dokonale černé těleso (absorpce dlouhovlnné radiace téměř beze zbytku), musel by mít teplotu přibližně -19 °C, aby vyzářil již zmíněných 235 W/m^2. Tato teplota se označuje jako efektivní radiační teplota Země a je výrazně nižší, než globálně uváděný průměr 15 °C při zemském povrchu [28].

Problém ale nastává s tzv. antropogenním skleníkovým efektem. Dle vědeckých pracovníků z Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) globální oteplování v 20. století vyústilo ve zvýšení průměrné teploty vzduchu asi o 0,6 °C a vzrůstu střední hladiny moří o 10-20 cm. K těmto změnám došlo z velké části kvůli přebytečnému množství tepelné energie zachycené absorpcí, vyzařování části infračerveného záření a oteplování spodní části atmosféry již během druhé poloviny 18. století. Za hlavní přispěvatele k intenzitě skleníkového efektu je považován oxid uhličitý (CO_2) a také narušování ozonové vrstvy ve stratosféře [29].



Obrázek 12: Graf nárůstu hladin CO_2 v atmosféře od roku 1000 našeho letopočtu [29]



Obrázek 13: Keelingova křivka koncentrací CO_2 v atmosféře naměřená na observatoři Mauna Loa (1958-2021) [30]

2. SKLENÍKOVÉ A SPECIFICKÉ PLYNNÉ SLOŽKY

V této kapitole se rozebírají skleníkové plyny a obecně plynné emise z pohledu jejich zdrojů. Nejvýznamnějším dělením zdrojů znečišťování je na přírodní a antropogenní (tj. z lidské činnosti). Tato část problematiky je velmi důležitá např. z hlediska ochrany ovzduší ale i pro výzkum. Vzhledem k faktu, že skleníkové a plynné složky mají největší zastoupení v atmosféře, je v této kapitole rozebíráno pouze ovzduší.

2.1 PŘÍRODNÍ ZDROJE A JEJICH PROJEVY

Zdroje znečišťování přírodního charakteru lze rozdělit na tři velké skupiny:

- biologické,
- geochemické,
- a atmosférické.

Obecně platí, že biologické a geochemické vstupy do atmosféry se dějí na fázovém rozhraní, zatímco atmosférická produkce znamená vznik daného polutantu prostřednictvím fyzikálně-chemických dějů již v atmosféře (tzn. propad jedné látky je současně zdrojem pro druhou látku – tzv. sekundární polutant). Důležitý je poznatek, že produkce dané látky může zároveň probíhat i s propadem. Typickým příkladem je atmosférický dusík (N_2) na fázovém rozhraní pedosféra – atmosféra. Výsledný látkový tok je pak ovlivněn např. klimatickými podmínkami, typem půdy apod. a není tak vždy stejný. Atmosféra zajišťuje rychlý transport látek ve všech fázích na značné vzdálenosti a zajišťuje tak výměnu hmoty prakticky mezi všemi rezervoáry Země. To z ní dělá ideální místo pro řadu cyklických procesů chemických látek a prvků (a tedy i polutantů) [4].

Biologické cykly vykazují vysokou rychlost, mohutnost a variabilitu. Nejdůležitější z nich je atmosférická produkce kyslíku (O_2) a oxidu uhličitého (CO_2) prostřednictvím fotosyntézy a respirace. Množství kolísá v závislosti na ročním období. Denitrifikační procesy v půdě produkují dusík (N_2) a částečně i oxid dusný (N_2O). Do této skupiny dále patří amoniak (NH_3) vznikající rozkladem organických látek obsahujících dusík. Na rozdíl od předešlých, amoniak v atmosféře setrvává výrazně kratší dobu. Anaerobními bakteriálními procesy uniká do ovzduší sulfan (H_2S), např. z močálů. Obdobnou cestou hnilobným rozkladem se vyvíjí methan (CH_4), který je dále produkován metabolismem přežvýkavců. Nemalou produkcí se dále vyznačuje dimethylsulfid [$(CH_3)_2S$] z mořského fytoplanktonu. V atmosféře se samozřejmě vyskytuje mnoho dalších (např. stopová množství organických látek – silice apod.). Ty se ale nevyznačují tak významnou koncentrací jako zde uvedené [5].

Geochemické zdroje ovlivňují atmosféru nižší mírou než biologické. Nejtypičtějším projevem této skupiny je magmatická a sopečná činnost. Při ní dochází k výrazné emitaci velmi pestré směsi prachových částic, oxidů uhlíku, oxidu síry, methanu, vodní páry a mnoho dalšího. Emise mohou dle intenzity erupce putovat na značnou vzdálenost a sopečné mraky setrvat v atmosféře dlouhou dobu. Dále se sem řadí i lesní požáry způsobené bleskem. V případě jeho vzniku dochází k uvolnění velkého množství škodlivin ve formě kouře, nespálených uhlovodíků, oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého, oxidů dusíku a popela. Je zde opět rozhodující intenzita daného požáru. Dalším znečištěním jsou prachové bouře, eroze a zvětrávání, které strhávají velké množství pevných částic prakticky všude po světě. U nich je riziko v naadsorbování toxických látek na povrch částic, nejedná se proto o primární polutant. Světové oceány jsou dalším důležitým přírodním zdrojem znečišťujících látek. Voda z hladiny se neustále vypařuje ve formě aerosolů solí, které jsou korozivní. U zde se uplatňuje vodní eroze. Významná jsou i alkalická a slaná jezera, ze kterých unikají sirnaté horké plyny [31; 32].

Mezi geochemické zdroje lze zařadit i vnášení radonu (Rn) do ovzduší. Protože se ale jedná o specifický proces, je mu věnována podkapitola „2.3 Specifické plyny".

Atmosférickými zdroji jsou myšleny chemické reakce a fyzikální procesy. Znečišťující látky jsou tedy produkty těchto reakcí. Těm se podrobněji věnují další kapitoly.

2.2 ANTROPOGENNÍ ZDROJE A JEJICH VLIVY

U antropogenních zdrojů znečišťování (tj. z lidské činnosti) vychází jejich dělení přímo z české legislativy, ze zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Zákon stanovuje následující dělení:

- stacionární zdroje,
- a mobilní zdroje.

Stacionární zdroje jsou definovány jako ucelené, nedělitelné činnosti nebo jednotky technického rázu, které již znečišťují nebo teprve mohou znečišťovat ovzduší. Zároveň je z této definice vyjmuta výzkumná, vývojová nebo zkušební činnost. Mobilní zdroj je chápán jako pohyblivá nebo přenosná jednotka technického rázu, která je vybavena spalovacím motorem a ten je využíván k jejímu pohonu nebo je součástí technologického vybavení [33].

Vlivy antropogenního znečišťování ovzduší lze shrnout do oblastí: (nutno upozornit, že ne všechny mají primární cíl působení právě v ovzduší)

- energetika,
- hornictví (např. hlubinné dobývání, úprava surovin),

- metalurgie (např. hutnictví, koksárenství, výroba železa a oceli),
- chemický a potravinářský průmysl (výroby anorganických a organických látek),
- zemědělství a lesnictví (např. rostlinná a živočišná výroba ale i myslivost),
- doprava.

Obecně lze říci, že kde dochází ke spalování fosilních paliv, tam vznikají oxidy síry (SO_2), oxidy dusíku (NO_X), emise tuhých částic a emise oxidů uhlíku ($CO + CO_2$). Při procesech v koksárnách vzniká pestrá směs škodlivin, kromě již uvedených i sulfan (H_2S), amoniak (NH_3), kyanovodík (HCN) a i organické látky (např. fenol, pyridin). V metalurgii běžné oxidy uhlíku, síry a dusíku často doplňují těžké kovy (např. rtuť, kadmium, olovo). Emise chemického průmyslu jsou určeny danou výrobou. K exhalátům ze spalovacích motorů lze ještě zařadit organické znečištění (fenoly, ketony, dehty, aldehydy apod.). Prakticky u všech uvedených vznikají prachové částice (PM_{10} a $PM_{2,5}$) [34].

Obrázek 14: Podíl sektorů na celkových emisích SO_X (2019) [35]

Obrázek 15: Podíl sektorů na celkových emisích NO_X (2019) [35]

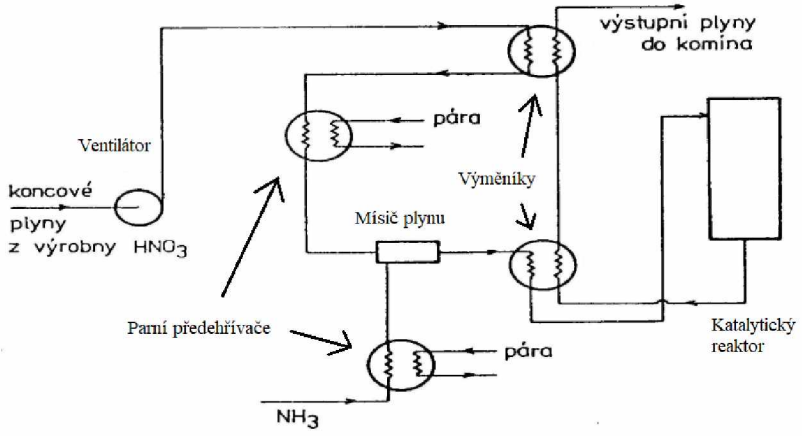
Obrázek 16: Podíl sektorů na celkových emisích CO (2019) [35]

Množství vypouštěných emisí z antropogenních zdrojů lze samozřejmě významně ovlivnit, na rozdíl od zdrojů přirozených. Děje se tak převážně skrze legislativní regulace a emisní a imisní limity. Tuto problematiku v České republice zastropuje již zmíněný zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v jehož příloze č. 1 jsou i uvedeny. Podrobněji je toto téma rozebíráno v kapitole „4. Ochrana ovzduší a prostředí“. Z hlediska vypouštěných množství a škodlivosti se největší důraz klade na oxidu dusíku (tzv. NO_X) a oxidy síry (SO_2) [33].

2.2.1. Opatření k zamezení úniku

Možností záchytu a likvidace je celá řada a kromě níže rozebíraných lze uplatnit primární opatření (např. úprava hořáků, odsíření uhlí apod.).

Metod pro odstraňování oxidů dusíku je mnoho a záleží, o jaký typ těchto oxidů se jedná. Stejný postup zneškodnění nemůže být uplatněn pro likvidaci NO_X emisí ze silniční dopravy (z důvodu kapacity, ceny apod.). Jako reprezentativní metoda pro tuto práci byla zvolena tzv. metoda $ReNO_X$. Jedná se o postup určený pro emise z chemického průmyslu (primárně výroba kyseliny dusičné, HNO_3). Z reakčního hlediska jde o katalytickou redukci (druhou možností pro stejnou oblast jsou metody absorpční) [36; 37].



Obrázek 17: Schéma technologické linky ReNOx [37]

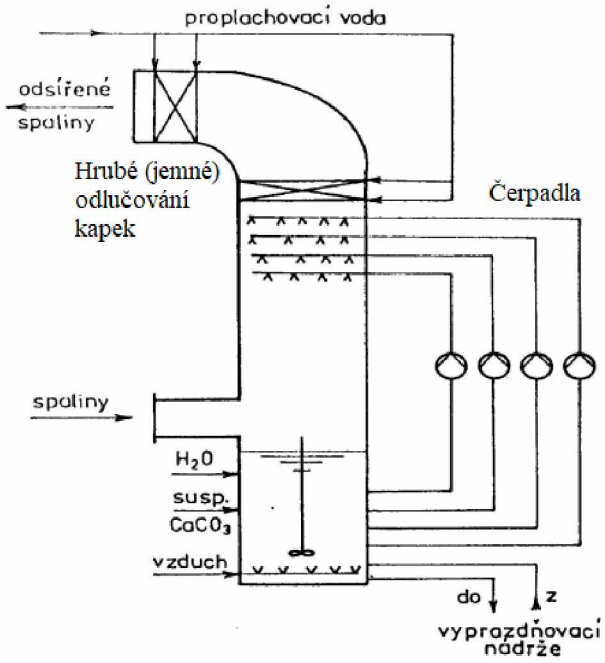
U odstraňování NO_X emisí je obecně primárním cílem zisk dusíku a vody (běžná součást atmosféry). Metoda $ReNO_X$ na tomto základu staví. Jedná se o selektivní katalytickou redukci pomocí amoniaku (NH_3). Sumárně lze tento proces vyjádřit chemickými rovnicemi takto:

$$6\,NO + 4\,NH_3 \longrightarrow 6\,H_2O + 5\,N_2$$

$$6\,NO_2 + 8\,NH_3 \longrightarrow 12\,H_2O + 7\,N_2$$

Jednou z více kombinací pro katalyzátor je zde oxid vanadičný (V_2O_5) nanesený na nosiči oxidu hlinitém (Al_2O_3). Výhodou této metody je vysoká účinnost (až 90 %), významné snížení koncentrace vypouštěných emisí a poměrné levný katalyzátor (oproti katalyzátoru v automobilech se nejedná o drahé kovy). Amoniak se ale dávkuje v nadbytečném množství (pro účinné zreagování) a musí být tedy jako druhá část procesu také likvidován [38; 39].

Odsiřovacích metod je také značné množství. Zde se metody rozdělují např. dle regenerace použitého činidla (cyklické a necyklické procesy) nebo podle probíhajícího fyzikálně-chemického děje. Touto cestou se užívá např. adsorpce, absorpce, oxidace a redukce. Významné je i dělení dle způsobu záchytu SO_2, a to na mokré a suché procesy. Jako ukázka zde byla zvolena vápencová metoda, která je v dnešní době nejrozšířenější [40].



Obrázek 18: Protiproudý bezvýplňový absorbér [37]

Celým názvem se jedná o mokrou necyklickou vápencovou metodu. Surovinou je zde poměrně dobře dostupné vápno (nebo jemně mletý vápenec) – $CaCO_3$ ve vodné suspenzi. Úhrnnou rovnici procesu lze zapsat:

$$2\,CaCO_3 + 2\,SO_2 + O_2 + 4\,H_2O \rightarrow 2\,CaSO_4 \cdot 2\,H_2O + 2\,CO_2$$

Výsledným produktem je zde sádra, respektive energosádrovec, který nalézá využití např. při výstavbě silnic. Jeho využití je ale omezené, proto určitá část končí na skládkách. Důležitým prvkem při odsíření je také tepelný výměník, kterým je zajištěn dobrý tah komínu a legislativní nároky na teplotu vypouštěných spalin [41; 42].

2.3 SPECIFICKÉ PLYNY

V této podkapitole jsou rozebírány specifické plyny a polutanty, které se od předešlých nějakým způsobem liší. Je to např. způsobem vzniku těchto látek, chemickou podstatou nebo působením. Do této skupiny byl vybrán radon (Rn) jako zástupce radioaktivního plynného znečištění a tzv. troposférický ozon (O_3), jehož zajímavost spočívá v tom, že nemá žádný přímý antropogenní ani přírodní zdroj.

2.3.1. Radon (Rn)

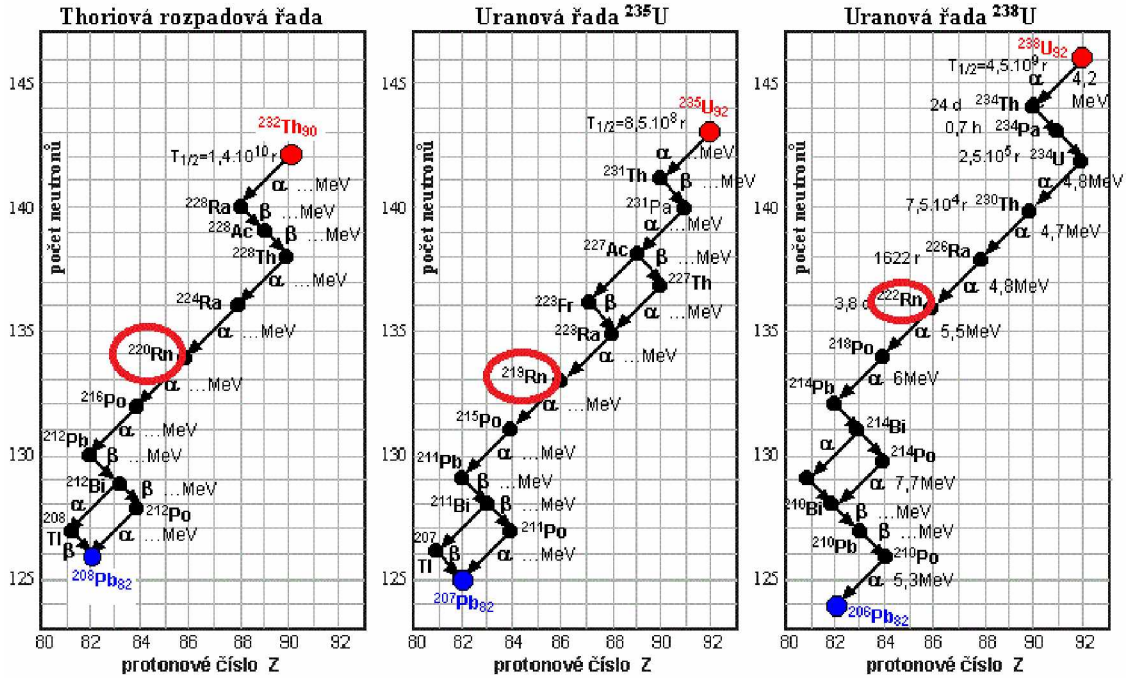
V případě radioaktivity ovzduší lze opět mluvit o přírodním a antropogenním znečišťování. Přirozené zdroje zahrnují radioaktivní látky v zemské kůře a vzniklé působením kosmických paprsků (ty jsou ovšem zanedbatelné). Úniky z lidské činnosti jsou hlavně

prostřednictvím umělých radioizotopů, které se mohou dít např. při výrobě jaderných paliv, provozu jaderných reaktorů nebo zkoušek jaderných zbraní [43].

Jak již bylo naznačeno, hlavním plynným produktem radioaktivního rozpadu v litosféře je radon. Jako takový se jedná o bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu. Řadí se do skupiny vzácných plynů. Je dobře rozpustný ve vodě a organických rozpouštědlech. Z hlediska ovzduší se konkrétně jedná o působení těchto izotopů radonu:

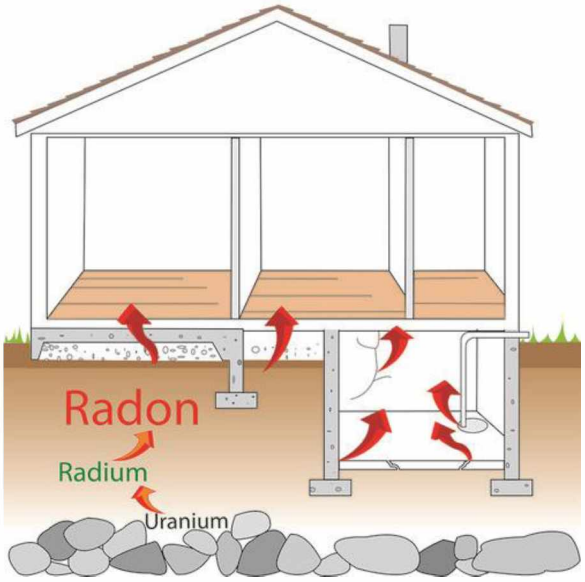
- ^{222}Rn – radon,
- ^{220}Rn – thoron,
- ^{119}Rn – aktinon.

Největší podíl na radioaktivitě má radon 222 (aktivita ostatních je zanedbatelná). Jedná se o produkt rozpadu ^{238}U, jeho poločas rozpadu je 3,83 dnů (tzn. doba setrvání v atmosféře) a jedná se o zářič α a β. Thoriová a uranové rozpadové řady, které znázorňují cestu vzniku všech tří uvedených izotopů, jsou uvedeny na obrázku č. 19. Jeho koncentrace v ovzduší je dána mírou exhalace z půdy a na rychlosti transportu. Obecně ale platí, že množství radonu nad oceány je výrazně nižší. Z přiložených rozpadových řad si lze všimnout, že produkty rozpadu radonu jsou těžké kovy. Ty jsou po jejich vzniku zachyceny ve formě aerosolů (srážková voda, záchyt na prachových částicích), které pak vykazují určitou aktivitu. Ta ale netrvá dlouho (krátké poločasy rozpadu radionuklidů) [44; 45].



Obrázek 19: Přírodní rozpadové řady thoria ^{232}Th a uranu ^{235}U a ^{238}U [46]

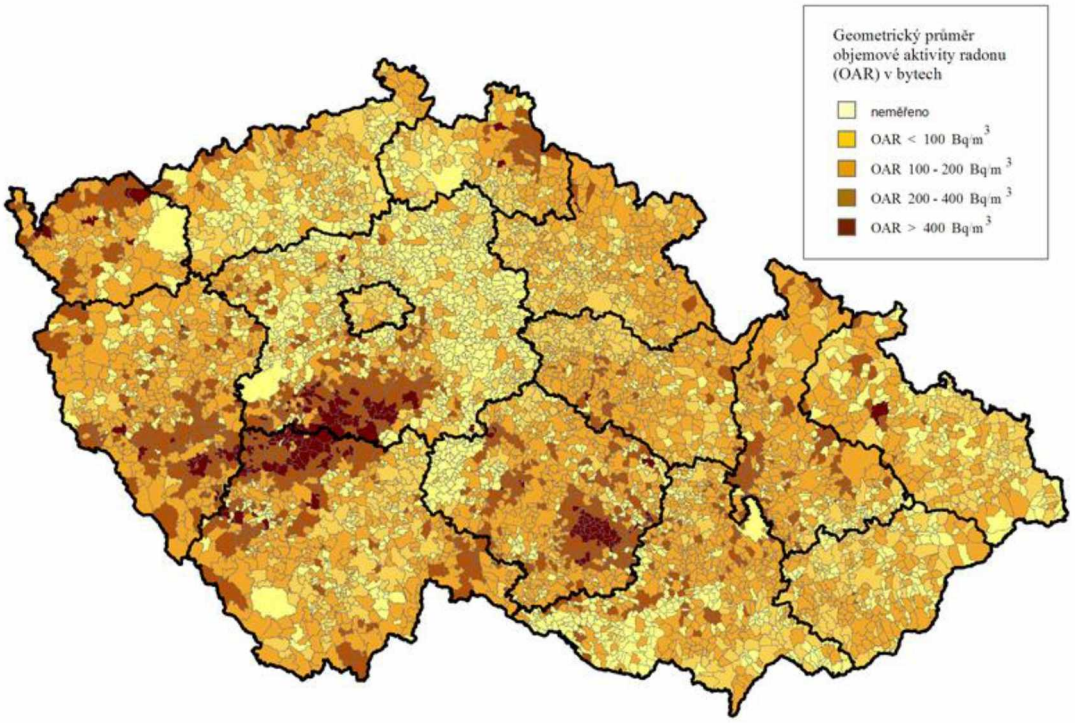
Nebezpečnost radonu spočívá v jeho vlastnostech, kdy je v ovzduší bez příslušných zařízení prakticky nezjistitelný, a v nejběžnějším místě jeho toxického působení – v lidských sídlech. Nejčastější situací je pronikání nahromaděného radonu v podloží skrze porušené podlahy ve sklepích, skrze praskliny apod. Děje se tak na základě tzv. komínového efektu, kdy je uvnitř domu vyšší teplota než pod ním, dochází k vytvoření podtlaku a k aktivnímu nasávaní radonu dovnitř. Častým problémem je i rozpuštěný radon ve vodě, čerpán např. ze studní [47].



Obrázek 20: Vstup radonu do domu [51]

V roce 2020 vstoupil v platnost Národní akční plán pro regulaci ozáření obyvatel z radonu, který nahradil Radonový program 2010-2019. Cíle plánu je zajištění kvalitní státní správy se zapojením veřejnosti a účastí odborníků, účinná prevence při výstavbě a rekonstrukci budov a efektivní regulace současného ozařování obyvatel z radonu v budovách (obytných, školských zařízení, sociálních služeb apod.). „Průměrná hodnota objemové aktivity radonu v budovách v České republice je 118 Bq/m^3. Patříme tak k zemím s nejvyšší koncentrací radonu v bytech na světě.“ [48]

Je uváděno, že radon je hlavní příčinou rakoviny plic pro nekuřáky. Většina informací o zdravotních rizicích radonu pochází ze studií dělníků v uranových a jiných podzemních dolech. Radioaktivní rozpad radonu produkuje řadu radioaktivních izotopů polonia, bismutu a olova. Tyto izotopy jsou chemicky aktivní a mohou se vázat na částice ve vzduchu, které se ukládají v plicích. Některé z nich jsou zářiče alfa-částic, které mohou způsobit buněčné změny a také rakovinu plic, když projdou plicními buňkami. Předpokládá se, že riziko přímo souvisí s celkovou expozicí. Zajímavostí je, že hlavní riziko představují izotopy, ale pro stanovení úrovně znečištění se měří koncentrace radonu (důvodem jsou náklady na měření) [49].



Obrázek 21: Průměr objemové aktivity radonu v obcích ČR [48]

2.3.2. Ozon (O_3)

Dalším významným specifickým polutantem je tzv. troposférický ozon (O_3, též přízemní). Jedná se o stopový plyn, který hraje roli v řadě oxidačních procesů atmosféry. Má také značný vliv na skleníkový efekt Země a je zdrojem městského, tzv. fotochemického smogu. Vzniká poměrně složitými nelineárními chemickými reakcemi z výfukových plynů – z oxidů dusíku (NO_X) s těkavými organickými sloučeninami (VOC) za vyšších (typicky letních) teplot, bezvětří a slunečního záření [50; 51].

Jediným významným procesem tvorby O_3 v nižší atmosféře je fotolýza NO_2 (reakce se slunečním zářením), následovaná rychlými reakcemi vzniklých atomů kyslíku s O_2:

$$NO_2 + h\nu \rightarrow O(^3P) + NO$$

$$O(^3P) + O_2 \rightarrow O_3 + M$$

Následuje rychlá reakce: $$O_3 + NO \rightarrow NO + O_2$$

Tento reakční cyklus má za následek fotostacionární stav pro O_3 (množství ozonu je ovlivněno působením slunce), kde koncentrace závisí pouze na množství dostupného slunečního světla, daného rychlostí fotolýzy NO_2 a poměrem koncentrace $[NO_2]$ / [NO]. Pokud by byl výše uvedený cyklus NO_X jediným fungujícím chemickým procesem, ustálený stav koncentrace

ozonu by byl relativně nízký. S účastí VOC dochází k dodatečnému reakčnímu cyklu v kombinaci s výše uvedeným fotostacionárním stavem O_3, což způsobuje zvýšení množství O_3. V tomto cyklu se jedná o vznik radikálů, které mohou spotřebovávat NO nebo převést NO na NO_2. Sumárně lze zapsat:

$$VOC + OH \rightarrow RO_2 + produkty$$

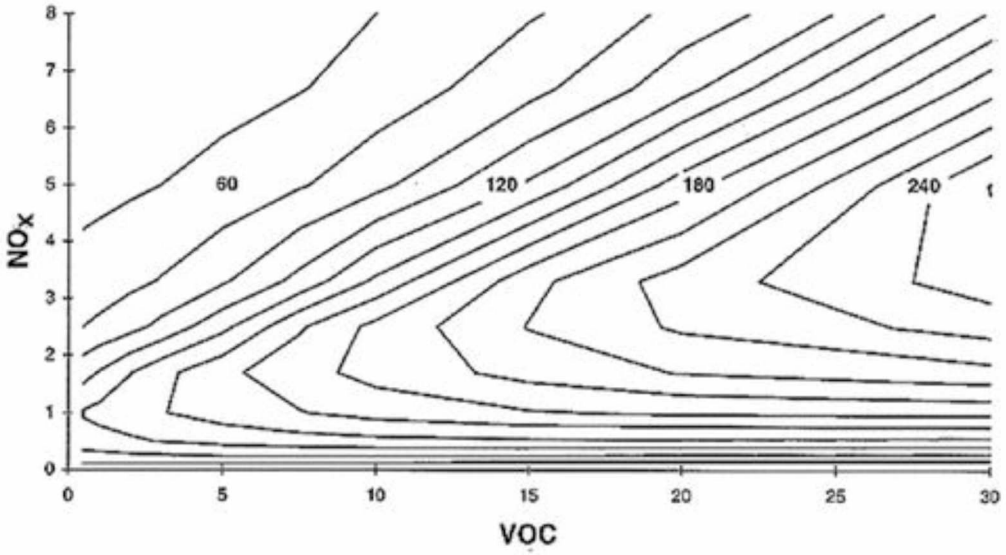
$$RO_2 + NO \rightarrow NO_2 + radikály$$

$$radikály \rightarrow \cdots \rightarrow OH + produkty$$

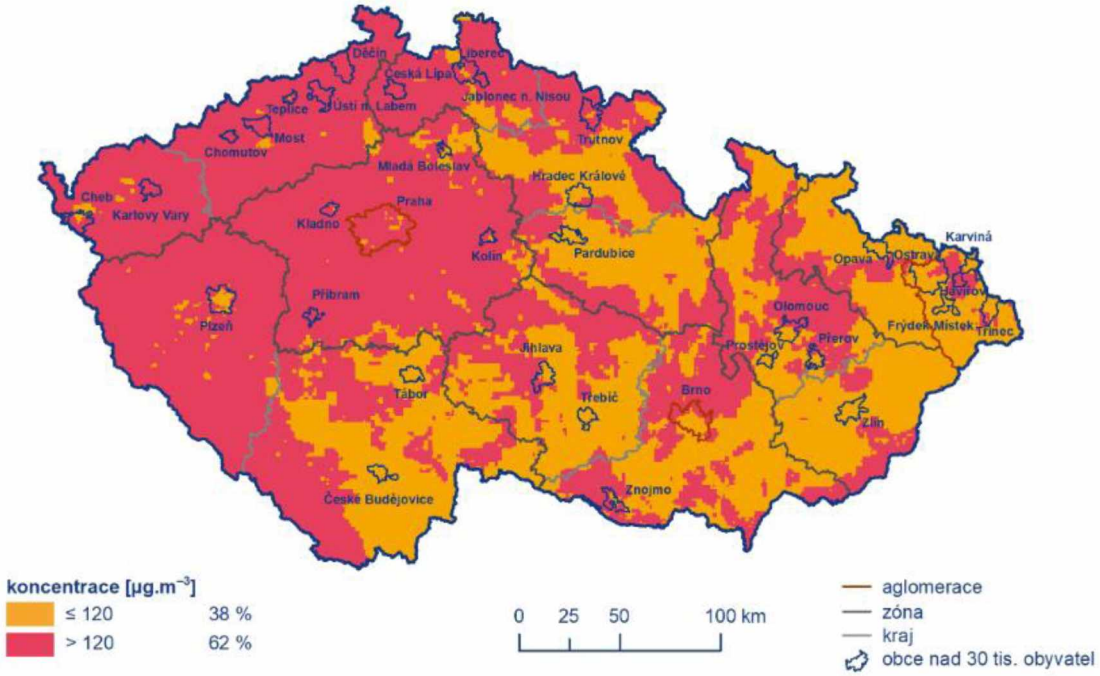
$$produkty \rightarrow \cdots \rightarrow \cdots + CO_2$$

Poslední dvě pseudoreakce zahrnují mnoho dalších kroků a produktů (např. formaldehyd, oxid uhelnatý a organodusitany). Celkové množství vytvořeného ozonu je do značné míry určeno množstvím a typem VOC, schopností reagovat s OH a množstvím dostupných NO_X [51; 52].

Existují tzv. ozonové izoplety, které vyjadřují závislost tvorby ozonu na počátečních koncentracích VOC a NO_X. Jedná se o zjištění maximální dosažené koncentrace O_3 jako funkce počáteční koncentrace VOC a NO_X. Izoplety se získávají experimentálně nebo matematicky pomocí fotochemických modelů. Na ukázkovém obrázku č. 22 je patrný „zlom“ podél určitého poměru VOC k NO_X, kde se při daných úrovních VOC vyskytují nejvyšší koncentrace ozonu. Jedná se o „optimální“ poměr VOC k NO_X. Zde je uveden pouze idealizovaný systém, skutečná atmosféra je daleko složitější [5].



Obrázek 22: Příklad ozonové izoplety [52]



Obrázek 23: Pole 26. nejvyššího maximálního denního 8hod. klouzavého průměru koncentrace přízemního ozonu v průměru za 3 roky (2018-2020) [35]

Sekundární polutanty jsou škodlivé pro biologické i fyzikální prostředí. Toxicita ozonu je dobře zdokumentována. Je silně dráždivý, způsobuje plicní edém a také silně dráždí horní dýchací soustavu. Ozon může způsobit zhnědnutí listů a snížení rychlosti růstu nebo fyziologické aktivity rostlin. Podobné reakce poškozují také plicní tkáně a další biologické pochody. Uvedené zdravotní a biologické efekty ozonu prakticky odpovídají působení fotochemického smogu, jehož základem je právě ozon. Zde je ale riziko značně vyšší, pokud vznikl za přispění VOC. Ty jsou často karcinogenní. Agresivita těchto pochodů je významná, neboť např. ozon dokáže napadat vazby C = C ve struktuře gumy (pneumatik) a v oblastech zatížených smogem mohou začít samovolně praskat [53].

3. PŘÍKLADY PROCESŮ SPOJENÝCH S PLYNY V ŽIVOTNÍM PROSTŘEDÍ

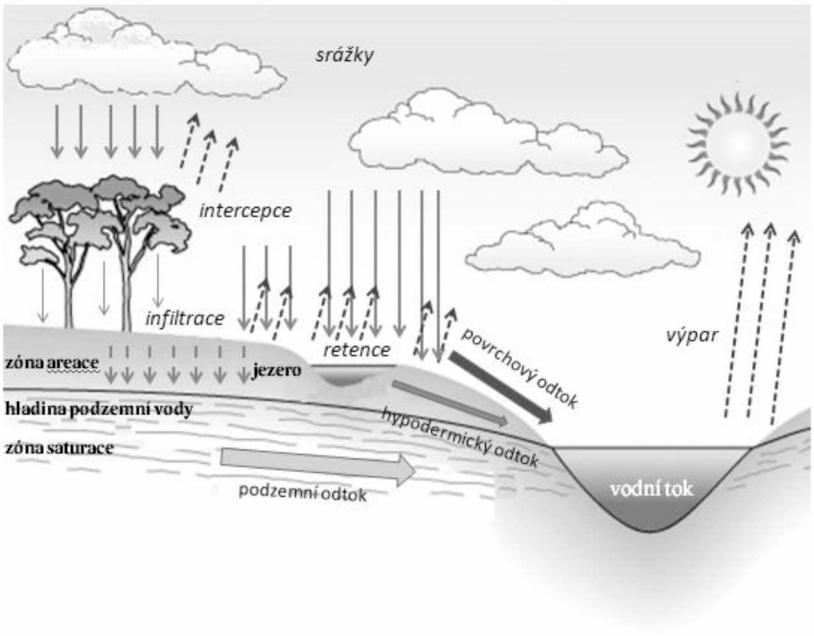
Plyny se v životním prostředí podílí na řadě procesů. Jsou součástí mnoha cyklů látek a prvků a podléhají mnoha fyzikálně-chemickým dějům. Každý plyn má v životním prostředí svou roli, která ale může mít i nežádoucí biologické nebo zdravotní působení. Na tuto problematiku je zaměřena právě tato kapitola.

3.1 PLYNOVÉ CYKLY

Jak již bylo zmíněno, atmosféra zajišťuje rychlý transport ve všech fázích na značné vzdálenosti a také výměnu hmoty prakticky mezi všemi rezervoáry Země. To znamená, že značná část látek a prvků může ve svém cyklu vstoupit do atmosféry nebo dokonce projít chemickou přeměnou na svou plynnou formu. Tato část kapitoly se věnuje cyklům nejvýznamnějších látek, které právě tímto procesem prochází.

3.1.1. Koloběh vody

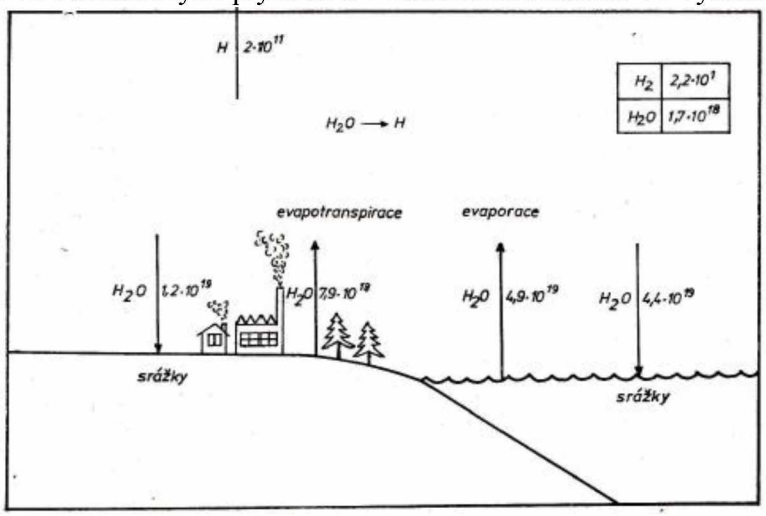
I přesto, že je voda naprostou většinou koncentrována v oceánech a mořích, její koloběh je i z hlediska plynových cyklů velmi důležitý. S vodou se setkáváme prakticky ve všech sférách životního prostředí, mezi kterými ochotně migruje. To znamená, že voda slouží i jako nosné médium pro řadu rozpuštěných a nerozpuštěných látek ale i pro teplo. Všechny tyto procesy jsou totiž poháněny energií ze Slunce. Během nich může voda významně měnit skupenství (znázorněno na obr. č. 24). Hydrologický cyklus je nesmírně důležitý – díky němu na Zemi panuje poměrně stabilní klima, je napojen na další významné cykly (např. horninový), ovlivňuje řadu procesů v atmosféře a v neposlední řadě je na koloběhu vody zcela závislý člověk [34].



Obrázek 24: Hydrologický cyklus [93]

3.1.2. Cyklus vodíku (H_2)

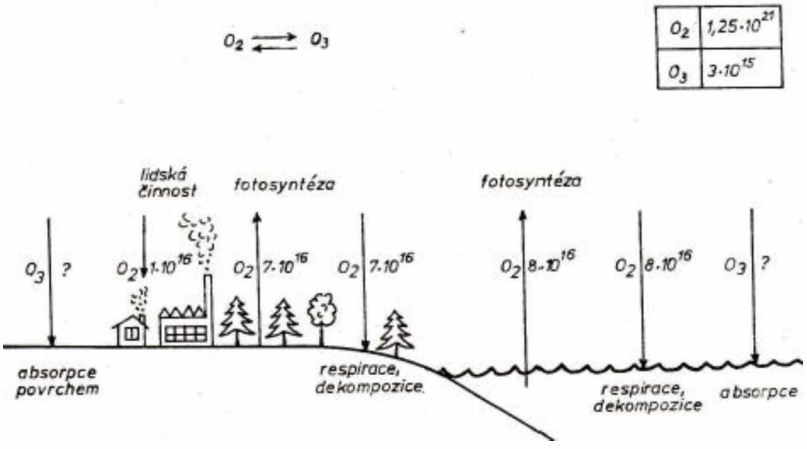
Na koloběh vody lze navázat i cyklem vodíku (H_2). Hlavním jeho zdrojem v atmosféře je fotolýza vodní páry ve více než 80 km nad povrchem země a dále fotochemický rozklad methanu (CH_4) ve stratosféře. Do jisté míry může dojít k difundaci do troposféry, ale většinou uniká do vesmírného prostoru (vlivem molekulové hmotnosti). Vodík dále vzniká rozkladem methanu nebo amoniaku (NH_3) v troposféře, mikrobiálními půdními pochody, v oceánech a zanedbatelná množství se vykytují ve vulkanických plynech a v kosmickém záření. Ve vyšších vrstvách atmosféry vniká fotolýzou atomární vodík a ionizovaná forma H^+. Kosmické paprsky mohou vyvolat vznik izotopů deuteria ^2H (D) a tritia ^3H (T), jejichž jádro obsahuje o jeden, respektive o dva neutrony. Normální lehký vodík ale převažuje, a to z 99,985 % [5].



Obrázek 25: Koloběh vodíku v atmosféře [44]

3.1.3. Cyklus kyslíku (O_2)

Kyslík (O_2) má hned po dusíku největší zastoupení v atmosféře. Díky tomu rozhoduje o chemismu atmosféry (dusík je považován za inertní). Kyslík je výborné oxidační činidlo a stejně tak působí v ovzduší. Vystupuje zde jako součást molekuly vody, jako řada dalších oxidů, dále jako atomární kyslík (O) nebo jako již zmiňovaný ozon (O_3). Vysoké množství kyslíku bychom nalezli i v půdě, kde je pevnou součástí oxidů a aniontů (např. oxid křemičitý). Neméně je zastoupen i v biomase a ve své rozpuštěné formě v hydrosféře. Jako zahájení cyklu kyslíku lze považovat proces fotosyntézy zelených rostlin. Ten je pak uzavřen dýcháním autotrofních organismů (viz. obr. č. 26). Kyslík v atmosféře vzniká

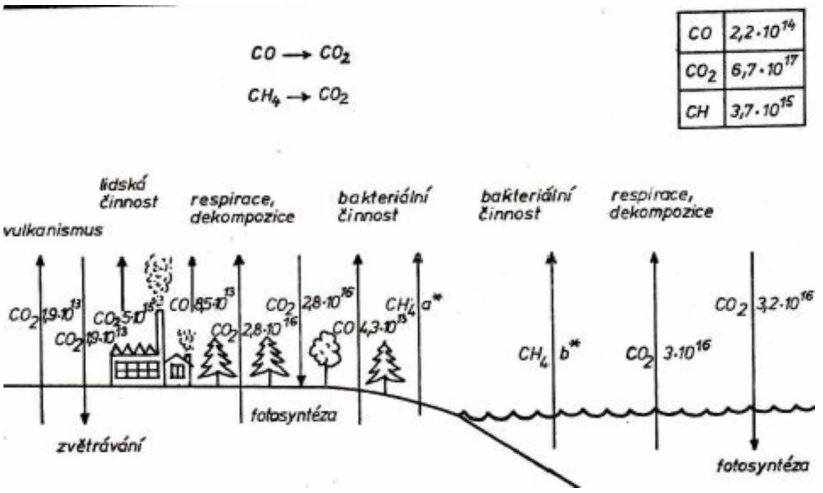


Obrázek 26: Koloběh kyslíku v atmosféře [44]

fotodisociací molekul vody [54].

3.1.4. Cyklus uhlíku (C)

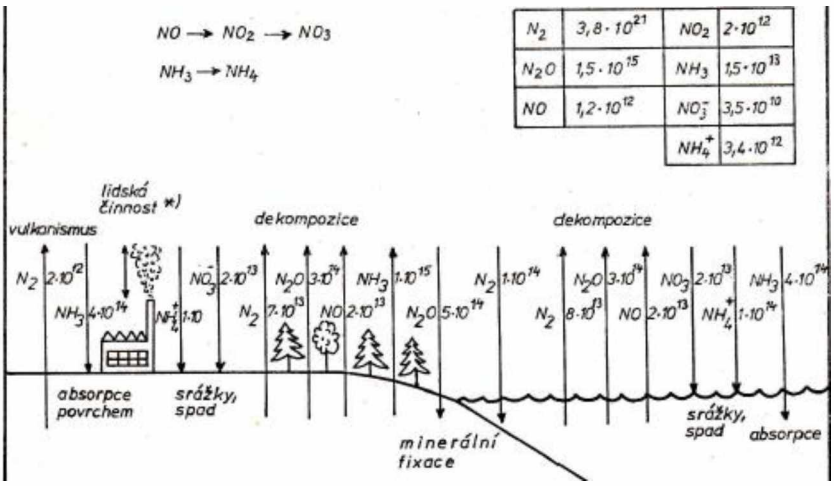
Z hlediska rozložení atmosféry následuje po kyslíku oxid uhličitý (CO_2). Není jedinou plynnou formou uhlíku, z těch významnějších bychom dále mohli v ovzduší nalézt methan, oxid uhelnatý (CO) a ve stopových množstvích organické látky různého původu (většinou ale dochází k oxidaci a přeměně na CO_2). Díky své ochotě rozpouštět se ovlivňuje složení hydrosféry a případné srážky. Nemalé množství obsahují i oceánské sedimenty (nejvíce ve formě CO_3^{2-}). Dále se uvolňuje sopečnou činností, odplyněním zemské kůry nebo dalšími specifickými procesy (např. geochemickým cyklem). Stejně tak jako u kyslíku i zde je produkce uhlíku dána fotosyntézou, respektive dýcháním organismů (tzn. biologický cyklus). Nutné je zmínit, že tento koloběh není zcela uzavřený [55].



Obrázek 27: Koloběh uhlíku v atmosféře [44]

3.1.5. Cyklus dusíku (N_2)

Kromě prakticky inertní molekuly dusíku (N_2) se v atmosféře vyskytují jeho další formy – např. amoniak (NH_3), přes oxidy až jako dusičnany (NO_3^-). Pro zahájení vůbec nějakého cyklu je nutné rozbít velmi silnou vazbu zmíněné biatomární molekuly. Rostlinám v tom pomáhají speciální bakterie, které molekulu N_2 přeměňují na stravitelnou formu. Tento proces se nazývá fixace dusíku. Dalšími procesy pak vzniká i NH_3 a také organické dusíkaté sloučeniny (např. bílkoviny). Významnými složkami atmosféry je dále skleníkový plyn oxid dusný (N_2O) a

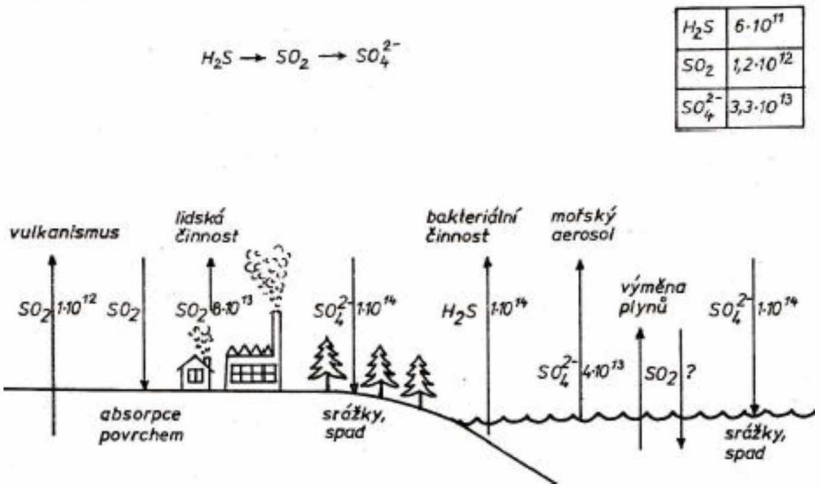


Obrázek 28: Koloběh dusíku v atmosféře [44]

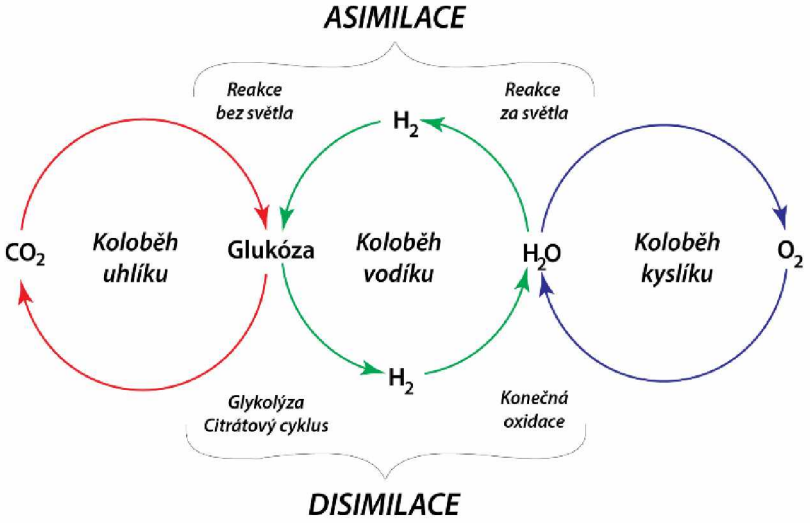
obecně antropogenní polutanty NO_X, které také mohou vstupovat do cyklu dusíku. Kromě fixace dusíku probíhá ještě proces denitrifikace v půdách a oceánech. Jedná se opět o mikrobiální proces, v tomto případě jde ale o redukci NO_3^-. Určitou roli hraje i amoniak, vznikající rozkladem dusíkatých organických látek bakteriemi [5; 56].

3.1.6. Cyklus síry (S)

Podkapitolu uzavírá koloběh síry (S). V tomto případě jde opět o mikrobiální procesy a děje se tak v prostředích na bázi bažin a mokřadů. Produktem těchto procesů je zpravidla sulfan (H_2S). V případě oceánů je produktem dimethylsulfid (CH_3SCH_3). Lze říci, že veškeré tyto procesy vedou opět k oxidu siřičitému (SO_2) vlivem oxidace těchto látek. Z ovzduší je takto vymýván srážkami, proniká do půdy, kde pokračuje ve svém cyklu prostřednictvím rostlin společně se sírany. Dalšími přispěvateli jsou horniny s obsahem síry (často sulfidy), sopečné činnosti a také z antropogenního znečištění – spalování fosilních paliv (převážně nekvalitní hnědé uhlí). V tělech rostlin a živočichů se síra přirozeně vyskytuje a spálením těchto paliv dochází k uvolnění síry nahromaděné i miliony let [34; 57].



Obrázek 29: Koloběh síry v atmosféře [44]



Obrázek 30: Příklad propojení mezi koloběhy [58]

3.2 PŘÍKLADY FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÝCH MECHANISMŮ

Fyzikálně-chemické účinky atmosféry jsou dány především dvěma složkami – kyselými a oxidujícími. Nižší ale přesto významnou roli hrají také pevné a kapalné částice (např. tvorba aerosolu). Hnací silou pro tyto procesy je hlavně sluneční záření (nejvíce UV složka). Většina chemických reakcí probíhá v troposféře, což je i prioritní oblast zájmu ochrany ovzduší. Lze je dělit z mnoha hledisek, nejčastějším je dělení dle fází reaktantů:

- homogenní reakce (např. reakce dvou plynů),
- heterogenní reakce (např. adsorpce plynu na pevné částici).

Homogenní reakce jsou dále definovány molekularitou (počtem atomů nebo molekul reakce):

- bimolekulární (klasická reakce dle kinetiky srážkové teorie plynů),
- monomolekulární (rozpad jedné molekuly za uvolnění energie),
- termomolekulární (rekombinace molekul, atomů nebo radikálů za přítomnosti specifické látky).

Dalším významným dělením chemických reakcí je dle mechanismu:

- fotochemické (resp. fotooxidační nebo radikálové),
- acidobazické,
- jaderné,
- reakce O_2 (resp. oxidace),
- reakce H_2O (resp. hydrolýza) [59; 4].

3.2.1. Příklad reakce fotochemické a radikálové

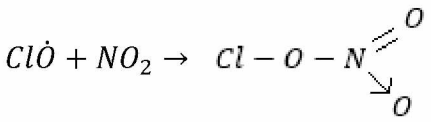
Nejvýznamnější fotochemické reakce jsou spojeny s kyslíkem (O_2) v troposféře a ozonem (O_3) ve stratosféře. Protože se jedná o podobné radikálové mechanismy a vznik troposférického ozonu byl již popsán v podkapitole „2.3 Specifické plyny“, jako zástupce skupiny byl vybrán tento příklad:

Při sopečné činnosti dochází k uvolnění chlóru (Cl_2) a chlorovodíku (HCl) do stratosféry. Vlivem působení UV záření (300-400 nm) dochází ke vzniku Cl·, zatímco HCl reaguje s HO· za vzniku ClO·.

$$\dot{Cl} + O_3 \rightarrow Cl\dot{O} + O_2$$

$$Cl\dot{O} + \dot{O} \rightarrow \dot{Cl} + O_2$$

$$\dot{Cl} + CH_4 \rightarrow C\dot{H}_3 + HCl$$



Cl· je reakcí s methanem (CH_4) přeměněn na HCl, která pak přechází do troposféry ve formě srážek [60].

3.2.2. Příklad reakce organických látek

Významnou skupinou jsou organické látky, byť mechanismus jejich reakcí je převážně opět radikálový. Organické znečištění zahrnuje dvě velké skupiny:

- těkavé organické látky (VOCs),
- a persistentní organické polutanty (POPs).

VOCs jsou znečištění přírodního (např. anaerobní rozklad biomasy) i antropogenního původu (např. nedokonalé spalování fosilních paliv). POPs jsou spíše antropogenního původu a převážně ve formě aerosolů (nízká těkavost). Obecně platí, že organické látky z přírodních zdrojů přispívají znečištění více než z antropogenních. Patří sem totiž mnohokrát zmiňovaný CH_4, dále ethylen a terpeny (z rostlin) a mnoho dalších. Jako příklad byla vybrána reakce formaldehydu s hydroxylem:

Vznik hydroxylu např.: $H_2O_2 + h\nu \longrightarrow 2\,O\dot{H}$ (při $\lambda < 370$ nm)

$$HCOH + H\dot{O} \rightarrow HC\dot{O} + H_2O$$

Aldehydy jsou totiž významnými zdroji radikálů v atmosféře vlivem absorpce světla. Konkrétně formaldehyd vzniká biogenní i antropogenní cestou a také jako produkt oxidace uhlovodíků [59].

3.2.3. Reakce jaderné

Nejnázornější příklad reakcí jaderných byl uveden v podkapitole „2.3 Specifické plyny“, kde byl popisován radioaktivní rozpad uranu v litosféře a vznik plynného radonu. Ten se pak rozpadá na těžké kovy.

3.2.4. Příklad reakce acidobazické

Typickým acidobazickým představitelem je mechanismus kyselého deště. Vznikají přeměnou znečišťujících plynů emitovaných z komínů uhelných elektráren, hutí, rafinerií, chemických závodů a motorových vozidel. V minulosti byl SO_2 hlavním přispěvatelem kyselých dešťů, v dnešní době mu už odpovídá i příspěvek NO_X (v některých urbanizovaných oblastech převyšuje).

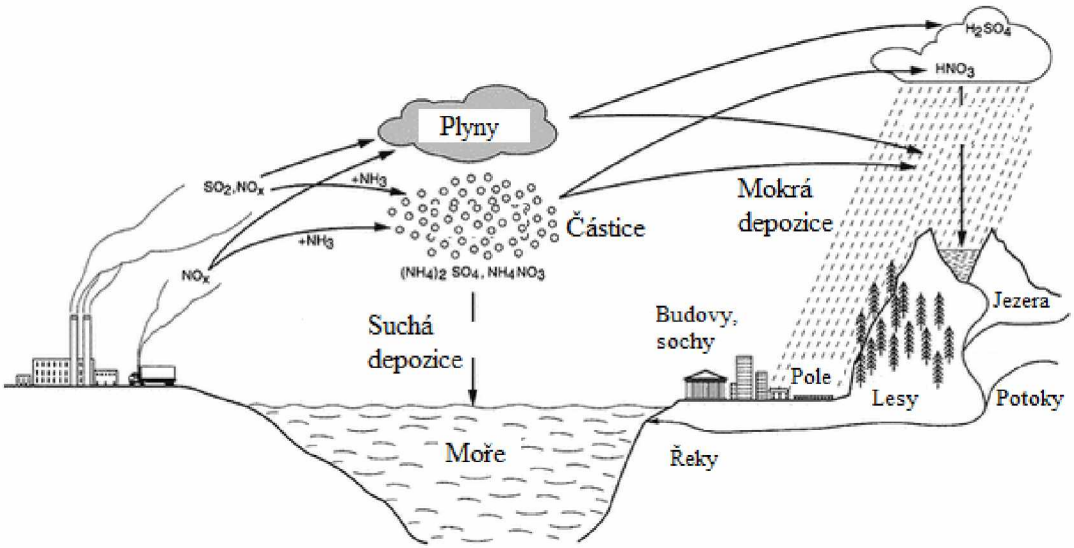
Plynný SO_2 se v atmosféře oxiduje na kyselinu sírovou (H_2SO_4), která je snadno absorbována deštěm. Oxidace probíhá pomocí různých mechanismů, např. radikálovou cestou hydroxylem ($OH^{\cdot}$). SO_2 se může také rozpouštět ve formě kapek dle reakcí:

$$SO_2 + H_2O \rightleftharpoons SO_2 \cdot H_2O$$

$$SO_2 \cdot H_2O \rightleftharpoons HSO_3^- + H^+$$

$$HSO_3^- \rightleftharpoons SO_3^{2-} + H^+$$

Celková koncentrace sirných látek je pak dána všemi výše uvedenými sloučeninami síry. Možná je také oxidace těchto forem na SO_4^{2-} pomocí peroxidu (H_2O_2) a ozonu (O_3). Přítomnost kovů ve nečištěném ovzduší (např. Fe) může katalyzovat oxidaci SO_2 pomocí O_2. Reakce je závislá na pH. Již zmiňovaný sulfan (H_2S) a dimethylsulfid [$(CH_3)_2S$] z přírodních zdrojů znečištění také významně přispívají k tvorbě kyselých dešťů – v atmosféře se oxidují na SO_2 [61; 62].



Obrázek 31: Kompletní schéma cyklu kyselého deště [61]

Kyselý déšť má velmi negativní vliv prakticky na vše, s čím přijde do kontaktu. Okyseluje jezera a řeky, mobilizuje rozpuštěný hliník a snižuje celkové pH a to vede k úhynu ryb. Zároveň tedy zvyšuje úroveň toxických kovů ve vodách, čímž je začleňuje do potravních řetězců. Kyselé deště také naleptávají vápenec a urychlují korozi železa, což má za následek poškození památek a dalších stavebních konstrukcí. Negativně ovlivňuje růst rostlin, devastuje lesní porosty a podporuje množení kůrovce [61]. Vlivy na lidské zdraví jsou uvedeny v podkapitole „3.3 Biologické a zdravotní působení."

3.3 BIOLOGICKÉ A ZDRAVOTNÍ PŮSOBENÍ

Znečištění ovzduší je jedním z největších ekologických rizik pro zdraví. Snížením úrovně znečištění ovzduší mohou země snížit zátěž nemocí (např. mrtvici, srdeční choroby, rakovinu plic a chronické i akutní onemocnění dýchacích cest – astmat). Čím nižší bude úroveň znečištění ovzduší, tím lepší bude kardiovaskulární a respirační zdraví populace, a to jak z dlouhodobého, tak krátkodobého hlediska. Světová zdravotnická organizace (WHO) v roce 2021 uvedla:

- v roce 2019 žilo 99 % světové populace v místech, kde nebyly splněny úrovně směrnic WHO pro kvalitu ovzduší,
- odhaduje se, že znečištění ovzduší ve městech i na venkově způsobilo v roce 2016 celosvětově 4,2 milionu předčasných úmrtí,
- přibližně 91 % těchto předčasných úmrtí se vyskytlo v zemích s nízkými a středními příjmy a největší počet v regionech v jihovýchodní Asii a západním Pacifiku,
- kromě znečištění venkovního ovzduší představuje kouř v uzavřených prostorách vážné zdravotní riziko pro přibližně 2,6 miliardy lidí, kteří vaří a vytápí své domy biomasou, petrolejovým palivem a uhlím [63].

Globální směrnice WHO pro kvalitu ovzduší nabízejí pokyny ohledně prahových hodnot a limitů pro klíčové látky znečišťující ovzduší, které představují zdravotní rizika. Směrnice platí celosvětově pro venkovní i vnitřní prostředí a jsou založeny na odborném hodnocení současných vědeckých důkazů pro:

- pevné částice ($PM_{2,5}$ a PM_{10}),
- ozon (O_3),
- oxid dusičitý (NO_2),
- oxid siřičitý (SO_2),
- a oxid uhelnatý (CO) [64].

3.3.1. Pevné částice (PM)

Částice (PM) mohou na zdraví působit samostatně nebo s jinými naadsorbovanými znečišťujícími látkami. Tyto nebezpečné škodliviny se do lidského těla dostávají především dýchacími cestami a zahrnují hrubé i jemné částice. Ty se mohou hromadit v dýchacím systému a jsou spojeny s četnými zdravotními účinky. Expozice hrubým částicím je primárně spojena se zhoršením respiračních stavů (např. astma). Jemné částice mají už vážnější účinky na zdraví, jako jsou onemocnění srdce a plic (snížení funkce), které mohou vést k hospitalizaci nebo až k

předčasné smrti. Mezi citlivé skupiny patří starší lidé, děti a jednotlivci s kardiopulmonálními[i] onemocněními [65].

3.3.2. Přízemní ozon (O_3)

Škodlivé působení přízemního ozonu (O_3) bylo uvedeno jako součást předchozí podkapitoly „3.2 Příklady fyzikálně-chemických mechanismů" prostřednictvím vzniku a působení smogu.

3.3.3. Oxid dusičitý (NO_2)

Škodlivost oxidu dusičitého (NO_2) souvisí hlavně s inhalační a plicní toxicitou, která může způsobovat mírnou chemickou pneumonitidu, v horších případech až plicní otok. Život ohrožující expozice obvykle působí okamžitě, vdechování NO_2 ale může mít mírný průběh, po kterém následuje období bez příznaků (5-12 h) a následné zhoršení. Mezi příznaky otravy NO_2 patří tachykardie nebo bradykardie[ii], podráždění plic a sliznice traktu, kašel, dušnost, chemická pneumonitida, plicní edém, respirační selhání a methemoglobinémie[iii]. Dále také bolest hlavy, závratě, únava a ztráta vědomí. Rizikem je také popálení očí a poškození rohovky. Působení na kůži může vést k dráždivé dermatitidě a chemickým popáleninám kůže [66].

3.3.4. Oxid siřičitý (SO_2)

Oxid siřičitý (SO_2) obecně dráždí oči, nos a hrdlo. Mezi příznaky expozice patří kašel, slzení, rýma, stažení průdušek a bolest v krku. Oxid siřičitý lze také rozpoznat podle nepříjemné chuti v ústech. Při chronickém působení se může vyvinout tolerance proti zápachu a dráždivým účinkům. Rizikové je působení pro jedince s již existujícím astmatem, kteří jsou náchylní k bronchokonstrikci[iv]. Vysoké expozice mohou způsobit respirační paralýzu a plicní otok. Působení velmi vysokých koncentrací může vyvolat trvalé následky, např. chronickou obstrukční plicní nemoc (CHOPN)[v]. Některé studie prokázaly sníženou funkci plic po chronické expozici oxidu siřičitému [67].

3.3.5. Oxid uhelnatý (CO)

Největším nebezpečím oxidu uhelnatého je jeho vysoká afinita ke krevnímu hemoglobinu, která vede k intoxikaci. Dále může způsobit hypoxii[vi] tkání a postihuje více orgánových systémů. K symptomům chronického působení CO na člověka patří únava, bolest na hrudi, bolesti hlavy, závratě, poruchy paměti, hučení v uších a nevolnost. Akutní působení může vést až ke kómatu a smrti [68].

3.4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – PŮSOBENÍ SO_X (JAKO SLOŽKY KYSELÉHO DEŠTĚ) NA ROSTLINY

3.4.1. Úvod

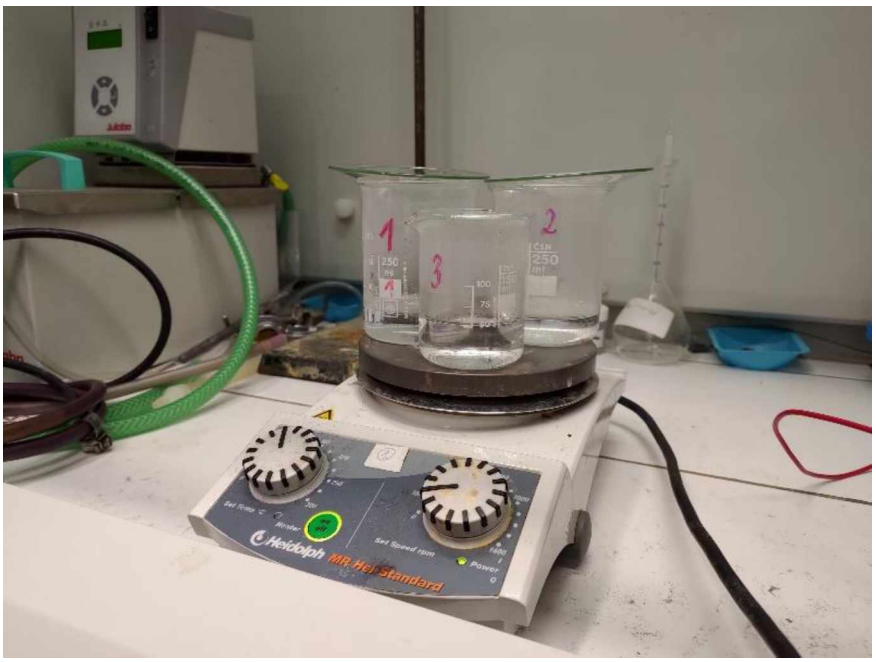
V životním prostředí je jedním z nejvýznamnějších problémů chemického rázu tvorba kyselého deště. V rámci experimentální části došlo k realizaci laboratorní simulace mechanismu působení kyselého deště a bylo ověřováno, zda za ním skutečně stojí kyselina sírová (H_2SO_4).

- Pomůcky: kádinky (100-250 ml), vařič, hodinová skla, digestoř, střička, odměrné baňky (50 ml), dělená pipeta, papírové kapesníky.
- Chemikálie: destilovaná voda (H_2O), roztoky kyseliny sírové, dusičné a chlorovodíkové (50 ml; 0,01 M).

3.4.2. Průběh experimentu

Předem připravené roztoky tří kyselin H_2SO_4, HCl a HNO_3 (50 ml, 0,01 M) byly převedeny do označených kádinek, umístěny na vařič v digestoři, přikryty hodinovým sklem a zahřáty na 150 °C.

- 1 – H_2SO_4
- 2 – HNO_3
- 3 – HCl



Obrázek 32: Zahájení experimentu

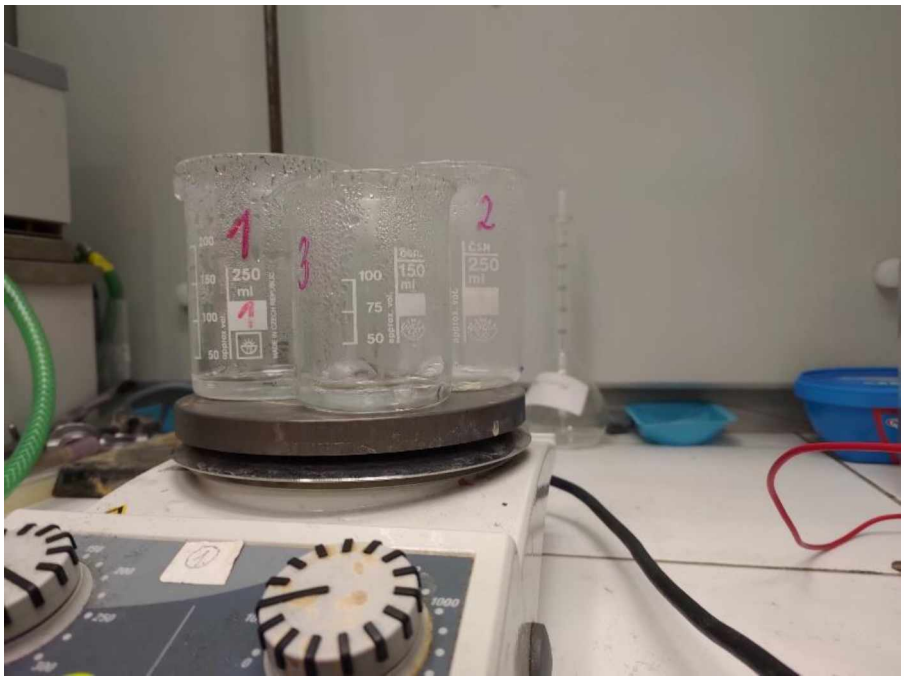
V žádné kádince nebyl pozorován var, ale HNO_3 a HCl se pozvolně začínaly odpařovat. Po chvíli byla teplota zvýšena na 200 °C (snaha o var) a byly sundány hodinová sklíčka, aby bylo zabráněno „destilaci dovnitř“. V tento moment byla nejaktivnější HCl, u které bylo pozorováno na vnitřní straně kádinky intenzivní odpařování.

Obrázek 33: Pozorování odpařování

200 °C nezajistilo var, proto byla teplota zvýšena na 250 °C. HCl začala neočekávaně vřít (byla v nejmenší kádince, měla nejmenší plochu hladiny). Po chvíli se přidala i HNO_3, H_2SO_4 pozvolně. Bylo konstatováno, že nejrychleji vře kyselina, která se rozkládá na oxidy (HNO_3 → vznikající NO_X strhávají molekuly vody – „destilace s vodní parou“).

Následovalo zvýšení teploty na 275 °C. Nejrychlejší var byl pozorován u HNO_3 – objem byl v ten okamžik na ½ z původního množství, H_2SO_4 klesla přibližně o ¼.

Po přibližně 20 min byla HNO_3 téměř vypařená, H_2SO_4 byla na ½ objemu a HCl na 1/3 původního objemu.

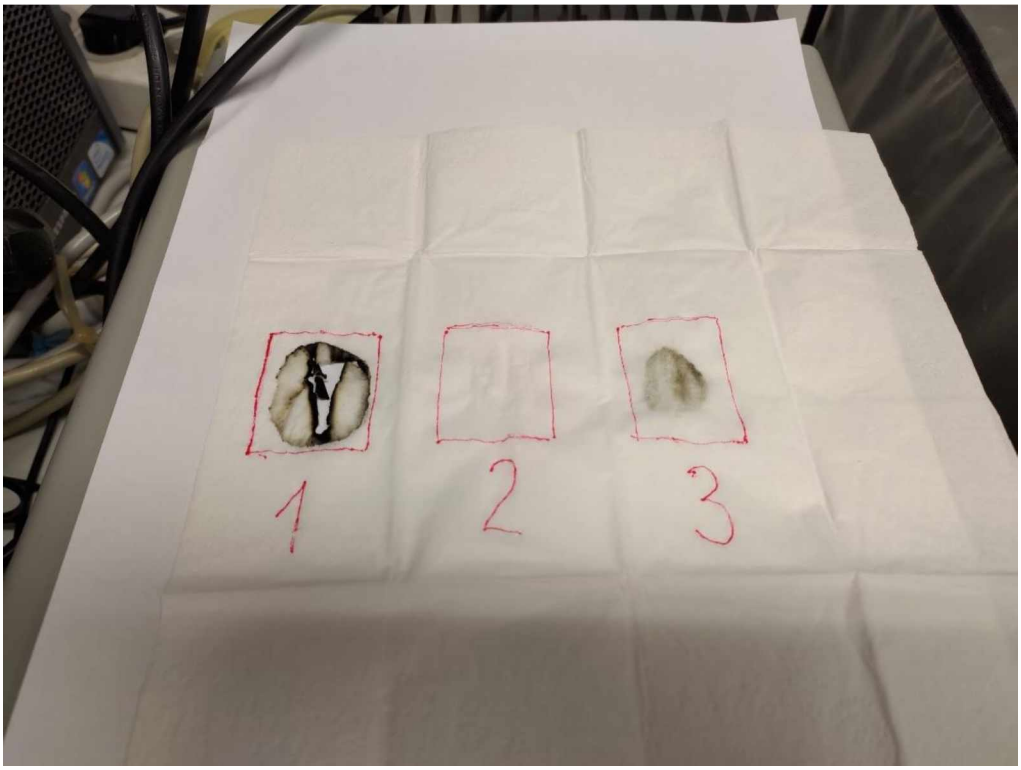


Obrázek 34: Úbytek objemů kyselin

Po 1 h byl ukončen var a v kádinkách nám postupně zůstaly velmi malé objemy. Tato zbytková množství (cca. 0,2 ml) byla pipetou odebrána a kápnuta na papírový kapesník (jako náhrada buničiny). Kapesník jsme poté vysušili.

3.4.3. Závěr experimentu

Skvrna H_2SO_4 po zahájení sušení začala okamžitě uhelnatět, s HNO_3 se nedělo nic a v případě HCl zbytkové chloridy reagovali se vzdušným kyslíkem za vzniku chlornanů, které kapesník nepatrně vypalovaly. Výsledkem tedy bylo konstatování, že H_2SO_4 je skutečně hlavním viníkem devastace porostů při kyselých deštích. Kyselina byla odpařena, tím byla „zakoncentrována“ a výsledné působení na kapesníku se skutečně děje i na listech a jehlicích stromů (samozřejmě ne v takové drastické intenzitě). Experiment byl tímto považován za průkazný, správně provedený a naše zjištění je reprodukovatelné.



Obrázek 35: Výsledný efekt po aplikaci na papírový kapesník

4. OCHRANA OVZDUŠÍ A PROSTŘEDÍ

Uvedené nežádoucí látky, jevy a procesy v ovzduší mají negativní dopad na lidské zdraví a ekosystémy. V současnosti je proto snaha o zamezení těchto vlivů, nebo alespoň jejich omezení na přijatelnou míru. Nejběžněji se tak děje skrze legislativu. Ta je aplikována s přihlédnutím na udržitelný rozvoj.

4.1 LEGISLATIVA A REGULACE

Legislativa ochrany ovzduší zahrnuje značné množství platných právních předpisů. Protože je Česká republika součástí Evropské unie, národní legislativa vychází z té evropské. Nejvyšší právní normou v problematice kvality ovzduší je zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, v platném znění. Ten je dále specifikován vyhláškou č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti a úrovni znečištění a při smogových situacích. EU se v této oblasti řídí Tematickou strategií o znečišťování ovzduší s cílem takové úrovně znečištění, která nebude představovat žádná rizika a nebude mít žádný výrazný dopad pro lidské zdraví ani pro životní prostředí. Evropská legislativa pro ochranu a zlepšení kvality ovzduší je aplikována do naší skrze směrnice [35].

Tab. 2: Přehled hlavních směrnic pro ochranu a zlepšení kvality ovzduší EU [35]

Směrnice	Předmět úpravy
2008/50/ES	o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu
2004/107/ES	o obsahu arsenu, kadmia, rtuti, niklu a PAU ve vnějším ovzduší
2016/2284/EU	o snížení národních emisí některých látek znečišťující ovzduší
2010/75/EU	o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění)
2015/1480	o změně několika 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 vzorků při posuzování kvality vnějšího ovzduší

Ústava České republiky zaručuje šetrné využívání přírodních zdrojů a ochranu přírodního bohatství ze strany státu. Listina základních práv a svobod udává právo na příznivé životní prostředí pro všechny a na zisk včasných a úplných informací o aktuálním stavu životního prostředí a přírodních zdrojů. Zároveň říká, že nesmí docházet k poškozování životního prostředí, přírodních zdrojů nebo kulturních památek nad zákonnou míru při výkonu občanských práv [69; 70].

„Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší,

snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.

Tento zákon zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje:

a) přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší,
b) způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení,
c) nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší,
d) práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší,
e) práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě.“ [33]

Příloha č. 1 k zákonu o ochraně ovzduší udává imisní limity a přípustné četnosti jejich překročení. Jsou závazné pro orgány ochrany ovzduší, obce a kraje při výkonu jejich působnosti. Na základě imisních limitů se vyhodnocuje přípustná úroveň znečištění a jsou vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a pro ochranu ekosystémů a vegetace (viz. následující tabulky) [33].

Tab. 3: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení [33]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu g.m^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	125 $\mu g.m^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu g.m^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	40 $\mu g.m^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr[1]	10 $mg.m^{-3}$	0
Benzen	1 kalendářní rok	5 $\mu g.m^{-3}$	0
Částice PM_{10}	24 hodin	50 $\mu g.m^{-3}$	35
Částice PM_{10}	1 kalendářní rok	40 $\mu g.m^{-3}$	0
Částice $PM_{2,5}$	1 kalendářní rok	20 $\mu g.m^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	0,5 $\mu g.m^{-3}$	0
Arsen[2]	1 kalendářní rok	6 $ng.m^{-3}$	X
Kadmium[2]	1 kalendářní rok	5 $ng.m^{-3}$	X
Nikl[2]	1 kalendářní rok	20 $ng.m^{-3}$	X
Benzo(a)pyren[2]	1 kalendářní rok	1 $ng.m^{-3}$	X
Troposférický ozon	maximální denní osmihodinový průměr[1]	120 $\mu g.m^{-3}$	25

Tab. 4: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [33]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	kalendářní rok a zimní období (1. října - 31. března)	20 $\mu g.m^{-3}$	X
Oxidy dusíku[3]	1 kalendářní rok	30 $\mu g.m^{-3}$	X
Troposférický ozon	AOT40[4]	18000 $\mu g.m^{-3}.h$	0

Česká republika ratifikovala značné množství smluv, kterými se zavázala k plnění jejich cílů v oblasti změny klimatu, ochrany ovzduší, ochranu ozonové vrstvy a dalších sfér životního prostředí.

[1] „Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu. Každý osmihodinový 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.“ [33].
[2] Pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM_{10} [33].
[3] Součet objemových poměrů NO a NO_2 vyjádřený v jednotkách hmotnostní koncentrace oxidu dusičitého [33].
[4] „Pro účely tohoto zákona AOT40 znamená součet rozdílů mezi hodinovou koncentrací větší než 80 µg.m-3 (= 40 ppb) a hodnotou 80 µg.m-3 v dané periodě užitím pouze hodinových hodnot změřených každý den mezi 08:00 a 20:00 SEČ, vypočtený z hodinových hodnot v letním období (1. května - 31. července)“. [33].

Problematiku snížení emisí skleníkových plynů na stanovenou úroveň řeší Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (Rio de Janeiro, 1992) a Pařížská dohoda (Paříž, 2015), která nahradila Kjótský protokol (Kjóto, 1997). Obsahově se jedná o ochranu klimatu i pro příští generace, povinnost poskytovat pomoc zemím rozvojovým, chránit zranitelné oblasti a aplikovat princip předběžné opatrnosti. Plnění těchto cílů probíhá prostřednictvím legislativy jednotlivých zemí (např. postupné snižování emisí v procentech vůči roku 1990, povinnost stanovit vnitrostátní redukční příspěvky k plnění apod.), přičemž Česká republika je zastupována prostřednictvím EU. Dalším významným dlouhodobým závazkem je snaha o udržení nárustu průměrné teploty pod 2 °C oproti průmyslové revoluci a také, aby nárust nepřekročil 1,5 °C. Tyto smlouvy byly ratifikovány téměř všemi zeměmi světa [71; 72; 73].

Ochranou ovzduší se zabývá Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (Ženeva, 1979), ve které je zdůrazňována převážně prevence znečišťování. K úmluvě jsou postupně připojovány protokoly a každý z nich řeší specifickou oblast (např. Protokol o těžkých kovech). Protokoly nařizují snižování daných emisí v procentech, v závažnějších případech zakazují i výroby. V České republice probíhá plnění úmluvy prostřednictvím české legislativy – nejen skrze zákon o ochraně ovzduší [74].

Ochrana ozonové vrstvy je řešena Vídeňskou úmluvou na ochranu ozonové vrstvy (Vídeň, 1985). Důraz je kladen na poškozování ozonové vrstvy z antropogenní činnosti z důvodu dopadů na lidské zdraví a životní prostředí. Nástrojem plnění cílů je převážně výzkum a sdílení informací, které se následně vyhodnocují. Úmluva byla později doplněna Montrealským protokolem o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu (Montreal, 1987). Jedná se o seznam téměř 100 regulovaných látek, u kterých je prokázán značný negativní vliv na ozonovou vrstvu (vlivem např. vysoké chemické stálosti). U těchto látek se usiluje o ukončení výrob a nakládání. Typickými zástupci jsou látky ze skupin freonů a halonů [75].

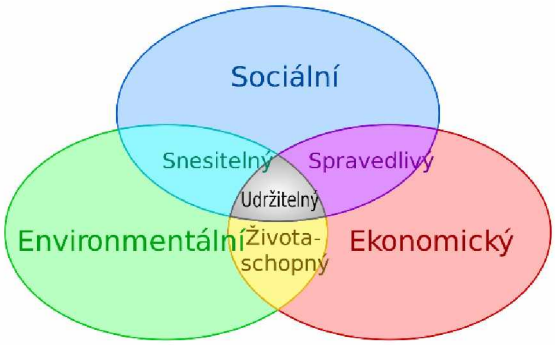
4.2 UDRŽITELNÝ ROZVOJ

4.2.1. Historie udržitelného rozvoje

Základem pro pojem „udržitelný rozvoj“ bylo vydání publikace Meze růstu (1972) a Světové strategie ochrany životního prostředí (1980). První uznaná definice trvale udržitelného rozvoje se vyskytla v publikaci Naše společná budoucnost v roce 1987. Tato zpráva byla přijata Valným shromážděním OSN a definuje jej jako: „takový rozvoj, který splňuje potřeby současnosti, aniž by byla ohrožena schopnost budoucí generace, aby uspokojily své vlastní potřeby.“ [76].

Pojem trvale udržitelný rozvoj je také obsažen v národní legislativě, a to v zákonu č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, který ho definuje jako: „takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachovává možnost uspokojovat jejich základní životní potřeby, a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystémů.“ [77].

Dalším významným milníkem bylo ustanovení Výboru OSN pro trvale udržitelný rozvoj v roce 1993. Od tohoto momentu byl udržitelný rozvoj chápán jako priorita každé členské země a v roce 1998 na zasedaní Rady OECD v Paříži to bylo i oficiálně prohlášeno. „Zachování udržitelné budoucnosti jako nejnaléhavější výzvy dneška“ označil udržitelný rozvoj Summit tisíciletí v New Yorku v roce 2000. O dva roky později proběhla v Johannesburgu Celosvětová konference OSN o udržitelném rozvoji, která definovala jeho nové pojetí jako rovnováhu třech základních pilířů: ekonomického, sociálního a environmentálního. Jako potvrzení starých závazků a upozornění na koncept zelené ekonomiky posloužil dokument z Konference OSN o udržitelném rozvoji, která proběhla v roce 2012 v Riu de Janeiru. V popředí problematiky udržitelného rozvoje je nyní tzv. Agenda 2030 – 17 cílů z oblastí globálních problémů lidstva, které by měly být naplněny do roku 2030. Byla přijata v roce 2015 na konferenci OSN o udržitelném rozvoji v New Yorku a Česká republika ji přejala jako implementační dokument Česká republika 2030. Nejnovější událostí v této oblasti bylo vyhlášení Dekády OSN pro obnovu ekosystému pro roky 2021 až 2030 [78; 79].



Obrázek 36: Pilíře udržitelného rozvoje [95]

4.2.2. Agenda 21 a indikátory udržitelného rozvoje

V roce 1992 byla také schválena tzv. Agenda 21. Jedná se o objemný dokument schválený na Konferenci OSN o životním prostředí a rozvoji (též Summit Země) v Riu de Janeiru. Lze ho rozdělit do čtyř tematických sekcí, které kladou důraz na globální problémy lidstva (např. sociální a ekonomické aspekty, posilování postavení určitých skupin ve společnosti apod.). Byť se jedná o základní text udržitelného rozvoje, byl v průběhu let nahrazen (doplněn) Deklarací tisíciletí a Agendou 2030 z důvodu např. aplikace nových technologií, změn v životním prostředí a ve společnosti, přesnějších predikcí nebo sociálně-politických problémů. V ČR se efektivně zavádí principy tzv. Místní Agendy 21 (tzn. na regionální úrovni). Zde je kladen důraz na kvalitní veřejnou správu, systém financování a na aktivní komunikaci s veřejností – vše směrem k udržitelnému rozvoji [80; 81].

Tři pilíře a Agenda 21 se zároveň staly i předlohou pro vypracování strategií a souborů indikátorů ze strany vyspělých zemí světa. Tzv. indikátory udržitelného rozvoje (životního prostředí) jsou zejména kvantitativní informace (ale i kvalitativní), kterými se hodnotí a měří míra udržitelnosti v hospodářských politikách jednotlivých států. Zároveň se tyto údaje shromažďují a vyhodnocují na lokální i mezinárodní úrovni. Sběr dat je rozdělen do několik sfér a patří sem např. ekonomická, sociální, oblast výzkumu a také environmentální. Tento proces se v ČR realizuje skrze Strategii udržitelného rozvoje ČR, konkrétně situačními zprávami a řeší ho příslušný výbor a Rada vlády pro udržitelný rozvoj.

V Tab. 5 je uveden prvotní přehled jednotlivých indikátorů z environmentální sféry, který vychází přímo z Agendy 21 a byl vypracován Komisí OSN pro trvale udržitelný rozvoj [82; 83; 84].

Tab. 5: Přehled indikátorů Komise OSN pro TUR: Environmentální – ovzduší [83][5]

Č. ind.	Kap. A21	Vliv, stav, odezva	Název	Jednotka
107	9	Vliv	Emise CO_2	t
108	9	Vliv	Emise SO_X a NO_X	t
109	9	Vliv	Spotřeba látek narušujících ozonovou vrstvu	t
110	9	Stav	Koncentrace SO_2, CO_2, NO_X, O_3 a prašného aerosolu v městských oblastech	ppm
111	9	Odezva	Výdaje na omezení znečišťování ovzduší	USD
112	9	Odezva	Omezení produkce emisí CO_2, SO_2 a NO_X	%/rok

Další metodou sběru, shromažďování a vyhodnocování indikátorů je řazení dle jednotlivých okruhů problémů (např. narušení ozonové vrstvy). Tato metoda byla navržena Organizací pro hospodářskou spolupráci a rozvoj a funguje na principu „vliv – stav – odezva“. Základním dokumentem pro tuto metodiku je Kmenový soubor indikátorů OECD, dle kterého vznikají zprávy o životním prostředí jednotlivých států. Ty se nakonec vzájemně porovnávají a vyhodnocují. Kmenový soubor obsahuje např. oddíly Odpad, Lesy, Degradace půdy apod. V tabulce č. 6 je uveden přehled oddílu Klimatické změny [83].

[5] Odpovídající kapitoly Agendy 21: 9 – Ochrana atmosféry.

Tab. 6: Kmenový soubor indikátorů OECD: Klimatické změny [83]

	Významnost	Jevy	Měřitelnost[6] (čas. hledisko)
Vliv	*	Index emisí GHG	S/M
		Emise CO_2	S
		Emise CH_4	S/M
		Zdánlivá spotřeba CFC 11 a 12, halonů	S/M
		Emise N_2O	M
Stav	*	Atmosférická koncentrace GHG	S
	*	Celková průměrná teplota	S
Odezva	*	Energetická účinnost	M/L
		Energetická intenzita	S
		Implicitní a explicitní energetická daň /CO_2	M/L
		Výdaje na energetickou účinnost, alternativní zdroje, výzkum klimatických změn	M

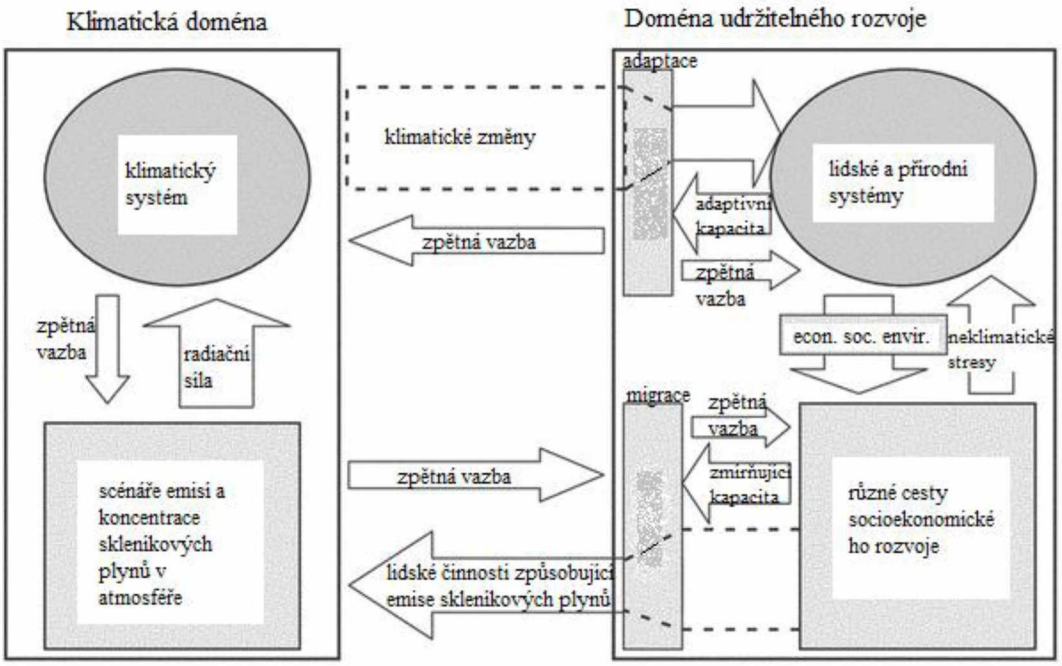
Myšlenky a principy trvale udržitelného rozvoje se prakticky aplikují z jediného důvodu – kvůli klimatické změně. Změna klimatu je jednoznačná a velmi pravděpodobně způsobena lidskou činností. Změny důležitých klimatických proměnných (např. průměrná globální teplota) jsou hnací silou změn v přirozených a řízených ekosystémech. Změna klimatu tedy funguje jako iniciátor pro téměř všechny globální problémy lidstva, na které hledá řešení právě trvale udržitelný rozvoj [85; 86].

4.2.3. Shrnutí

Obr. 37 ukazuje rámec integrovaného modelování a hodnocení (IAM), včetně úplného cyklu příčin a následků mezi změnou klimatu a udržitelným rozvojem. Každá cesta socio-ekonomického rozvoje v pravém dolním kvadrantu (řízených populací, ekonomikou, technologií a správou věcí veřejných) vede k různým úrovním emisí skleníkových plynů. Tyto plyny se hromadí v atmosféře a narušují přirozenou rovnováhu mezi slunečním zářením a energií vyzařovanou ze Země (klima. doména). Tyto změny jsou základem pro zesílený skleníkový efekt, který zvyšuje radiační působení. Dochází ke změnám klimatu a také ke stresovému působení na lidské a přírodní systémy zobrazené v pravém horním kvadrantu (UR doména). To vede k dopadům na socio-ekonomický rozvoj, čímž se cyklus uzavírá. Vývojové

[6] S – krátkodobé (přímo měřitelné), M – střednědobé (vyžadující empirické zpracování), L – dlouhodobé (náročnější vývoj a zpracování dat).

cesty mají také přímý vliv na přírodní systémy ve formě neklimatických stresů, jako jsou změny ve využívání půdy (což vede k odlesňování a degradaci půdy) [86].



Obrázek 37: Schéma cyklu interakcí mezi změnou klimatu a udržitelným rozvojem [86]

4.3 STAV PROBLEMATIKY V ČR

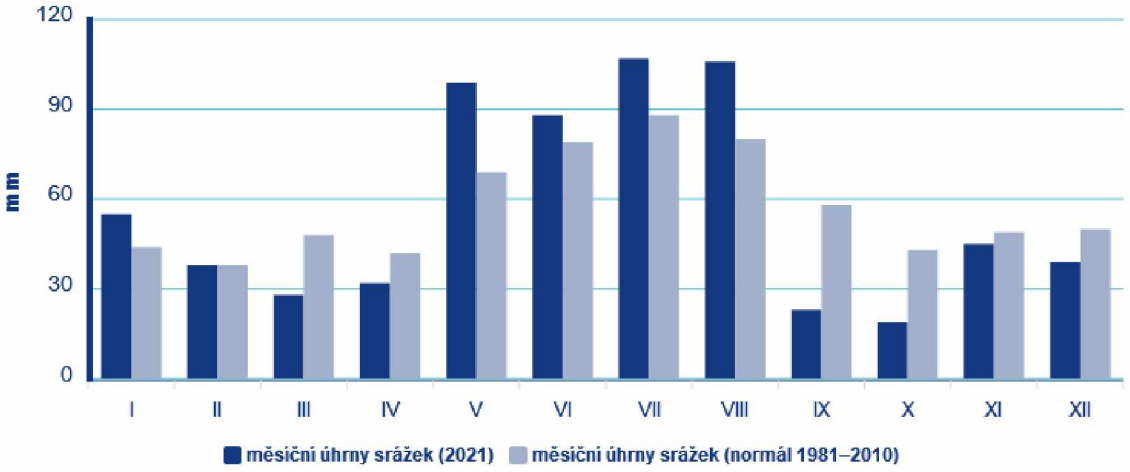
Problematiku ovzduší v České republice řeší primárně příspěvková organizace Český hydrometeorologický ústav. Jedná se o ústřední státní ústav pro obory ovzduší, klimatologie, meteorologie, hydrologie a jakost vody. Jeho primárním úkolem je pozorovat, měřit a monitorovat a následně zjištěné a naměřené údaje zpracovat, vyhodnotit a dle zákona je zveřejnit. Dále na jejich základě ústav vydává předpovědi a výstrahy. Další činností je vědecká a výzkumná činnost [87].

Mezi hlavní polutanty ovzduší v České republice patří oxid uhelnatý (CO), oxid siřičitý (SO_2), přízemní ozon (O_3), oxid dusný (NO_2), benzopyreny a prachové částice $PM_{2,5}$ a PM_{10}. Těm také věnuje ČHMÚ největší pozornost. Je to z důvodu jejich koncentrace v ovzduší v poměru k ostatním polutantům a také jejich vlivu na lidské zdraví a ekosystémy [88].

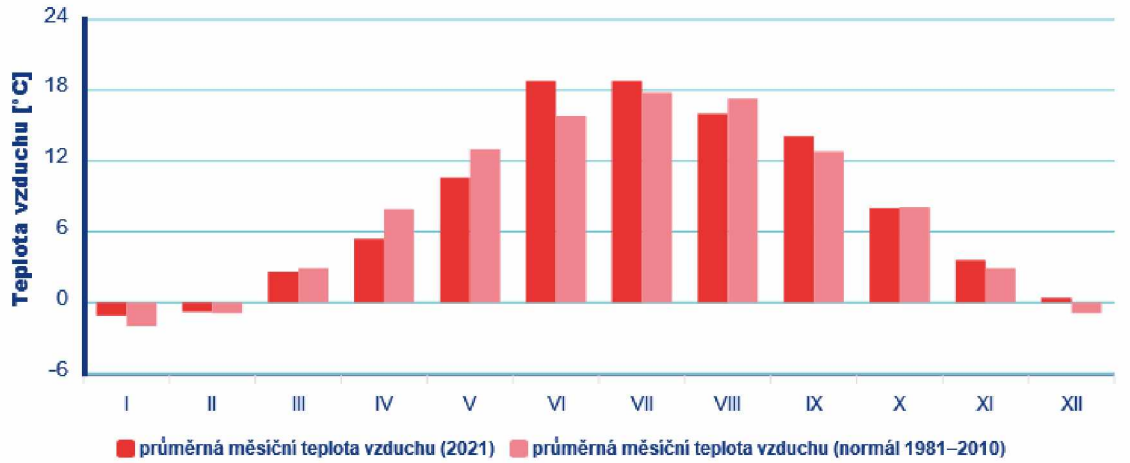
4.3.1. Stav ovzduší v ČR v roce 2021

Dle předběžného zhodnocení kvality ovzduší na území České republiky v roce 2021 byl tento rok velmi příznivý. Koncentrace všech výše uvedených sledovaných látek dosáhla v rámci hodnoceného období (tj. 2011-2021) nejnižších hodnot. Dokument ovšem uvádí, že roky 2021 a 2020 byly silně ovlivněny výskytem koronaviru SARS-CoV-2, respektive nouzovými stavy

a ochrannými opatřeními. Index kvality ovzduší[7] pro rok 2021 byl stanoven jako velmi dobrý až dobrý. Z meteorologického pohledu lze mluvit v souvislosti s rozptylovými podmínkami jako o standardu a z hlediska teplot a srážek jako o normálu. Stejný příznivý vývoj byl sledován i u přízemního ozonu a prachových částic. Nutno však podotknout, že k odchylkám od zde popisovaných výsledků mohlo dojít (např. červen pro PM_{10} a $PM_{2,5}$) [89].

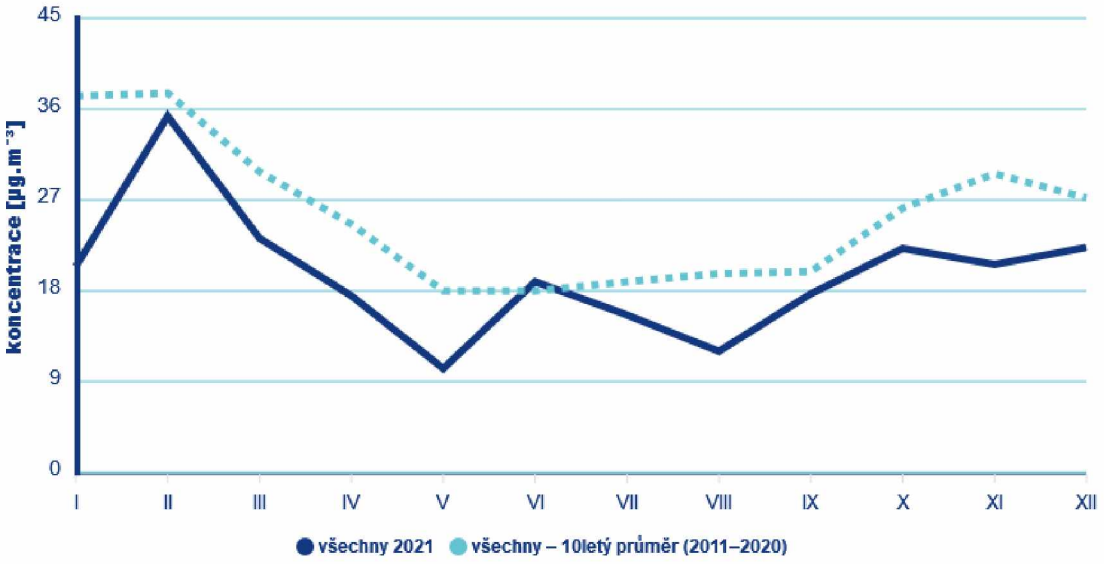


Obrázek 38: Měsíční úhrny srážek v roce 2021 v porovnání s normálem 1981-2010 [89]

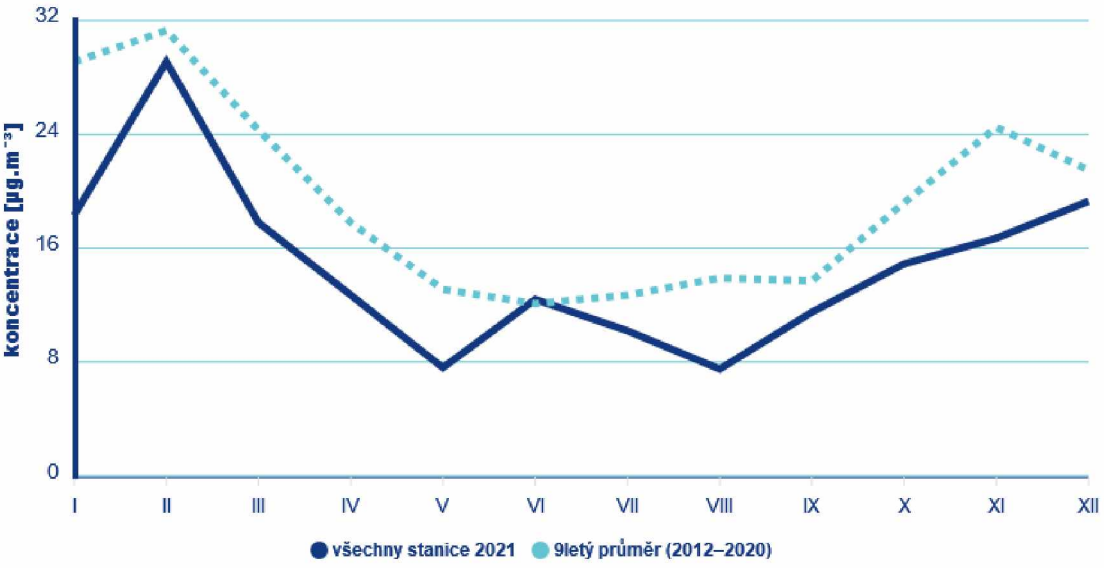


Obrázek 39: Průměrné měsíční teploty vzduchu v roce 2021 v porovnání s normálem 1981-2010 [89]

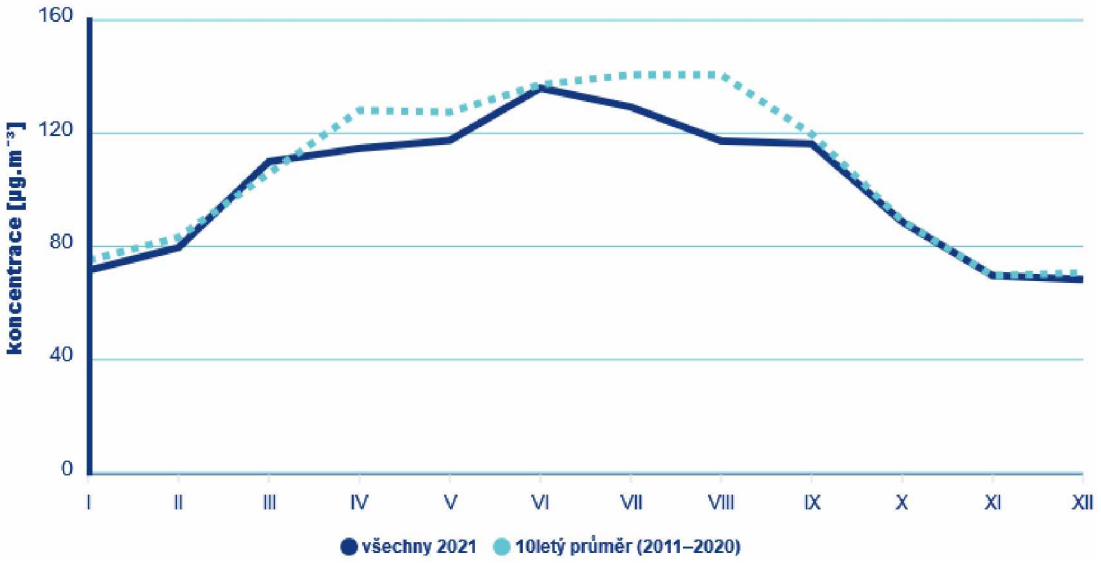
[7] Relativní vyjádření míry znečištění ovzduší dle 4 nejvýznamnějších znečišťujících látek: PM_{10}, $PM_{2,5}$, NO_2 a O_3 [35]



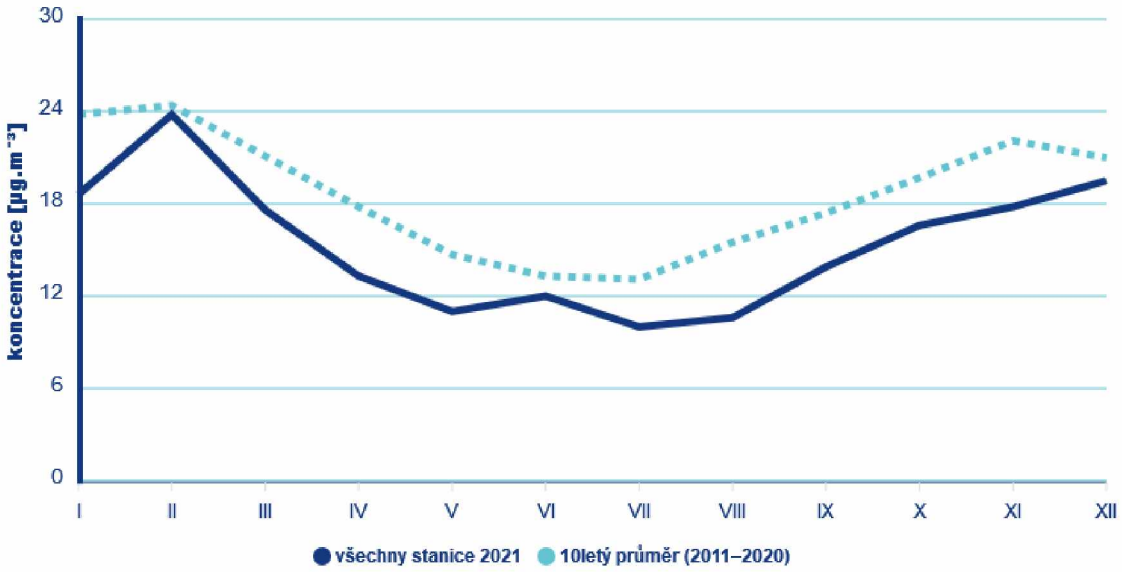
Obrázek 40: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací PM_{10} (průměry pro všechny stanice), 2021 [89]



Obrázek 41: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací $PM_{2,5}$ (průměry pro všechny stanice), 2021 [89]



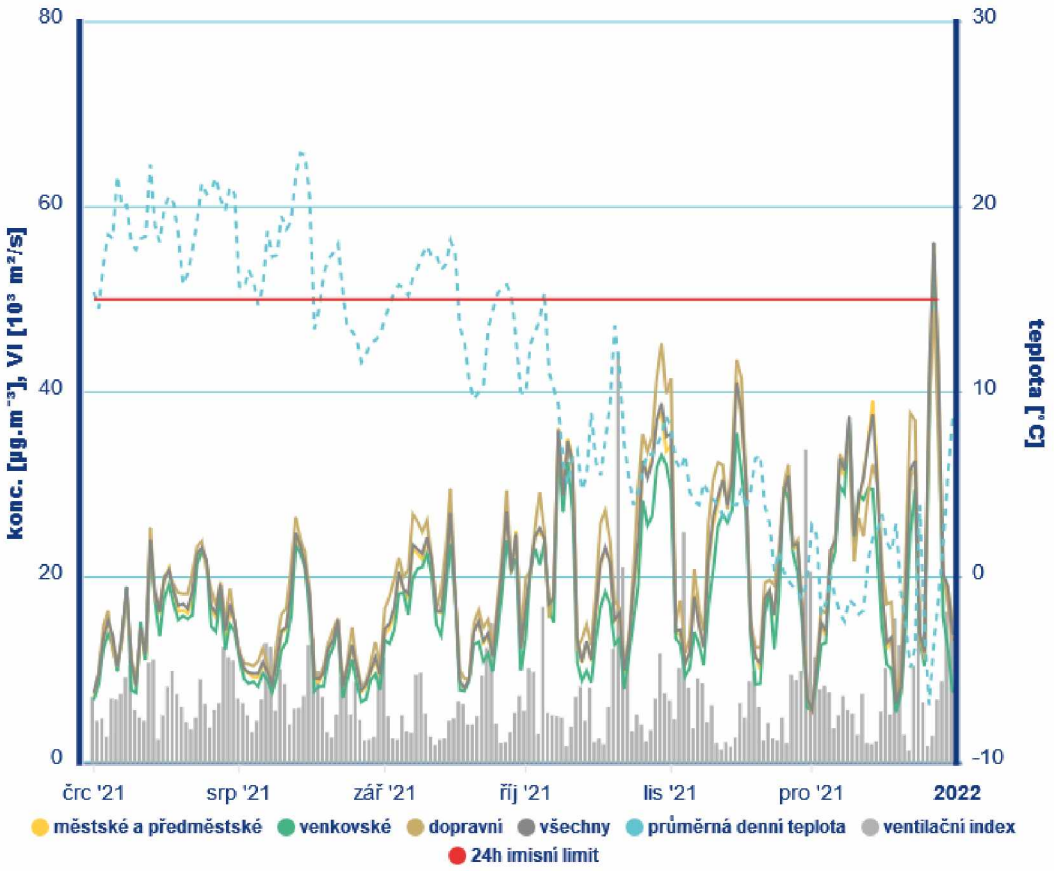
Obrázek 42: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací O_3 (max. denní 8hod. klouzavý průměr; průměry pro stanice), 2021 [89]



Obrázek 43: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací NO_2 (průměry pro stanice), 2021 [89]

„Průměrná roční teplota vzduchu byla 8,0 °C (tj. o 0,1 °C vyšší než normál 1981-2010 – první teplotně normální rok od roku 2013). Průměrný roční úhrn srážek byl 678 mm (99 % normálu 1981-2010). K překročení 24hodinového imisního limitu PM_{10} (50 $\mu g \cdot m^{-3}$, povolený počet překročení 35× za kalendářní rok) došlo v roce 2021 na 3 % stanic (4 stanice z celkového počtu 118). Imisní limit pro průměrnou roční koncentraci PM_{10} (40 $\mu g \cdot m^{-3}$) nebyl v roce 2021, potřetí v řadě po letech 2019 a 2020 za celou historii měření PM_{10} od roku 1993, překročen na žádné stanici ČR. Imisní limit pro roční průměrnou koncentraci $PM_{2,5}$ (20 $\mu g \cdot m^{-3}$) byl v roce

2021 překročen na 10 z 86 stanicích (12 %). Hodnota imisního limitu pro denní maximum klouzavého 8hodinového průměru O3 je 120 µg·m−3. Legislativa připouští nejvíce 25 překročení hodnoty imisního limitu O3 za rok, v průměru za tři roky; při vyšším počtu je imisní limit považován za překročený. V roce 2021 k překročení imisního limitu došlo na čtyřech regionálních stanicích a na jedné pozaďové předměstské. Imisní limit hodinové koncentrace NO_2 (200 µg·m^{-3}) s maximálním povoleným počtem 18 překročení za rok) nebyl v roce 2021 překročen na žádné stanici. Hodnota hodinového imisního limitu NO_2 byla překročena jednou. Hodnota hodinového imisního limitu ani hodnota 24 h imisního limitu pro SO_2 nebyla v roce 2021 překročena na žádné stanici. Imisní limity hodinové a 24h koncentrace SO_2 nebyly tedy v roce 2021 překročeny na žádné měřicí stanici. K překročení imisního limitu CO (maximální 24 h 8hodinový průměr 10 000 µg·m^{-3}) nedošlo v roce 2021 na žádné stanici.“ [89]



Obrázek 44: Vývoj průměrných 24 h koncentrací PM_{10} na stanicích pro daný typ stanic a celorepublikového průměru teploty a ventilačního indexu, červenec–prosinec 2021 [89]

„V roce 2021 byla vyhlášena jedna smogová situace (v celkové délce 58 h, tj. 2,4 dní) z důvodu vysokých koncentrací suspendovaných částic PM_{10}.“ [89]

Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci s dalšími organizacemi také pravidelně vydává Zprávy o kvalitě života a její udržitelnosti. Jedná se o vyhodnocení plnění Strategického rámce České republiky 2030, který prakticky vychází z již zmíněné Agendy 2030 pro udržitelný rozvoj. Vydávané zprávy jsou rozděleny na oblasti lidé a společnost, hospodářský model, odolné ekosystémy, obce a regiony, globální rozvoj a dobré vládnutí. Příkladem konkrétního bodu v analýze je např. snaha o pestrost české krajiny a obnovu biologické rozmanitosti. Zpráva konstatuje, že dosažení cílů u biodiverzity je zatím v nedohlednu a je dosahováno pouze omezeného pokroku. V oblasti obnovy narušených ekosystému ale vyzdvihuje pozitivní kroky, např. zatopování důlních děl. Zprávy o kvalitě života a její udržitelnosti a Hodnocení zranitelnosti České republiky ve vztahu ke změně klimatu mají určitou podobnost, např. ve výběru a hodnocení daných indikátorů [90].

5. ZÁVĚR

Klimatické změny jsou nepopiratelným jevem, kterému dnešní společnost a svět čelí. Dějí se přirozeně, ale člověk do nich v posledních stoletích značně zasáhl. A teprve nedávno si to začal uvědomovat.

Tato bakalářská práce byla zaměřena na vybrané aspekty produkce plynů ovlivňujících klimatické změny. Důraz byl kladen i obecně na plyny – na jejich složení a formy v atmosféře ale i v jiných sférách životního prostředí. Zvláštní důraz byl věnován skupině skleníkových plynů. Pozornost byla věnována také zdrojům plynných složek atmosféry a v rámci ochrany ovzduší konkrétně produkce polutantů z antropogenních i přírodních zdrojů. Plyny samozřejmě podléhají mnoha fyzikálně-chemickým reakcím a přeměnám, proto se v kapitolách pojednávalo i o plynových cyklech, reakčních mechanismech v ovzduší a opět z hlediska ochrany i o biologickém a zdravotním působení. Práce byla uzavřena obecně ochranou ovzduší a prostředí, a to z pohledu regulací a legislativy. Popsán byl i princip trvale udržitelného rozvoje a jeho aplikace v současnosti. Na závěr proběhlo zhodnocení stavu problematiky v České republice, pro který byla využita aktuální data z roku 2021.

Tato práce tedy shrnula a posoudila množství příkladů vlivu plynů na životní prostředí, s přihlédnutím k aktuálním klimatickým změnám a potřebám udržitelného rozvoje, včetně stavu v České republice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] KOPÁČEK, Jaroslav, Jan BEDNÁŘ a Michal ŽÁK. *Jak vzniká počasí*. Vydání druhé, rozšířené a upravené. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2019. ISBN 978-80-246-4423-3.

[2] KALIČINSKÁ, Jitka. *Monitorování životního prostředí: Ovzduší*. Ostrava: Pavel Klouda, 2006. ISBN 80-863-6913-7.

[3] BRAUN, Petr. *PŘÍRUČKA OCHRANY KVALITY OVZDUŠÍ: Chemie atmosféry* [online]. 1. vydání. Praha, 2013 [cit. 2022-06-12]. ISBN 978-80-86832-77-7. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/aktuality/2016/12/OOO-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf

[4] HOLOUBEK, Ivan. *Troposférická chemie*. Brno: Masarykova univerzita, 2005. ISBN 80-210-3656-7.

[5] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ. *ATMOSFÉRA A KLIMA, AKTUÁLNÍ OTÁZKY OCHRANY OVZDUŠÍ*. Praha: Karolinum, 2011. ISBN 978-80-246-1598-1.

[6] CAPEHART, Barney, William KENNEDY a Wayne TURNER. *Guide to Energy Management - International Version: 19.2.1 What are Greenhouse Gases?* [online]. 8. Vydání. River Publishers, 2016 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0113HD18/guide-energy-management/what-greenhouse-gases

[7] CUSHMAN-ROISIN, Benoit a Bruna CREMONINI. *Data, Statistics, and Useful Numbers for Environmental Sustainability - Bringing the Numbers to Life: 4.2 Greenhouse Gases* [online]. Elsevier, 2021 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012WNV51/data-statistics-useful/greenhouse-gases

[8] BRITANNICA, The Editors of Encyclopedia. In: *Lithosphere* [online]. Encyclopedia Britannica, 2009 [cit. 2022-06-13].

[9] RUSSELL, Edward a Alfred APPLEYARD. *The Atmosphere of the Soil: Its Composition and the Causes of Variation* [online]. The Journal of Agricultural Science, 1915 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: https://core.ac.uk/download/pdf/162100858.pdf

[10] HALE, M. *Geochemical Remote Sensing of the Sub-Surface: 1.3 Indicator and Pathfinder Gases for Exploration* [online]. Elsevier, 2000 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004OUT13/geochemical-remote-sensing/genesis-behaviour-indicator-pathfinder

[11] BREVIK, Eric C. *Soil Horizons: Soils and Climate Change: Gas Fluxes and Soil Processes* [online]. 2012 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sh12-04-0012

[12] DARLING, Peter. *SME Mining Engineering Handbook: 3.4.6.1.1 Sieving and Crushing* [online]. 3. Vydání. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011, s. 132 [cit. 2022-06-13].

[13] ŠIMEK, Miloslav. Skleníkové plyny v půdě: Hlavní zdroje emisí v zemědělství a možnosti jejich snížení. *Vesmír* [online]. VESMÍR, spol. s r. o., 2008, **20089**(87) [cit. 2022-06-13]. ISSN 1214-4029.

[14] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. In: *Hydrosphere* [online]. Encyclopedia Britannica, 1998 [cit. 2022-06-14].

[15] DAINTITH, John a Elizabeth MARTIN. *Dictionary of Science: hydrosphere* [online]. 6. Vydání. Oxford University Press, 2010, s. 408 [cit. 2022-06-14].

[16] RUDA, Aleš. Klimatologie a hydrogeografie pro učitele: Pedagogická faktulta Masarykovy univerzity. In: *Voda na Zemi* [online]. [cit. 2022-06-14].

[17] DAINTITH, John a Elizabeth MARTIN. *Dictionary of Science: water* [online]. 6. Vydání. Oxford University Press, 2010, s. 869 [cit. 2022-06-14].

[18] In: *Sbírka fyzikálních zákonů: Hopeho experiment: Anomálie vody* [online]. 2019 [cit. 2022-06-14].

[19] UTTENDORFSKÝ, Petr. *Stanovení funkční závislosti koncentrace vzduchu ve vodě v závislosti na tlaku: Teorie rozpustnosti plynů v kapalinách* [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17671. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. František Pochylý, CSc.

[20] HETEŠA, Jiří a Ivo SUKOP. *Ekologie vodního prostředí*. V Brně: Vysoká škola zemědělská, 1994. ISBN 80-715-7131-8.

[21] LELLÁK, Jan. *Hydrobiologie*. Praha: Karolinum, 1991. ISBN 80-706-6530-0.

[22] HARTMAN, Pavel, Ivo PŘIKRYL a Eduard ŠTĚDRONSKÝ. *Hydrobiologie*. 2., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 1998. ISBN 80-860-7327-0.

[23] O'HAYRE, Ryan, Suk-Won CHA, Whitney COLELLA a Fritz PRINZ. *Fuel Cell Fundamentals: 14.3.2 Natural Greenhouse Effect* [online]. 3. Vydání. John Wiley & Sons, s. 10 [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CR5Q02/fuel-cell-fundamentals/natural-greenhouse-effect

[24] NASA. *Tracking Earth's Energy: From El Niño to Global Warming* [online]. In: . [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Globalni_toky_energie_cs.svg

[25] NORD, Lars a Olav BOLLAND. *Carbon Dioxide Emission Management in Power Generation: 1.1 Greenhouse Effect* [online]. John Wiley & Sons, 2022, s. 1 [cit. 2022-06-10].

[26] SPECHT, Eckehard. *Heat and Mass Transfer in Thermoprocessing - Fundamentals - Calculations - Processes: 8.6.2.2 Mathematical Model* [online]. Vulkan Verlag, s. 312 [cit. 2022-06-11].

[27] ROHDE, Robert A. *Spectrum of Solar Radiation (Earth)* [online]. In: . 2017 [cit. 2022-06-11].

[28] KALVOVÁ, Jaroslava a Bedřich MOLDAN. *Klima a jeho změna v důsledku emisí skleníkových plynů: Skleníkový efekt atmosféry*. Praha: Karolinum, 1996. ISBN 80-718-4315-6.

[29] MACDONALD, Eoin H. *Handbook of Gold Exploration and Evaluation: 3.2.1.4 The Greenhouse Effect* [online]. Woodhead Publishing, 2007, s. 149-150 [cit. 2022-06-11].

[30] DELORME. In: *Mauna Loa CO2 Monthly Mean Concentration: Data from Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL and Dr. Ralph Keeling* [online]. Scripps Institution of Oceanography [cit. 2022-06-11].

[31] VALLERO, Daniel. *Fundamentals of Air Pollution: 10.1.2.1 Industrial Sources* [online]. 4. Vydání. Elsevier, 2008, s. 314-315 [cit. 2022-06-15].

[32] NIGAM, Anshul a Rupal GUPTA. *Environmental Analysis Laboratory Handbook: 1.2.3 Air Pollutants* [online]. John Wiley & Sons, 2020, s. 4-5 [cit. 2022-06-15].

[33] ČESKO. Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012: Zákon o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Praha, 2012, částka 69, s. 2786. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/201_2012.pdf

[34] DIRNER, Vojtech. *Ochrana životního prostředí: základy, plánování, technologie, ekonomika, právo a management*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997. ISBN 80-707-8490-3.

[35] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Ročenka kvality ovzduší 2020: Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-04-04]. ISBN 978-80-7653-024-9. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/20_rocenka_UKO_v4_WEB_ISBN.pdf

[36] RUMÁNEK, Tomáš. *Redukce NOx ve spalinách* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: https://core.ac.uk/download/pdf/30307244.pdf. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

[37] PALARČÍK, Jiří. *Plynné exhaláty: Procesy a aparáty ochrany životního prostředí (C260)*. 2022.

[38] SADEGHBEIGI, Reza. *Fluid Catalytic Cracking Handbook - An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units: 15.6.6 Selective Noncatalytic Reduction* [online]. 4. Vydání. Elsevier, 2020, s. 293-294 [cit. 2022-06-17].

[39] ERIKSEN, Vernon L. *Heat Recovery Steam Generator Technology: 8. Selective Catalytic Reduction for Reduced NOx Emissions* [online]. Elsevier, 2017 [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011FSWK1/heat-recovery-steam-generator/selective-catalytic-reduction

[40] NUHLÍČEK, Petr. *Výběr a návrh optimální metody odsíření*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. František Hrdlička CSc.

[41] RÁŽ, Jiří. *Případová studie ochrany ovzduší s využitím LCA*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Mgr. Eduard Ščerba, Ph.D.

[42] OKUBO, Masaaki a Takuya KUWAHARA. *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines: 3.3.3 Dry Method of De-SOx* [online]. Elsevier, 2020, s. 90-91 [cit. 2022-06-17].

[43] PILNÝ, Jaroslav. *Životní prostředí*. 1. Vydání. Hradec Králové: Gaudeamus, 1991. ISBN 80-7041-264-X.

[44] MOLDAN, Bedřich. *Geochemie atmosféry*. Praha: Academia, 1977.

[45] *Works of the Department of Health and Human Services: 14th Report on Carcinogens 2016 - Radon* [online]. U.S. Department of Health and Human Services, 2016, s. 300 [cit. 2022-06-18].

[46] In: *Radioaktivní isotopy pro výzkum, medicínu, technologie* [online]. [cit. 2022-06-18].

[47] HAMPL, Ladislav. *Radon a životní prostředí* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwieuYXOxLf4AhWYHuwKHfAeAS0QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fis.muni.cz%2Fth%2Frivl0%2FRadon_a_zivotni_prostredi_Hampl_Ladislav_Diplomova_prace.doc&usg=AOvVaw0st3mX-nk10JKeoJ_xYZ86. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.

[48] ČESKO. Radonový program České republiky. In: *Národní akční plán pro regulaci ozáření obyvatel z radonu*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2016. Dostupné také z: https://www.radonovyprogram.cz/uvodni-strana/

[49] *2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition): 10.12.1.2 Exposure Standards* [online]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2013, 10.22 [cit. 2022-06-23].

[50] CLEVELAND, Cutler a Christopher MORRIS. *Dictionary of Energy (Expanded Edition): tropospheric ozone* [online]. Elsevier, 2009, s. 530 [cit. 2022-06-18].

[51] HESTER, R.E. a R.M. HARRISON. *Causes and Environmental Implications of Increased UV-B Radiation: 2.4.4 Tropospheric Ozone* [online]. Royal Society of Chemistry (RSC), 2000, s. 25 [cit. 2022-06-18].

[52] WYPYCH, George. *Handbook of Solvents, Volume 2 - Use, Health, and Environment: 16.3.3.2 Tropospheric Photochemistry and Ozone Formation* [online]. 3. Vydání. ChemTec Publishing, 2019, s. 1245-1246 [cit. 2022-06-18].

[53] CHANG, Raymond a John THOMAN. *Physical Chemistry for the Chemical Sciences: 16.4.5 Harmful Effects and Prevention of Photochemical Smog* [online]. University Science Books, 2014, s. 757-759 [cit. 2022-06-23].

[54] JACOB, Daniel J. *Introduction to Atmospheric Chemistry: 6.4 The Oxygen Cycle* [online]. Princeton University Press, 1999, s. 94-96 [cit. 2022-06-19].

[55] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. In: *Carbon cycle* [online]. Encyclopedia Britannica, 1998 [cit. 2022-06-19].

[56] CRICHTON, Robert. *Biological Inorganic Chemistry - A New Introduction to Molecular Structure and Function: 18.4 The Nitrogen Cycle* [online]. 2. Vydání. Elsevier, 2019, s. 504-506 [cit. 2022-06-19].

[57] BHARATHI, P.A. Loka. *Encyclopedia of Ecology: Sulfur Cycle* [online]. 2. Vydání. ScienceDirect, 2008 [cit. 2022-06-19].

[58] DI, Jirka. In: *Koloběhy* [online]. 2017 [cit. 2022-06-19].

[59] VÍDEN, Ivan. *Chemie ovzduší*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0571-4.

[60] SINGH, Jagdamba a Jaya SINGH. *Photochemistry and Pericyclic Reactions: 13.1 Photochemical Reactions in the Atmosphere* [online]. 3. Vydání. New Academic Science, 2012, s. 324-325 [cit. 2022-06-22].

[61] RADOJEVIć, Miroslav a Vladimir BASHKIN. *Practical Environmental Analysis: 2.1.1 Causes of Acid Rain* [online]. 2. Vydání. Royal Society of Chemistry (RSC), 2006, s. 48-51 [cit. 2022-06-22].

[62] JACOB, Daniel J. *Introduction to Atmospheric Chemistry: 13.2 Sources of Acids: Sulfur Chemistry* [online]. Princeton University Press, 1999, s. 249-250 [cit. 2022-06-22].

[63] World Health Organization. In: *Ambient (outdoor) air pollution* [online]. 2021 [cit. 2022-06-21].

[64] *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide* [online]. World Health Organization, 2021 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/who_guidelines/who_guidelines_ambient_air_2021_full.pdf

[65] MILLER, Bruce G. *Clean Coal Engineering Technology: 4.5.3.2 Health Effects* [online]. Elsevier, 2011, s. 114 [cit. 2022-06-21].

[66] HARBISON, Raymond, Marie BOURGEOIS a Giffe JOHNSON. *Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology: 120.12 Historical Toxic Hazard Incidents in Ground Operations* [online]. 6. Vydání. John Wiley & Sons, 2015, s. 1314 [cit. 2022-06-21].

[67] THOMAS, Susan P. *AFS Health & Safety Guides: Sulfur Dioxide (SO2)* [online]. 4. Vydání. American Foundry Society (AFS) [cit. 2022-06-21].

[68] SOLANKI, Arun, Adarsh KUMAR a Anand NAYYAR. *Digital Cities Roadmap - IoT-Based Architecture and Sustainable Buildings: 9.2.4 Carbon Monoxide (CO)* [online]. John Wiley & Sons, 2021, s. 300 [cit. 2022-06-21].

[69] ČESKO. Ústavní zákon č. 1/1993 Sb. ze dne 16. prosince 1992: Ústava České republiky. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Praha, 1992, Článek 7. Dostupné také z: https://www.psp.cz/docs/laws/constitution.html

[70] ČESKO. Ústavní zákon č. 2/1993 Sb. ze dne 16. prosince 1992: Listina základních práv a svobod. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Praha, 1992, Hlava čtvrtá, Článek 35. Dostupné také z: https://www.psp.cz/docs/laws/listina.html

[71] *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu: Český překlad protokolu*. In: . Kjóto, 1997, č. 81/2005 Sb. m. s. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf

[72] *Pařížská dohoda: Český překlad dohody*. In: . Paříž, 2015. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/parizska_dohoda/$FILE/OEOK-Cesky_preklad_dohody-20160419.pdf

[73] *Rámcová úmluva OSN o změně klimatu: Český překlad úmluvy*. In: . Rio de Janeiro, 1992, č. 80/2005 Sb.m.s. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/ramcova_umluva_osn_zmena_klimatu/$FILE/OMV-cesky_umluva-20081120.pdf

[74] *Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států: Český překlad úmluvy*. In: . Ženeva, 1997, č. 5/1985 Sb. m. s. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/cz/umluva_o_dalkovem_znecistovani_ovzdusi_hranice

[75] ACHRER, Jakub. *OCHRANA OZONOVÉ VRSTVY V ČESKÉ REPUBLICE: 20 let od podepsání Montrealského protokolu* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 2007 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-80-7212-471-8. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/videnska_umluva_montrealsky_protokol_dokument/$FILE/OVM-OOVZvCR-20letMP-20191112.pdf

[76] BAYLEY, A. a T. STRANGE. *OECD Insights - Sustainable Development: Linking Economy, Society, Environment: Summary in English* [online]. Francie, 2008, s. 2 [cit. 2022-04-26]. ISBN 978-92-64-055742.

[77] ČESKO. Zákon č. 17/1992 Sb. ze dne 5. prosince 1991: Zákon o životném prostředí. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Praha, 1992, částka 4, s. 82. Dostupné také z:

https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/5B17DD457274213EC12572F3002827DE/%24file/Z%2017_1992.pdf

[78] *Ministerstvo pro místní rozvoj ČR: Základní pojetí konceptu udržitelného rozvoje* [online]. In: . [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://www.mmr.cz/cs/ministerstvo/regionalni-rozvoj/informace,-aktuality,-seminare,-pracovni-skupiny/psur/uvodni-informace-o-udrzitelnem-rozvoji/zakladni-pojeti-konceptu-udrzitelneho-rozvoje

[79] Udržitelný rozvoj: Dokumenty. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2022 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Udr%C5%BEiteln%C3%BD_rozvoj#Budoucnost,_kterou_chceme

[80] REMTOVÁ, Květa. *Trvale udržitelný rozvoj a strategie ochrany životního prostředí: Svazek 36*. 1996. ISBN 80-85 368-93-5.

[81] *Místní Agenda 21: Historie a mezinárodní kontext* [online]. In: . [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://ma21.cenia.cz/cs-cz/%C3%BAvod/prove%C5%99ejnost/historieamezin%C3%A1rodn%C3%ADkontext.aspx

[82] PIKHART, Zdeněk. *Trvale udržitelný rozvoj a jeho indikátory: Indikátory trvale udržitelného rozvoje* [online]. 2009 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/33578/PikhartZ_Trvale_udrzitelny_RB_2009.pdf?isAllowed=y&sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Robert Baťa, Ph.D.

[83] MOLDAN, Bedřich. *Indikátory trvale udržitelného rozvoje: Svazek 2*. 1996. ISBN 80-7078-380-X.

[84] SVOBODOVÁ, Jiřina. Indikátory udržitelného rozvoje. In: *Metodický portál RVP.CZ* [online]. 2010 [cit. 2022-06-09].

[85] *IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change: About the IPCC* [online]. In: . [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/about/

[86] MUNASINGHE, Mohan. *Sustainable Development in Practice - Sustainomics Methodology and Applications: 5.2.1 Economic, Social and Environmental Risks and Opportunities* [online]. Cambridge University Press, 2009 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C47DTL/sustainable-development/economic-social-environmental

[87] *Český hydrometeorologický ústav: Historie ústavu* [online]. In: . [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/o-nas/historie-ustavu

[88] PAVELKA, Adam. *Dálkový průzkum Země jako zdroj informací o kvalitě ovzduší: Látky znečišťující ovzduší v ČR* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/ve26u/Dalkovy_pruzkum_Zeme_jako_zdroj_informaci_o_kvalite

_ovzdusi.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Ing. Kateřina Tajovská, Ph.D.

[89] VLASÁKOVÁ, Leona. *KVALITA OVZDUŠÍ NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2021: Předběžné zhodnocení (I. část): Zhodnocení koncentrací PM10, PM2,5, O3, NO2, SO2 a CO* [online]. In: . ČHMÚ Praha-Komořany [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://info.chmi.cz/zpravy/UKO_AIM2021/zprava.pdf

[90] *Zpráva o kvalitě života a její udržitelnosti: Vyhodnocení naplňování Strategického rámce Česká republika 2030* [online]. In: . [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: https://www.cr2030.cz/wp-content/uploads/2022/02/ZPRA%CC%81VA-O-KVALITE%CC%8C-Z%CC%8CIVOTA-A-JEJI%CC%81-UDRZ%CC%8CITELNOSTI.pdf

[91] SRIMADHAV. In: *Earth Cutaway Schematic* [online]. 2018 [cit. 2022-06-13].

[92] ŠIMEK, Miloslav. *Základy nauky o půdě*. 2., upr a rozš. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Biologická fakulta, 2005. ISBN 80-704-0747-6.

[93] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a Jindřich FRAJER. In: *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie* [online]. Olomouc, 2013 [cit. 2022-06-15].

[94] *Velký lékařský slovník* [online]. [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: https://lekarske.slovniky.cz/

[95] JIRKA DL. *Schema pilířů udržitelného rozvoje* [online]. In: . [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43099820

[i] týkající se srdce a plic
[ii] zvýšená nebo snížená tepová frekvence
[iii] fyziologická porucha charakterizovaná přítomností vysokého množství methemoglobinu v krvi
[iv] zúžení průdušek např. při alergii
[v] omezený průtok vzduchu v průduškách
[vi] nedostatek kyslíku [94]